

ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE *Pinus spp* E MATERIAIS CIMENTÍCIOS
ALTERNATIVOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA ALVENARIA
ESTRUTURAL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

**CURITIBA
2009**



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER
Defesa nº. 816

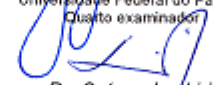
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Adauto José Miranda de Lima* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE *Pinus spp* E MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA ALVENARIA ESTRUTURAL**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor em Engenharia Florestal*, área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.


Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Primeiro examinador


Dr. Everton Hillig
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Segundo examinador



Dr. Marcia Keiko Ono Adiazola
CEFET-PR
Terceiro examinador


Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador


Dr. Setsuo Iwakiri
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 11 de dezembro de 2009.


Setsuo Iwakiri
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
João Carlos Garzel Leodoro da Silva
Vice-coordenador do curso

*A Deus, pelo dom da vida;
A meus pais, Moacyr (in memoriam) e Genoveva;
A minha esposa, Luciane, pela paciência e apoio
constantemente;
A minhas queridas filhas, Laura e Heloisa;
Ao meu irmão, Daniel e sua família.*

AGRADECIMENTOS

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram, participaram ou incentivaram o desenvolvimento deste trabalho, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Setsuo Iwakiri, pelo companheirismo e pela confiança depositada, desde nossas primeiras conversas.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da UFPR, pelo acolhimento, amizade e conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Aos colegas da UTFPR, em especial aos Professores César Augusto Romano, Adalberto Matoski, Marcelo Varisco, Wellington Mazer, Amacin Rodrigues Moreira, Elisabeth Pener, Gilberto Gogola, José Alberto Cerri, Márcia Araújo, José Caron, Enos Pirkiel, Márcia Ono Adriazola, Alfredo Iarosinski Neto, Fernando Beghetto e Izabel Cristina Kruger, pela amizade e apoio constantes.

Aos colegas da Prefeitura de Curitiba, em especial a Inês Ultramari Hartl e toda equipe do Distrito de Manutenção Urbana de Santa Felicidade e da Secretaria Municipal de Obras Públicas.

As alunas que estagiaram no Laboratório de Materiais da UTFPR, Jaqueline Vieira e Viviane Príncipe, pelo auxílio na execução de ensaios.

Ao pessoal do Laboratório de Novos Produtos do Centro Técnico da Votoran Cimentos, em especial ao Luciano Alves Pereira e Thiago Mamoré.

Ao colega Leandro Grabaski do Laboratório de Ótica e Optoeletrônica da UTFPR.

Ao amigo Kirke Moreira, da Diprotec.

Ao pessoal da Bricka Sistemas Construtivos.

Aos alunos do curso de Tecnologia em Concreto, em especial ao Miguel, Gisele, Eduardo, Rubens, Sérgio, Thiago, Douglas e Fernanda.

BIOGRAFIA

ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA, filho de Moacyr Miranda de Lima e Genoveva Woinarowicz de Lima, nascido em Curitiba (PR) em 29 de julho de 1964.

Em 1982 formou-se Técnico em Edificações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

Em 1983 formou-se Oficial da Reserva da Arma de Artilharia do Exército Brasileiro, após curso no Núcleo Preparatório de Oficiais da Reserva do 5º Grupo de Artilharia de Campanha Auto-Propulsado de Curitiba (PR).

Em 1985 ingressou no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, onde se graduou em fevereiro de 1991.

Entre 1991 e 1992, exerceu a função de Gerente Técnico da empresa Usimix Serviços de Concretagem Ltda., supervisionando a qualidade do concreto das filiais da empresa nos estados do Paraná, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Engenheiro efetivo da Prefeitura Municipal de Curitiba desde maio de 1992, lotado na Secretaria Municipal de Obras Públicas, na função de Supervisor do Distrito de Manutenção Urbana de Santa Felicidade.

Professor efetivo do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná desde 1994, onde leciona no curso de graduação em Engenharia de Produção Civil.

Em 2003 obteve o título de Mestre em Construção Civil, pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná.

Em 2006 ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, onde obteve o título de Doutor em Engenharia Florestal em 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SIGLAS	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 COMPÓSITO CIMENTO-MADEIRA	5
2.1.1 Origem/ Histórico.....	6
2.1.2 Vantagens da Utilização de Materiais baseados em Compósitos Cimento-Madeira.....	7
2.1.3 Desvantagens dos Compósitos Cimento-Madeira.....	9
2.2 MATERIAIS COMPONENTES DOS COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA	10
2.2.1 Cimento Portland.....	10
2.2.2 Madeira – Gênero <i>Pinus spp</i>	15
2.3 INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E A MADEIRA.....	17
2.3.1 Constituintes da Madeira.....	17
2.3.2 Processos e Mecanismos da ligação entre o Cimento e a Madeira	21
2.3.3 Agressividade da Matriz Cimentícia.....	22
2.3.4 Métodos de Avaliação da Madeira para uso em Compósitos	23
2.3.5 Fatores que Afetam a Interação Cimento-Madeira	27
2.3.6 Tratamentos Visando Melhorar a Compatibilidade entre o Cimento e a Madeira.....	28
2.4 MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS.....	29
2.4.1 Sílica Ativa.....	34
2.4.2 Metacaulim	38
2.4.3 Cinza Volante	40
2.4.4 Cinza de Casca de Arroz	42
2.4.5 Resíduo de Cerâmica Calcinada	46
2.4.6 Escória de Alto-Forno.....	49
2.4.7 Utilização de Materiais Cimentícios Alternativos em Compósitos Cimento-Madeira.....	51
2.5 ADITIVOS.....	53
2.5.1 Aditivos Superplastificantes	54
2.5.2 Aditivos Aceleradores de Pega	56
2.5.3 Utilização de Aditivos em Compósitos Cimento-Madeira	56
2.6 BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO SIMPLES PARA ALVENARIA	57
2.6.1 Histórico.....	59
2.6.2 Diferenciais da Alvenaria de Blocos de Concreto.....	60
2.6.3 Materiais Empregados na Produção de Blocos de Concreto	61
2.6.4 Produção dos Blocos de Concreto.....	62
2.6.5 Classificação dos Blocos de Concreto.....	65
2.6.6 Nomenclatura e Dimensões dos Blocos de Concreto	65
2.6.7 Requisitos Físicos e Mecânicos.....	67

3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.2	MATERIAIS.....	70
3.3	1ª FASE – ESTUDO PRELIMINAR: DETERMINAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E A SERRAGEM DE <i>PINUS SP</i>	73
3.3.1	Definição das Variáveis de Estudo	74
3.3.2	Caracterização dos Materiais Utilizados na Pesquisa	75
3.3.3	Definição dos Traços para Produção do Compósito Cimento-Madeira.....	78
3.3.4	Determinação do Tamanho Ótimo da Amostra.....	79
3.3.5	Produção e Controle Tecnológico dos Corpos-de-prova.....	80
3.3.6	Determinação da Consistência e Análise Termométrica	81
3.3.7	Análise do Desempenho do Compósito	83
3.3.8	Definição do Teor de Aditivo Acelerador a ser Eempregado e da Granulometria Ideal do Resíduo	86
3.3.9	Definição dos Pré-tratamentos ao Resíduo de <i>Pinus spp</i>	87
3.3.10	Determinação dos Extrativos da Madeira	88
3.4	2ª FASE - ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND.....	89
3.4.1	Compósitos de Referência.....	90
3.4.2	Teores de substituição do cimento Portland.....	91
3.4.3	Teor de Aditivo Acelerador de pega.....	91
3.4.4	Teor de Aditivo Superplastificante	92
3.4.5	Número de Corpos-de-prova e Análise do Desempenho do Compósito	93
3.4.6	Determinação dos Teores Ótimos das Substituições ao Cimento Portland	94
3.4.7	Determinação da Temperatura e Tempo de Hidratação das Misturas Otimizadas	94
3.5	3ª FASE – ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DOS BLOCOS PRÉ-FABRICADOS DE REFERÊNCIA.....	94
3.5.1	Definição dos Parâmetros de Produção e Moldagem dos Blocos.....	95
3.5.2	Determinação das Características Físicas.....	98
3.5.3	Determinação das Características Mecânicas.....	99
3.5.4	Definição dos Traços de Referência	99
3.6	4ª FASE - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO	100
3.6.1	Moldagem de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto por Vibro-compressão.....	101
3.6.2	Equipamento Desenvolvido.....	102
3.6.3	Determinação do Tempo de Equivalente de Moldagem	103
3.7	5ª FASE - ESTUDO DE DOSAGENS COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR SERRAGEM DE <i>PINUS SP</i>	105
3.7.1	Características Analisadas e Número de Corpos-de-Prova	107
3.8	6ª FASE – PRODUÇÃO TESTE DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	108
3.8.1	Produção dos Blocos de Concreto.....	108
3.8.2	Alteração dos Parâmetros de Produção	110
3.8.3	Determinação das Características Físicas e Mecânicas	111
3.8.4	Determinação das Características Térmicas dos Compósitos	112
3.8.5	Análise da Eficiência dos Blocos Protótipos	114
3.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	115

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
4.1	RESULTADOS DA 1ª FASE DA PESQUISA – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E A SERRAGEM DE <i>PINUS SP</i>	117
4.1.1	Caracterização dos Materiais Utilizados	117
4.1.2	Caracterização dos Materiais Cimentícios Alternativos	122
4.1.3	Determinação da Influência do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{\text{máx}}$ do Resíduo de <i>Pinus spp</i> na Hidratação do Cimento Portland	126
4.1.4	Determinação da Influência do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{\text{máx}}$ do Resíduo de <i>Pinus spp</i> na Hidratação do Cimento Portland nas Características Físicas e Mecânicas do Compósito	128
4.1.5	Otimização do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{\text{máx}}$ do Resíduo de <i>Pinus spp</i>	133
4.1.6	Resultados dos Pré-tratamentos ao Resíduo de <i>Pinus spp</i>	137
4.1.6.1	Análise Química	137
4.1.6.2	Determinação da Influência dos Pré-Tratamentos ao Resíduo de <i>Pinus spp</i> sobre a Hidratação do Cimento Portland	138
4.1.6.3	Influência dos Pré-Tratamentos ao Resíduo de <i>Pinus spp</i> sobre as Características Físicas do Compósito.....	144
4.1.7	Decisão quanto ao Pré-Tratamento a Adotar	152
4.1.8	Adoção dos Traços de Referência para a Pesquisa.....	153
4.2	RESULTADOS DA 2ª FASE DA PESQUISA – ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS	155
4.2.1	Determinação da Consistência da Mistura no Estado Fresco	155
4.2.2	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Sílica Ativa.....	156
4.2.3	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Metacaulim	162
4.2.4	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza Volante	167
4.2.5	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Escória de Alto-Forno	171
4.2.6	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Calcinada	176
4.2.7	Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza de Casca de Arroz	180
4.2.8	Análise dos Compósitos com Substituições Parciais do Cimento Portland Otimizadas	185
4.2.9	Análise de Substituições Parciais do Cimento Portland – Curvas de Hidratação dos Traços Otimizados	193
4.3	RESULTADOS DA 3ª FASE DA PESQUISA – PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE REFERÊNCIA	197
4.3.1	Definição dos Parâmetros de Produção	197
4.3.2	Características Físicas dos Blocos de Referência.....	199
4.3.3	Características Mecânicas dos Blocos de Referência.....	201
4.4	RESULTADOS DA 4ª FASE DA PESQUISA - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM POR VIBRO-COMPRESSÃO	203
4.5	RESULTADOS DA 5ª FASE DA PESQUISA – ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO MINERAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS SPP</i> , NO TRAÇO PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS.....	210
4.6	RESULTADOS DA 6ª FASE DA PESQUISA – CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	224
4.6.1	Análise das Características Geométricas	225
4.6.2	Determinação das Características Físicas.....	227
4.6.3	Características Mecânicas dos Blocos Protótipos	230

4.6.4	Determinação das Características Térmicas dos Compósitos Base dos Blocos Protótipos	235
4.6.5	Análise da Eficiência Técnica, Econômica e Ambiental dos Blocos Protótipos	236
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	241
5.1	CONCLUSÕES DO ESTUDO.....	241
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	244
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	245
	REFERÊNCIAS	246
	ANEXOS	256

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	FORMAÇÃO DA CADEIA DE CELULOSE PELA UNIÃO DE UNIDADES DE β -D-GLUCOSE	18
FIGURA 2.2	AÇÚCARES QUE COMPÕEM AS HEMICELULOSES	19
FIGURA 2.3	ESTRUTURAS REPRESENTATIVAS DE ALGUNS EXTRATIVOS ENCONTRADOS EM CONÍFERAS	20
FIGURA 2.4	CURVAS TÍPICAS DE HIDRATAÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTO PORTLAND + ÁGUA E CIMENTO PORTLAND + ÁGUA + MADEIRA.....	23
FIGURA 2.5	MICROGRAFIA DE UMA AMOSTRA DE SILICA ATIVA E GRUMO DE PARTÍCULAS DE SÍLICA ATIVA	36
FIGURA 2.6	MICROGRAFIAS DE UMA AMOSTRA DE METACAULIM	38
FIGURA 2.7	MICROGRAFIA DE UMA AMOSTRA DE CINZA VOLANTE (A) - PARTICULAS VÍTREAS ESFÉRICAS; (B) - PLEOSFERA COM PARTÍCULAS VÍTREAS NO SEU INTERIOR	41
FIGURA 2.8	LANÇAMENTO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NA SANGA DAS CHARQUEADAS, MUNICÍPIO DE TAPES (RS).....	44
FIGURA 2.9	MICROGRAFIA DE DUAS AMOSTRAS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	45
FIGURA 2.10	RESFRIAMENTO RÁPIDO E ESTOQUE DE ESCÓIA DE ALTO FORNO	50
FIGURA 2.11	ESTRUTURAS E MECANISMOS TÍPICOS DA AÇÃO DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES	55
FIGURA 2.12	EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS COM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO	60
FIGURA 2.13	SEQÜÊNCIA BÁSICA DE FUNCIONAMENTO DE UMA VIBRO-PRENSA AUTOMÁTICA	64
FIGURA 2.14	NOMENCLATURA DAS PARTES E DIMENSÕES DE UM BLOCO DE CONCRETO.....	66
FIGURA 3.1	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA 1ª. FASE DO ESTUDO	74
FIGURA 3.2	OBTENÇÃO DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	76
FIGURA 3.3	MOINHO DE BOLAS E MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMPLEMENTARES	77
FIGURA 3.4	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (A) E DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE (B)	78
FIGURA 3.5	SEQUÊNCIA DE PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS: MISTURA MECÂNICA, DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA E CURA INICIAL	81
FIGURA 3.6	ESQUEMA ILUSTRATIVO DO SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	82
FIGURA 3.7	TÉCNICA DE ENSAIO DE TERMOMETRIA COM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	83
FIGURA 3.8	CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS: ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	84
FIGURA 3.9	CORPOS-DE-PROVA CILINDRICOS: DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	86
FIGURA 3.10	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA 2ª FASE DO ESTUDO	89
FIGURA 3.11	COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM OS TEORES MÁXIMOS DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	93
FIGURA 3.12	FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DA 3ª FASE DO ESTUDO	95
FIGURA 3.13	EQUIPAMENTO UTILIZADO E SEQUENCIA DE TRABALHOS PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS.....	97
FIGURA 3.14	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS	99
FIGURA 3.15	FLUXOGRAMA DA 4ª FASE DA PESQUISA.....	101

FIGURA 3.16	SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM POR VIBRO-COMPRESSÃO.....	103
FIGURA 3.17	CORPOS-DE-PROVA PRODUZIDOS COM DIFERENTES TEMPOS DE MOLDAGEM NO SISTEMA ALTERNATIVO DE VIBRO-COMPRESSÃO.....	104
FIGURA 3.18	FLUXOGRAMA DA 5ª FASE DA PESQUISA.....	106
FIGURA 3.19	FLUXOGRAMA DA 6ª FASE DA PESQUISA.....	108
FIGURA 3.20	BLOCOS PROTÓTIPOS.....	110
FIGURA 3.21	TRINCAS EM BLOCOS DEVIDO A VELOCIDADE DE DESFORMA.....	111
FIGURA 3.22	PREPARAÇÃO DOS PRISMAS E ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	112
FIGURA 3.23	PRISMAS PARA ENSAIO DE DETRMINAÇÃO DAS CARATERÍTICAS TÉRMICAS.....	113
FIGURA 3.24	ESQUEMA DO FLUXÍMETRO TIPO PLACA QUENTE PROTEGIDA.....	113
FIGURA 4.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	120
FIGURA 4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS CONVENCIONAIS.....	122
FIGURA 4.3	MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS - DIFRATOGRAMAS DE RAOS X.....	124
FIGURA 4.4	CURVAS DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	128
FIGURA 4.5	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO.....	130
FIGURA 4.6	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM DMÁX = 2,4mm E 4,8mm – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE.....	132
FIGURA 4.7	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	132
FIGURA 4.8	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O (A) – RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> DMÁX = 2,4mm E (B) – RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> DMÁX = 4,8mm.....	133
FIGURA 4.9	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O – VALORES OTIMIZADOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	135
FIGURA 4.10	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O – VALORES OTIMIZADOS - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	136
FIGURA 4.11	INFLUÊNCIA DO DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O – VALORES OTIMIZADOS - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	136
FIGURA 4.12	COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADO COM ÁGUA FRIA SEM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (A) EM COM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (B).....	142
FIGURA 4.13	COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADO COM ÁGUA QUENTE SEM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (A) EM COM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (B).....	143
FIGURA 4.14	COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADO COM NaOH SEM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (A) EM COM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (B).....	143
FIGURA 4.15	COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADO COM Ca(OH) ₂ SEM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (A) EM COM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O (B).....	143
FIGURA 4.16	RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTOS: MASSA ESPECÍFICA DO COMPÓSITO.....	147
FIGURA 4.17	RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTOS: ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE) DO COMPÓSITO.....	147
FIGURA 4.18	RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTOS: ABSORÇÃO DE ÁGUA DO COMPÓSITO.....	147
FIGURA 4.19	RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE DO COMPÓSITO.....	151

FIGURA 4.20	RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS DE IDADE	152
FIGURA 4.21	COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	154
FIGURA 4.22	COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE	155
FIGURA 4.23	COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS DE IDADE	155
FIGURA 4.24	MACROPOROS NO COMPÓSITO COM 20% DE SÍLICA ATIVA E 4,4% DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	157
FIGURA 4.25	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	161
FIGURA 4.26	MACROPOROS NOS COMPÓSITOS COM 40% DE METACAULIM E TEORES DE SUPERPLASTIFICANTE ENTRE 5,8% E 7,8%.....	162
FIGURA 4.27	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	166
FIGURA 4.28	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	170
FIGURA 4.29	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	175
FIGURA 4.30	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	180
FIGURA 4.31	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA E DO TEOR DE CaCl_2	185
FIGURA 4.32	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: MASSA ESPECÍFICA DO COMPÓSITO	187
FIGURA 4.33	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE) DO COMPÓSITO	188
FIGURA 4.34	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: ABSORÇÃO DE ÁGUA DO COMPÓSITO	188
FIGURA 4.35	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE	191
FIGURA 4.36	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE	191
FIGURA 4.37	SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 28 DIAS DE IDADE.....	192
FIGURA 4.38	SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – CURVAS DE HIDRATAÇÃO DOS TRAÇOS OTIMIZADOS	196
FIGURA 4.39	DISPERSÃO DAS MASSAS UNITÁRIAS COMPACTADAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE AGREGADO MIÚDO	198
FIGURA 4.40	BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	200

FIGURA 4.41	BLOCOS DE REFERÊNCIA: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 3, 7, 28 E 91 DIAS DE IDADE	202
FIGURA 4.42	BLOCOS DE REFERÊNCIA: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE	203
FIGURA 4.43	SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	205
FIGURA 4.44	SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE MOLDAGEM EQUIVALENTE.....	206
FIGURA 4.45	COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM.....	208
FIGURA 4.46	COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM.....	209
FIGURA 4.47	COMPARAÇÃO ENTRE A EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM	210
FIGURA 4.48	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE.....	213
FIGURA 4.49	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	215
FIGURA 4.50	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	219
FIGURA 4.51	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	222
FIGURA 4.52	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – EVOLUÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM O TEMPO	223
FIGURA 4.53	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	223
FIGURA 4.54	VALORES DE RETRAÇÃO POR SECAGEM DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	230
FIGURA 4.55	EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO NOS BLOCOS PROTÓTIPOS	234

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	COMPOSIÇÃO POTENCIAL DO CIMENTO PORTLAND	11
TABELA 2.2	TIPOS, NORMAS E COMPOSIÇÃO LIMITES DOS CIMENTOS.....	13
TABELA 2.3	COMPOSIÇÃO APROXIMADA DOS CONSTITUINTES DA MADEIRA DE CONÍFERAS, FOLHOSAS E GRAMÍNEAS	17
TABELA 2.4	ESPECIFICAÇÃO DAS POZOLANAS	30
TABELA 2.5	EXIGÊNCIAS QUÍMICAS PARA MATERIAIS POZOLANICOS	30
TABELA 2.6	EXIGÊNCIAS FÍSICAS PARA MATERIAIS POZOLANICOS.....	31
TABELA 2.7	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA.....	47
TABELA 2.8	COMPOSIÇÃO TÍPICA DAS ESCÓRIAS FRANCESA, NORTE-AMERICANA BRASILEIRA	51
TABELA 2.9	BLOCOS DE CONCRETO: DIMENSÕES REAIS	66
TABELA 2.10	BLOCOS DE CONCRETO: ESPESSURA MÍNIMA DAS PAREDES DOS BLOCOS	67
TABELA 2.11	VALORES MÍNIMOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA	67
TABELA 3.1	COMPOSIÇÃO DO CIMENTO CPV-ARI-RS	70
TABELA 3.2	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO CPV-ARI-RS	70
TABELA 3.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO CPV-ARI-RS.....	71
TABELA 3.4	RESISTÊNCIA À MÍNIMA À COMPRESSÃO DO CIMENTO CPV-ARI-RS	71
TABELA 3.5	CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO ACELERADOR DE PEGA - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	73
TABELA 3.6	CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	73
TABELA 3.7	TEORES DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E TEORES DE ADITIVOS ACELERADOR DE PEGA E SUPERPLASTIFICANTE	91
TABELA 3.8	TEORES DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTE PARA CADA TIPO DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	92
TABELA 3.9	BLOCOS DE CONCRETO: TRAÇOS EM MASSA.....	96
TABELA 4.1	CIMENTO PORTLAND CPV-ARI-RS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CONFORME NBR 9.778 (2005).....	118
TABELA 4.2	CIMENTO PORTLAND CPV-ARI-RS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS CONFORME NBR 7.215 (1996) E NBR 7.222 (1994).....	118
TABELA 4.3	CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE MADEIRA	119
TABELA 4.4	AGREGADO MIÚDO – CARACTERIZAÇÃO	121
TABELA 4.5	AGREGADO GRAÚDO CONVENCIONAL – CARACTERIZAÇÃO.....	121
TABELA 4.6	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DAS ADIÇÕES MINERAIS ATIVAS UTILIZADAS.....	123
TABELA 4.7	MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	126
TABELA 4.8	INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NA TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CPV-ARI-RS EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	127
TABELA 4.9	INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM $\text{DMÁX} = 2,4 \text{ mm}$ E $4,8 \text{ mm}$ – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO.....	129
TABELA 4.10	INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM $\text{DMÁX} = 2,4 \text{ mm}$ E $4,8 \text{ mm}$ – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO	131
TABELA 4.11	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	134
TABELA 4.12	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO.....	134

TABELA 4.13	INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO	136
TABELA 4.14	EXTRATIVOS DETERMINADOS COM OS PRÉ-TRATAMENTOS DO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	137
TABELA 4.15	COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADAS E SEM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	139
TABELA 4.16	COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> PRÉ-TRATADAS E COM ADIÇÃO DE CaCl ₂ .2H ₂ O.....	141
TABELA 4.17	PRÉ-TRATAMENTOS AO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	145
TABELA 4.18	PRÉ-TRATAMENTOS AO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	148
TABELA 4.19	CUSTO PARA PRÉ-TRATAMENTO DE 1 kg DE RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	152
TABELA 4.20	REFERÊNCIAS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	153
TABELA 4.21	REFERÊNCIAS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	154
TABELA 4.22	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O.....	158
TABELA 4.23	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA	159
TABELA 4.24	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA	160
TABELA 4.25	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D	161
TABELA 4.26	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O.....	163
TABELA 4.27	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM	165
TABELA 4.28	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM	165
TABELA 4.29	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D	167
TABELA 4.30	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O	168
TABELA 4.31	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE	169
TABELA 4.32	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE	170
TABELA 4.33	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D.....	171
TABELA 4.34	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO FORNO E DO TEOR DE CaCl ₂ .2H ₂ O.....	172
TABELA 4.35	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	174
TABELA 4.36	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR EAF	174

TABELA 4.37	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D	175
TABELA 4.38	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	177
TABELA 4.39	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RCC	178
TABELA 4.40	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RCC	179
TABELA 4.41	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RCC: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D	179
TABELA 4.42	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE CASCA DE ARROZ E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	181
TABELA 4.43	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA	183
TABELA 4.44	CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA	183
TABELA 4.45	SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CCA: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D	184
TABELA 4.46	SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS COMPÓSITOS	186
TABELA 4.47	SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS	189
TABELA 4.48	VARIAÇÃO APRESENTADA ENTRE AS EXPECTATIVAS DE RESISTÊNCIA E AS RESISTÊNCIAS MÉDIAS OBTIDAS AOS 91 DIAS	192
TABELA 4.49	SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: TEMPERATURAS E TEMPOS DE HIDRATAÇÃO	194
TABELA 4.50	MASSAS UNITÁRIAS PARA COMBINAÇÕES DE AGREGADOS CONFORME NBR NM 45 (2006)	197
TABELA 4.51	PESQUISA DA PROPORÇÃO ÓTIMA DE AGREGADO MIÚDO	198
TABELA 4.52	COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS PARA PRDUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE REFERÊNCIA	198
TABELA 4.53	BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	200
TABELA 4.54	BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	201
TABELA 4.55	SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	205
TABELA 4.56	DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM	206
TABELA 4.57	EXPECTATIVA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS	206
TABELA 4.58	COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM	207
TABELA 4.59	COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM	208
TABELA 4.60	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp IN NATURA</i> NO CONCRETO TRAÇO 1:10 - ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)	211

TABELA 4.61	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp IN NATURA</i> E ADIÇÃO DE 4,5% DE CaCl ₂ .2H ₂ O NO CONCRETO TRAÇO 1 : 10 - ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50 mm)	211
TABELA 4.62	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> COM PRÉ-TRATAMENTO AF-48H E ADIÇÃO DE 4,5% DE CaCl ₂ .2H ₂ O NO CONCRETO TRAÇO 1:10 - ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)	212
TABELA 4.63	PREVISÕES DE RC 7d COM BASE NOS MODELOS DE REGRESSÃO PARA CADA TIPO DE RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	213
TABELA 4.64	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS	214
TABELA 4.65	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE MASSA ESPECÍFICA.....	215
TABELA 4.66	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE ÍNDICE DE VAZIOS	216
TABELA 4.67	SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> : EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	216
TABELA 4.68	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS (ANÁLISE EM CP 50mm).....	217
TABELA 4.69	TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i> – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)	220
TABELA 4.70	BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	226
TABELA 4.71	BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ANÁLISE DA RETRAÇÃO POR SECAGEM	228
TABELA 4.72	BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	231
TABELA 4.73	CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS BLOCOS PROTÓTIPOS.....	236
TABELA 4.74	CUSTO DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	238
TABELA 4.75	CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS – FATORES	239
TABELA 4.76	COEFICIENTES DE EQUIVALÊNCIA E ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	239

LISTA DE SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BRTC	<i>Besser Research and Training Center</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EN	Norma Européia
EUA	Estados Unidos da América
FAO	<i>Food And Agriculture Organization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
ICDD	<i>Internacional Centre of Diffraction Data</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JPDS	<i>Joint Committe on Powder Diffraction</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NBR NM	Norma Brasileira e Norma Mercosul
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
TAPPI	<i>The Leading Association for the Worldwide Pulp, Paper, Packaging and Converting Industries</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Abs	Absorção de Água
AF	Água Fria
AQ	Água Quente
C	Consumo de cimento
Ca	Consumo de água
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CP	Corpo-de-Prova
C-S-H	Silicato hidratado de cálcio
CV	Cinza Volante
D _{máx}	Dimensão Máxima Característica
D _n	Diâmetro nominal
EAF	Escória de Alto-Forno
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IC	Índice de inibição
IE	Índice de Eficiência
HCl	Ácido Clorídrico
IV	Índice de Vazios
MC	Metacaulim
ME	Massa Específica
MF	Módulo de Finura
NaOH	Hidróxido de Sódio
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
Ra/c	Relação água/cimento
RC	Resistência à Compressão
RCC	Resíduo de Cerâmica Calcinada
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RT	Resistência à Tração
SA	Sílica Ativa
Sd	<i>Standard deviation</i>
T _{máx}	Temperatura máxima
U	Teor de umidade
Å	Ângstron
cm ²	centímetro quadrado
R	coeficiente de correlação
R ²	coeficiente de determinação
λ	comprimento de onda
°C	graus centígrados
Ø	diâmetro
K	Kelvin
kgf	kilograma força
MPa	Mega Pascal
m	metro
m ³	metro cúbico
mm	milímetro
pH	potencial de hidrogênio
W	WATT

RESUMO

A crescente preocupação com as questões ambientais e sociais têm se intensificado nas últimas décadas, bem como as ações voltadas para o crescimento sustentável de comunidades em todo o mundo. Diante disso, o setor da construção civil, que utiliza grandes volumes de recursos naturais para a produção de materiais e produtos, tem investido em pesquisas buscando a utilização de resíduos e subprodutos industriais em suas atividades. Seguindo esta tendência, neste trabalho foi pesquisado a utilização de resíduos da produção de madeira serrada de *Pinus spp*, como agregado lignocelulósico, na produção de compósitos cimento-madeira que serviram de base para a produção de blocos vazados para alvenaria estrutural. Foi, também, investigada a possibilidade de substituição parcial do cimento Portland do compósito, utilizado para a produção dos blocos estruturais, por seis materiais cimentícios alternativos, também de origem residual, sendo: sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto-forno, resíduo de cerâmica calcinada e cinza de casca de arroz. Os teores de substituição ao cimento Portland variaram de 5% a 20%, no caso da sílica ativa, 25% a 60%, no caso da escória de alto-forno e de 5% a 40%, para os demais materiais cimentícios. Na determinação da compatibilidade entre o cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp* foram utilizadas técnicas termométricas mediante uso de redes de Bragg em fibras óticas, além da caracterização física e mecânica dos compósitos e blocos produzidos, de acordo com as normas da ABNT. A condutividade térmica do material produzido foi determinada por fluxometria. Obteve-se êxito na produção de blocos protótipos com nove misturas diferentes, todas com substituição de 50%, em volume, do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* e com substituições do cimento Portland por 5% de cinza volante e resíduo de cerâmica calcinada, 10% de sílica ativa e metacaulim, 25% de escória de alto-forno e 30% de cinza de casca de arroz, evidenciando a possibilidade de utilização de todos os materiais residuais empregados.

Palavras Chave: alvenaria estrutural, blocos de concreto, compósitos cimento-madeira, materiais pozolânicos, resíduos.

ABSTRACT

The growing concern with the environmental and social issues has intensified in the last decades, as well as actions which are directed for to sustainable society growth all over the world. The sector of the civil construction, wich uses great amount of natural resources for the production of materials and products, has intensified researches searching for the use of residues and industrial by-products in their activities. Following this tendency, the use of residues of the production sawed *Pinus spp* wood was investigated as lignocellulosic agreggate, in substitution of fine agreggate mineral, originated from nonrenewable sources, for the production of wood-cement composites are used as base for the production of concrete blocks for structural masonry. The possibility of partial substitution of the Portland cement of the composite for six alternative materials: silica fume, metakaolin, fly-ash, blast slag furnace, residue of calcined ceramic and rice husk ash of residual origin, was also investigated. The tenors of substitution to the Portland cement varied from 5% to 20%, in the case of the silica fume; 25% to 60%, in the case of the blast slag furnace and from 5% to 40%, in the case of the other cimenticios alternative materials. The determination of the compatibility among the Portland cement and the residue of *Pinus spp* was made by termimetrics techniques wich used by Bragg sensor's in optic fibres, and also the physical and mechanical characterization of the composites and produced blocks, in agreement with the ABNT normalization. The thermal condutance of the produced material was determined by heat flux measurement. Success was obtained in the production of blocks prototypes with nine different mixtures, with substitutions of 50% in volume, of the fine aggregate mineral for residue of *Pinus spp* and with substitutions of the Portland cement for 5% of fly-ash and residue of calcined ceramic, 10% of silica fume and metakaolin, 25% of blast slag furnace and 30% of rice husk ash, evidencing the possibility of use of all the residual materials researched.

Key Words: structural masonry, concrete blocks, wood-cement coposites, pozzolanic materials, residues.

1 INTRODUÇÃO

A utilização intensiva e extensiva de recursos naturais para a produção de materiais e produtos para suprir as necessidades humanas tem se incrementado acentuadamente nas últimas décadas, em especial na construção civil, setor que utiliza grande quantidade de matérias primas e de recursos financeiros.

Por outro lado, a indústria da construção civil, nestes últimos 30 anos vem realizando a pesquisa de novos materiais e métodos construtivos, que aumentem a eficiência e o desempenho das edificações, buscando se adequar cada vez mais aos conceitos de sustentabilidade.

A sustentabilidade proposta para o desenvolvimento econômico moderno fez com que os mais diversos setores, passassem a se preocupar realmente com os recursos naturais aplicados na produção e aos efeitos ao meio ambiente. A aplicação da série de normas ISO14000 demonstra esta preocupação e a mudança está ocorrendo principalmente no setor industrial.

A geração de resíduos florestais no Brasil assume valores expressivos, pois segundo a ABIMICI (2009) só a produção de madeira serrada em 2008 alcançou o montante de 22,886 milhões de metros cúbicos. Inferindo sobre este valor, o potencial de perdas, que conforme FREITAS (2000) atinge 50%, deduz-se que um mesmo valor de resíduos florestais foi produzido naquele ano. Resíduo que, na maioria das vezes, não agregam valor comercial ao produto final.

Por outro lado, o potencial de utilização desses materiais como agregados em compósitos para a construção civil, apresenta grande importância ambiental, pois os agregados convencionais são oriundos de fontes não renováveis e sua exploração proporciona enormes passivos ambientais.

Dentre os resíduos de outras atividades industriais, muitos tem propriedades que permitem o uso como substituintes ao cimento Portland, cuja produção, conforme OLIVEIRA (2008) é responsável por 7% das emissões de CO₂ no planeta.

A utilização de aditivos superplastificantes, prática consolidada na tecnologia do concreto é, também, inovadora quanto se trata de compósitos cimento-madeira, não havendo, praticamente, nenhuma fonte de consulta sobre o tema.

A técnica de determinação da temperatura de hidratação utilizando sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas é inovador, sendo que esta técnica na área de engenharia é ainda tratada apenas em âmbito laboratorial.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Principal

O principal objetivo deste trabalho foi a produção e caracterização de compósitos cimento-madeira e blocos para alvenaria estrutural, produzidos com resíduo da madeira de *Pinus spp* e de outros seis materiais cimentícios alternativos, subprodutos de outras atividades industriais.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Determinação das características dos materiais utilizados na pesquisa;
- Análise da interação entre o cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp* através da utilização de aditivos químicos e pré-tratamentos da madeira, avaliada por meio de técnicas termométricas utilizando redes de Bragg em fibras óticas, determinação de extrativos e das características físicas e mecânicas do compósito;
- Analisar a influência sobre as características físicas e mecânicas do compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp*, em função da substituição parcial do cimento Portland por seis materiais cimentícios

alternativos, quais sejam: sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto forno, resíduo de cerâmica calcinada e cinza de casca de arroz;

- Estudar os parâmetros de mistura e técnicas para produção de artefatos de concreto;
- Estudar os efeitos da substituição do agregado miúdo convencional pelo resíduo de *Pinus spp*, e da substituição parcial do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos, nos blocos de concreto, através da análise das características físicas e mecânicas do material produzido conforme normas da ABNT;
- Estudar a condutividade térmica do material produzido;
- Realizar a análise da eficiência física, mecânica, econômica e ambiental do novo produto proposto, em comparação com o bloco de concreto convencional para alvenaria estrutural.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, sendo o Capítulo 1, uma Introdução ao tema, e que tem um caráter de apresentação geral e onde estão inseridos os objetivos, a justificativa e as limitações da pesquisa.

O Capítulo 2 compreende uma Revisão da Literatura sobre temas pertinentes, tais como: compósito cimento-madeira e materiais componentes, uma análise sobre a produção e o potencial de utilização de resíduos gerados, a interação entre o cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp*, o uso de adições minerais em substituições ao cimento Portland, uso de aditivos químicos, materiais e métodos de produção de blocos de concreto, entre outros.

Os Materiais e Métodos utilizados na pesquisa são apresentados no Capítulo 3, onde se apresentam, também, as Fases que compõem a pesquisa experimental, as variáveis independentes e dependentes de cada Fase da pesquisa e os procedimentos de ensaios empregados na caracterização dos materiais utilizados e na produção e avaliação dos compósitos produzido com resíduo de *Pinus spp* com as substituições

parciais do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos, bem como dos blocos protótipos produzidos com o material estudado.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos no programa experimental e as análises considerando as características apresentadas pelo compósito cimento-madeira e pelos blocos protótipos produzidos em comparação com os materiais de referência adotados no estudo.

No Capítulo 5, apresentam-se considerações finais e conclusões do estudo, além de sugestões de temas para pesquisas futuras.

Nos Anexos ao estudo encontram-se as análises estatísticas efetuadas neste estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este Capítulo aborda assuntos aparentemente distintos, porém, imprescindíveis para formar o entendimento sobre o escopo desta pesquisa.

Inicialmente faz-se uma revisão sobre compósitos cimento-madeira, apresentando os materiais constituintes, as vantagens e desvantagens de seu uso e como se encontra atualmente a pesquisa com estes materiais, com vistas, principalmente, à produção de elementos para construção civil.

Em uma segunda etapa, aborda-se o emprego de materiais cimentícios alternativos ao cimento Portland, também conhecidos como pozolanas, apresentando as suas fontes de geração, composições e reações químicas que possibilitam seu emprego como aglomerantes.

Por último, apresentam-se as características que diferenciam o concreto de cimento Portland tradicional, do utilizado para a produção de pré-fabricados, dando ênfase à produção de blocos de concreto.

2.1 COMPÓSITO CIMENTO-MADEIRA

O conceito de misturar fibras ou partículas vegetais, tais como partículas de madeira ou resíduos da produção agrícola em matrizes inorgânicas é muito antigo. Segundo MOSLEMI (1989), desde os tempos pré-históricos já eram produzidos tijolos com misturas de argila e cascas de arroz ou trigo, que funcionavam como fibras de reforço, reduzindo o desenvolvimento de trincas e melhorando o desempenho do material produzido.

Nos tempos modernos, esse mesmo conceito básico vêm sendo aplicado na utilização de fibras e partículas de madeira, junto com cimento Portland ou outros aglomerantes inorgânicos para produção de compósitos (MOSLEMI, 1989).

CHITTENDEN (1972) citado por SEMPLE e EVANS (2004) divide os materiais produzidos com compósitos cimento-madeira em dois grupos distintos. O primeiro grupo diz respeito aos compósitos em que a madeira é incorporada como um agregado

numa matriz mineral e o segundo, onde o aglomerante mineral atua unicamente como uma ponte de adesão entre as partículas de madeira.

As partículas de madeira incorporada nos compósitos atuam como um agregado ou fibra de baixo custo, e melhora algumas características da matriz cimentícia, principalmente quanto à relação resistência/massa, fluência, resistência térmica e acústica (GOODELL et al., 1997, apud SEMPLE e EVANS, 2004).

2.1.1 Origem/ Histórico

A viabilidade da produção de compósitos reforçados com fibras naturais vem sendo pesquisada a décadas, possuindo uma longa história de aceitação e aplicação na construção civil, especialmente na Europa e Ásia.

VALENZUELA (1989) citado por GRANDI (1995), relata que os compósitos de madeira com matriz de cimento foram mencionados pela primeira vez em 1908.

A utilização do cimento Portland como aglomerante em painéis minerais, iniciou-se em 1928, mas seu crescimento só ocorreu após a II Guerra Mundial (IWAKIRI, 2005). Antes dessa data, o aglomerante utilizado era a magnesita e gipsita, (MALONEY, 1977 apud IWAKIRI, 2005), porém, conforme MOSLEMI (1989), estes materiais produziam painéis com baixa qualidade, por serem muito susceptíveis a umidade. De acordo com BERALDO (1994), esses painéis eram conhecidos por *Excelsius* (EUA) ou *Heraklith* (Europa), sendo que em meados da década de 50, várias patentes foram depositadas pela sociedade Elmendorf.

Atualmente os painéis cimento-madeira, são muito utilizados na Alemanha, Japão, Suíça, entre outros países, principalmente por apresentarem propriedades isolantes, alto grau de resistência ao fogo, ótimas características mecânicas, estabilidade dimensional, além de sua versatilidade, que permite seu uso em ambientes internos ou externos das construções. Conforme EVANS (2000), na América do Norte, México, União Européia e Austrália, se verificou uma rápida expansão do uso de materiais produzidos com compósitos cimento-madeira, principalmente em função do êxito quanto à substituição dos produtos de cimento-amianto, banidos nesses países.

O interesse está na busca de materiais de baixo custo, baixo consumo de energia, disponibilidade e ambientalmente seguros, por isso, de acordo com SWAMY (1990), estes materiais, devem despertar o interesse dos países em desenvolvimento, pois podem representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infraestrutura desses países.

Iniciativas dessa natureza encontram grande interesse econômico e ambiental direcionadas à construção civil e ao reaproveitamento de resíduos (SOROUSHIAN et al., 1995 e BASIN-RAS, 1994 apud HON e SHIRAIISHI, 2001). A utilização dos resíduos provenientes das indústrias que processam madeira ou de madeiras residuais das etapas de construção e demolição de obras civis vem se tornando uma questão de relevante importância. Resolver este problema será uma maneira de resguardar os recursos naturais e reduzir a emissão de dióxido de carbono.

2.1.2 Vantagens da Utilização de Materiais baseados em Compósitos Cimento-Madeira

As principais vantagens do uso de materiais produzidos com compósitos cimento-madeira de acordo com SEMPLE e EVANS (2004), MOSLEMI (1989) e (1993), são:

- Disponibilidade de matéria prima em grandes quantidades;
- Baixa massa específica, o que permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas, elementos de vedação e de alvenaria, entre outros;
- Baixa permeabilidade, quando comparado à madeira e placas de compensado;
- Pode ser serrado, furado, receber parafusos e pinturas.

Outras vantagens que podem ser citadas são:

Não emitem resíduos tóxicos durante sua manufatura (VAN ELTEN, 2000 apud SEMPLE e EVANS, 2004), o que elimina os riscos à saúde dos trabalhadores que trabalham na linha de produção, além de não necessitarem de tratamentos preservativos, conforme cita RAMIREZ-CORETTI et al. (1998).

Menor dispêndio de energia no processo de produção, conforme cita MOSLEMI (1989), SEMPLE e EVANS (2004), RAMIREZ-CORETTI et al. (1998), inclusive se tornando uma alternativa viável aos fibrocimentos que utilizam asbesto (amianto), principalmente na Europa, Japão e América do Norte (MOSLEMI, 1898).

Capacidade de Dissipação de Energia, sendo indicados para uso em regiões propensas a abalos sísmicos ou furacões (WOLFE e GJINOLLI, 1997 apud SEMPLE e EVANS, 2004). Por esta razão, os painéis compostos por cimento e madeira se apresentam significativamente como materiais para a construção residencial no Japão, onde as normas de construção enfatizam fortemente a sua utilização, sendo que em 1991, este tipo de material respondia por 41% do mercado (KUROKI et al., 1993 apud SEMPLE e EVANS, 2004).

Isolante termo-acústico SAVASTANO JÚNIOR et al (1997), inclusive sendo utilizado como barreiras sonoras em rodovias (WOLF e GJINOLLI, 1999 e LAN e HUANG, 2000 apud SAMPLE e EVANS, 2004).

Rapidez e Facilidade de Aplicação, o que possibilita sua aplicação em situações de emergência, principalmente para construção de abrigos em regiões afligidas por desastres naturais RAMIREZ-CORETTI et al. (1998) e possibilidade de moldagem em diversas formas (SILVA, 2002).

Imune aos agentes biodeterioradores (RAMIREZ e CORETTI, 1998; HOLDERNESS, 1994 apud MATOSKI, 2005; SEMPLE e EVANS, 2000);

Durabilidade, mantendo e até aumentando sua resistência após anos de exposição às intempéries. SEMPLE e EVANS (2004) citam os trabalhos de SERGEEV et al. (1995) em que painéis cimento-madeira foram expostos a temperaturas entre + 55°C e – 55°C em Moscou, por um período de 12 anos, mantendo resistência acima de 16MPa, DINWOODIE e PAXTON (1989), no qual painéis expostos a 20°C e 65% de umidade relativa, apresentaram aumento de resistência de 12% nos primeiros 4 meses depois de fabricados e após 10 anos, o ganho de resistência foi de 45%. Este ganho de resistência e durabilidade dos painéis é atribuído pelos autores a *mineralização* dos elementos de madeira pelo cimento (SEMPLE e EVANS, 2004).

Excelente estabilidade dimensional quando comparado com outros compósitos orgânicos de madeira, como compensados de chapas de partículas. Além disso, a absorção de água é muito pequena (LEE, 1984 apud JORGE et al., 2004; SEKINO e SUZUKI, 2002; MOSLEMI, 1989).

2.1.3 Desvantagens dos Compósitos Cimento-Madeira

A principal desvantagem a ser citada, diz respeito à incompatibilidade química entre o cimento e a madeira. A constituição química da madeira, em função da presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, podem afetar de forma adversa as reações de hidratação do cimento Portland (HACHMI e CAMPBELL, 1989; MOSLEMI, 1989).

As propriedades mecânicas dos compósitos cimento-madeira são função direta da interface entre as partículas ou fibras de madeira e são afetadas pelo tipo de madeira, quantidade, geometria e arranjo das partículas na matriz cimentícia. (RAZZI et al, 1999).

Outras desvantagens, que podem ser citadas, são:

- Capacidade de produção reduzida e/ou a necessidade de grandes áreas para cura do compósito (HSU, 1992; MALLARI et al., 1997 apud SEMPLE e EVANS, 2004). Compósitos produzidos com a maioria dos cimentos Portland existentes exigem cura a 80°C por 6 a 8 horas ou cura ambiente por 18 a 20 dias (MOSLEMI, 1989).
- Durabilidade reduzida, no caso de utilização de fibras de madeira, que ao longo do tempo, sob efeito do meio alcalino, que desintegram, gerando espaços vazios e, conseqüentemente, provocando redução das características mecânicas do material produzido (SAVASTANO JÚNIOR, 2002).
- Porosidade excessiva da matriz cimentícia

Para reduzir essa porosidade, COUTTS e NI (1995) e COUTTS e WARDEN (1990) apud SAVASTANO JÚNIOR (2002), sugeriram que o compósito seja moldado sobre pressão, com a conseqüente redução da relação água/cimento (a/c). Uma vez retirada à pressão, a fibra porosa devolve à matriz parte da água por ela absorvida, o que ajuda a manter a interface mais densa.

2.2 MATERIAIS COMPONENTES DOS COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA

2.2.1 Cimento Portland

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (2008) o cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação, isto é, das reações químicas entre os minerais do cimento e a água. O cimento hidráulico mais utilizado é o cimento Portland, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, que são os principais responsáveis por sua característica adesiva e estabilidade em meio aquoso.

O cimento Portland resulta da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pela queima até fusão incipiente (1450°C) de uma mistura de calcário e argila, que contenham os quatro óxidos principais (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), convenientemente dosada e homogeneizada, de tal forma que todo o CaO se combine com os compostos argilosos, sem que, resulte CaO livre em quantidade prejudicial. Após a queima, é feita a adição de sulfato de cálcio ou anidrita (CaSO_4) ou na forma de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), a fim de regularizar o tempo de início das reações de hidratação do cimento (PIETRUCCHI, 1993; AÏTCIN, 2000)

Composição

O cimento anidro consiste de partículas angulares de tamanho que comumente variam entre 1 e $50\mu\text{m}$. É produzido pela pulverização do clínquer com pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo o clínquer uma mistura heterogênea de

vários minerais produzidos em reações a alta temperatura (1450 °C), entre óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro.

Essas substâncias reagem entre si no forno, dando origem a uma série de produtos mais complexos, e, com exceção de um pequeno resíduo de calcário não combinado, que não teve tempo suficiente para reagir, é alcançado um estado de equilíbrio químico. No entanto este equilíbrio não se mantém durante o resfriamento, e a velocidade de resfriamento, afeta o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer resfriado. As propriedades desse material amorfo, que é uma fase vítrea, diferem bastante daquelas dos compostos cristalinos de composição química similar, porém, considera-se o cimento em equilíbrio congelado, ou seja, os produtos, depois de resfriados, reproduzem o equilíbrio existente à temperatura de clínquerização. (NEVILLE, 1997).

Dentre a composição potencial do cimento Portland, quatro compostos são considerados principais. Na Tabela 2.1, relaciona-se tais compostos, apresentando sua constituição e os teores presentes no cimento Portland (NEVILLE, 1997; PETRUCCI, 1993).

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO POTENCIAL DO CIMENTO PORTLAND

Composto	Constituição	Símbolo	Teores Típicos
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S	45% a 60%
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S	15% a 30%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	6% a 12%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	6% a 8%

Fonte: NEVILLE (1997); PIETRUCCI (1993)

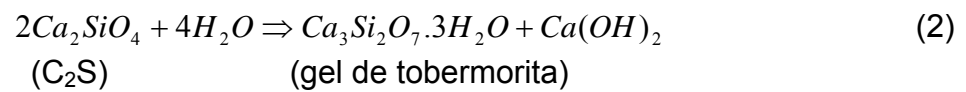
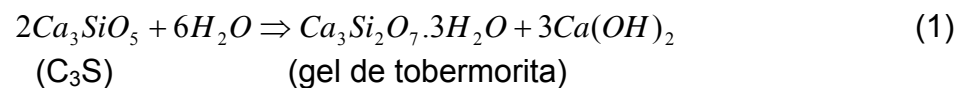
Além dos compostos principais relacionados na Tabela 2.1, existem compostos secundários como MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O e Na₂O, que geralmente representam um percentual reduzido de massa do cimento. Dentre estes compostos secundários, os óxidos de sódio e potássio, conhecidos como álcalis do cimento, são de maior interesse, pois podem reagir com alguns agregados convencionais, podendo

provocar desde a redução das características mecânicas até a desintegração do concreto (NEVILLE, 1997).

Hidratação

Segundo AİTCIN (2000), a pasta de cimento hidratada pode ser considerada como um material cristalino de uma única fase, onde os princípios fundamentais que governam o comportamento dos materiais frágeis, como a cerâmica, podem ser aplicados de forma conveniente para controlar a microestrutura e suas propriedades.

Na primeira etapa de hidratação do cimento, o C_2S e o C_3S são hidratados para formar um gel de tobermorita e de hidróxido de cálcio, conforme as expressões:



A resistência da pasta de cimento hidratado é influenciada pelo teor de C_3S e C_2S , quando ocorre a formação do silicato hidratado de cálcio $C_3S_2H_3$, cuja forma abreviada é CSH, que representa 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os cristais de $Ca(OH)_2$ representam 20% a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada e pouco contribuem para a resistência mecânica da mesma, pois possuem área específica consideravelmente menor que o CSH (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Além disso, os cristais de $Ca(OH)_2$ são extremamente instáveis quimicamente e podem se dissolver na água absorvida da umidade presente no ar (PIETRUCCI, 1993).

A resistência da pasta hidratada de cimento não é influenciada somente por sua composição química. A ocorrência de vazios, poros e falhas têm uma considerável influência em suas propriedades (NEVILLE, 1997; NEVILLE e BROOKS, 1987 apud MEHTA e AİTCIN, 1990).

Tipos de Cimento

De acordo com a ABCP (1997), existem no Brasil vários tipos de cimento, uns mais empregados e outros consumidos em menor escala, em função de suas características especiais. A Tabela 2.2, apresenta os tipos de cimento disponíveis comercialmente no Brasil, bem como a sigla pela qual são designados e a classe, que representa a resistência mínima à compressão, em MPa, aos 28 dias de idade.

TABELA 2.2 - TIPOS, NORMAS E COMPOSIÇÃO LIMITES DOS CIMENTOS

Nome Técnico	Sigla	Classe (MPa)	Filler	Composição (Teores Máximos %)		
				Pozolana	Escória	Mat. Carbonático
CP Comum NBR 5.732 (1991)	Cimento Portland Comum CP I	25, 32, 40	-	-	-	-
	Cimento Portland Comum com Adição CP I - S	25, 32, 40	-	-	-	0% a 5%
	Cimento Portland Composto com Escória CP II - E	25, 32, 40	-	-	6% a 34%	0% a 10%
CP Composto NBR 11.578 (1991)	Cimento Portland Composto com Pozolana CP II - Z	25, 32, 40	-	6% a 14%	-	0% a 10%
	Cimento Portland Composto com Filler CP II - F	25, 32, 40	6% a 10%	-	-	0% a 10%
Cimento Portland de Alto Forno NBR 5.735 (1991)	CP III	25, 32, 40	-	-	35% a 70%	0% a 5%
Cimento Portland Pozolânico NBR 5.736 (1991)	CP IV	25, 32	-	15% a 50%	-	0% a 5%
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial NBR 5.733 (1991)	CPV - ARI		-	-	-	0% a 5%
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação NBR 13.116 (1994)			-	-	-	-
Cimento Portland Branco Estrutural NBR 12.989 (1993)	Cimento Portland Branco CPB	25, 32, 40	-	-	-	-
	Cimento Portland Branco Não Estrutural CPB		-	-	-	-
Cimento para Poços Petrolíferos NBR 9.831 (2006)	CPP		-	-	-	-

Fonte: ABCP (1997), Adaptado pelo Autor

Cimento para uso em Compósitos Cimento-Madeira

Após os anos 30, houve uma gradual evolução na tecnologia da produção de painéis de madeira reconstituída, que utilizam resinas como aglomerante, sendo que muitos dos conceitos dessa tecnologia, tais como a orientação das fibras da madeira na matriz, acabaram sendo aplicados na produção de painéis produzidos com cimento, principalmente pela empresa norte-americana *Elmendorf Research Inc.*, que lançou no mercado, painéis estruturais, que apresentavam qualidade superior (MOSLEMI, 1989).

Conforme BERALDO (1977), diversos pesquisadores têm apresentado resultados satisfatórios com cimentos Portland de alta resistência inicial – CPV ARI.

Características do CPV ARI RS

Conforme a NBR 5737 (1992) os cimentos resistentes a sulfatos apresentam alta reatividade em baixas idades em função de seu grau de moagem. O clínquer é o mesmo utilizado para a produção de um cimento convencional e sua resistência a sulfatos é devida à adição de materiais pozolânicos, devendo se enquadrar em pelo menos uma das seguintes condições:

- Teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- Cimentos tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- Cimentos tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem a resistência a sulfatos (meios agressivos sulfatados, como redes de esgoto, águas servidas, industriais, água do mar e em alguns tipos de solos).

O cimento Portland de alta resistência a sulfatos CPV ARI RS é largamente utilizado na produção industrial de artefatos de concreto, concreto protendido, pré e pós-tensionado, pisos industriais, argamassa armada e concreto dosado em central (POUEY, 2006).

Características Ambientais da Produção do Cimento Portland

A indústria de cimento vem apresentando um rápido crescimento em todo o mundo. Em 2005, conforme dados do SNIC (2008) a produção mundial alcançou a marca de 2,29 bilhões de toneladas, 80% superior que a produção de 1998. Os maiores

produtores mundiais são pela ordem: China (1.049 Mt), Índia (146,8 Mt), EUA (100 Mt) e Japão (73,5 Mt). No Brasil, a produção de cimento Portland atingiu a marca de 41,6 milhões de toneladas no ano de 2006. De acordo com OLIVEIRA (2008), a indústria cimenteira é responsável por 7% das emissões de CO₂ no mundo, sendo produzidos, em média, 0,8 t a 1,0 t de CO₂, por tonelada de cimento produzido, e o Brasil, com sua produção anual por volta das 41 milhões de toneladas, contribui com 2,5% desse total.

Conforme SUMMER et al. (2008), 30% a 40% das emissões de CO₂ se devem devido à combustão de combustíveis fósseis no forno produtor de clínquer e 50% a 60% das emissões, são geradas na calcinação do calcário, durante a produção do clínquer.

Segundo aquele autor, as indústrias cimenteiras dos países desenvolvidos, ao final do primeiro período (2007) que excederam suas metas de emissão de CO₂ devem comprar créditos de carbono no mercado aberto e pagar uma multa de € 40,00 por cada tonelada de CO₂ emitida. Ao final de 2012, a multa será aumentada para € 100,00 por tonelada emitida. Portanto, o uso de adições minerais ou substituições por materiais cimentícios alternativos em cimentos compostos mostra-se como uma potencial contribuição na redução das emissões de CO₂, pois a estes materiais cimentícios alternativos (calcário, escória de alto forno, pozolanas) é adicionada após a produção do clínquer, já na etapa de moagem do cimento.

2.2.2 Madeira – Gênero *Pinus spp*

O gênero *Pinus spp*, da família das *Pinaceae*, é composto por plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura variável. As plantas têm tronco reto, mais ou menos cilíndrico e copa em forma de cone. Possuem folhas em forma de acículas, agrupadas em fascículos. Sua madeira apresenta massa específica que varia de 400 a 520 kg/m³, a 15% de umidade. A cor da madeira do cerne varia do amarelo-claro ao alaranjado ou castanho-avermelhado (LIMA et al., 1988). Algumas espécies de *Pinus* se incluem entre as árvores mais utilizadas no mundo (MORAIS et al., 2005).

Espécies de *Pinus* vêm sendo introduzidas no Brasil há mais de um século. Muitas delas foram trazidas pelos imigrantes europeus como curiosidade, para fins ornamentais e para produção de madeira. As primeiras introduções que se tem notícia foram de *Pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias, no Rio Grande do Sul, em torno de 1880 (NAHUZ, 2004).

As primeiras tentativas efetuadas visando fins silviculturais deram-se em 1936, pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, com espécies de procedência européia, não havendo sucesso, em decorrência da má adaptação ao nosso clima (NAHUZ, 2004).

A partir de 1947 o Serviço Florestal do Estado de São Paulo recebeu, oriundas dos Estados Unidos, as primeiras sementes e em 1948 iniciou-se um plano de incentivo ao reflorestamento, com distribuição de mudas de *Pinus eliottii*; *Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus taeda* e *Pinus radiata*. Essa última espécie demonstrou alguns anos mais tarde, sua incapacidade de se desenvolver nas condições ambientais brasileiras (PIMENTEL, 2000).

A partir de 1955 o Serviço Florestal iniciou outro plano de reflorestamento, desta vez com *Pinus eliottii* e *Pinus taeda*, os quais demonstraram ótimo desenvolvimento em condições climáticas brasileiras, principalmente nas regiões Sul e Sudeste.

As madeiras pertencentes ao gênero *Pinus spp* fornecem material de boa qualidade para a produção de celulose, além de apresentar características tecnológicas adequadas para seu aproveitamento em serraria. Durante as etapas do processamento mecânico da madeira produz-se grande quantidade de resíduos que, até o momento, não têm recebido a devida valorização.

O incremento na produção de madeira de *Pinus spp* pode ser verificada analisando os dados da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009), onde se verifica uma produção toras de *Pinus spp*, em 2007, de 50,6 milhões de metros cúbicos, contra 42 milhões de metros cúbicos em 1997, portanto, um acréscimo de produção de 20,48% em dez anos.

Sob esta ótica, a geração de resíduos florestais no Brasil também assume valores expressivos, pois segundo a ABIMICI (2009) só a produção de madeira serrada em 2008 alcançou o montante de 22,886 milhões de metros cúbicos. Inferindo sobre este valor, o potencial de perdas, que conforme FREITAS (2000) atinge 50%, deduzese que um mesmo valor de resíduos florestais foi produzido naquele ano.

2.3 INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E A MADEIRA

2.3.1 Constituintes da Madeira

As substâncias orgânicas constituintes da madeira podem ser classificadas em componentes da parede celular e extrativos. Os componentes principais das células da madeira são os carboidratos e as substâncias fenólicas. Os carboidratos são essencialmente macromoléculas (polisacarídeos) e são aproximadamente 75% das substâncias presentes na madeira. Os elementos estruturais (celulose, hemiceluloses e lignina) determinam as propriedades físicas da madeira (JAYNE e BODIG, 1993) e, além destes, existem ainda, na composição das madeiras, os extrativos, considerados por vários autores como constituintes secundários (MORAIS et al., 2005).

Na Tabela 2.3, apresenta-se a quantidade aproximada em que os constituintes macromoleculares estruturais (celulose, hemiceluloses e lignina) e extrativos estão presentes nas madeiras de coníferas e folhosas, de acordo com SJÖSTRÖM (1993).

TABELA 2.3 - COMPOSIÇÃO APROXIMADA DOS CONSTITUINTES DA MADEIRA DE CONÍFERAS, FOLHOSAS E GRAMÍNEAS

Componentes	Composição (%)		
	Madeira de Coníferas	Madeira de Folhosas	Gramíneas
Celulose	42 ± 2	45 ± 2	36 ± 5
Hemiceluloses	27 ± 2	30 ± 5	27 ± 3
Lignina	28 ± 3	20 ± 4	11 ± 3
Extrativos	3 ± 2	3 ± 2	26 ± 5

Fonte: SJÖSTRÖM (1993)

Celulose

Dentre os carboidratos, a celulose é o componente primário da parede celular. De acordo com JAYNE e BODIG (1993) é o material químico orgânico mais abundante na natureza e é produzido pela polimerização biocintética de unidades básicas de moléculas de β -D-glucose, um açúcar simples – monossacarídeo hexose ($C_6H_{12}O_6$), podendo chegar a 15.000 unidades numa cadeia polimérica, dependendo da sua localização na parede celular.

Na Figura 2.1, apresenta-se a formação da molécula de celulose via eliminação de água (SJÖSTRÖM, 1993).

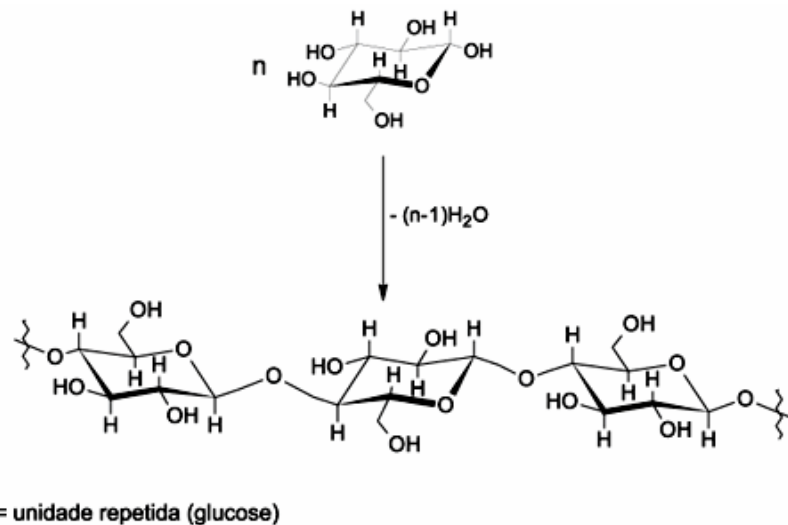


FIGURA 2.1 - FORMAÇÃO DA CADEIA DE CELULOSE PELA UNIÃO DE UNIDADES DE β -D-GLUCOSE
Fonte: SJÖSTRÖM (1993)

Hemiceluloses

O termo hemiceluloses se refere a polissacarídeos de massas moleculares relativamente baixas, os quais estão intimamente associados à celulose nos tecidos das plantas. Enquanto a celulose, como substância química, contém como unidade fundamental exclusivamente moléculas de β -D-glucose, as hemiceluloses são polímeros em cuja composição podem aparecer, condensadas em proporções variadas,

diversas unidades de açúcar, como apresentado na Figura 2.2 (FENGEL e WEGENER, 1989; SJÖSTRÖM, 1993).

De acordo com HACHMI e CAMPBELL (1989), as hemiceluloses por apresentam estrutura ramificada, amorfa, com peso molecular muito baixo (grau de polimerização entre 100 e 250) são solúveis em água e soluções alcalinas, o que permite serem facilmente removidas, solubilizadas e degradadas.

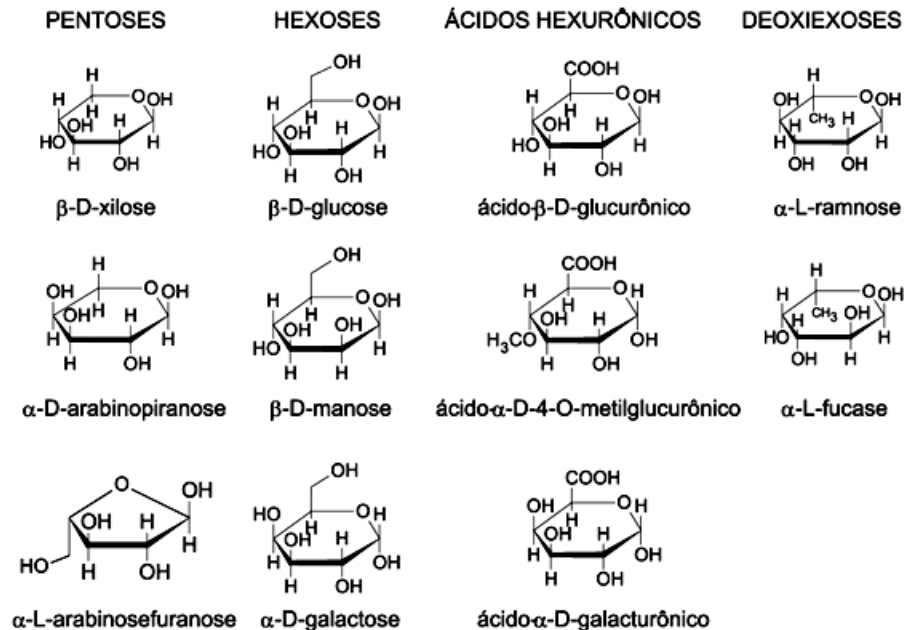


FIGURA 2.2 - AÇÚCARES QUE COMPÕEM AS HEMICELULOSES
Fonte: SJÖSTRÖM (1993)

Lignina

A lignina que também apresenta a mesma composição elementar da celulose representa cerca de 20 - 30 % da madeira, porém seus três constituintes estão-organizados em uma estrutura carbônica constituída por uma cadeia alifática e um anel benzênico. A unidade formadora da lignina é o fenilpropano (FENGEL e WEGENER, 1984).

Conforme KLOCK (2005) quando a lignina é tratada com soluções alcalinas a temperaturas elevadas podem ocorrer rupturas nas ligações entre as unidades de fenilpropano, formando grupos fenólicos, responsáveis pela sua solubilização.

Extrativos

Os extrativos são compostos químicos que não fazem parte da estrutura da parede celular. São constituídos por substâncias como taninos, açúcares simples, sais, gomas, corantes, amidos, gorduras, resinas, fitosteróis, terpenos, terpenóides, entre outros (HACHMI e CAMPBELL, 1989) e, podem ser removidos com tratamentos simples, como extração com água fria ou quente ou com solventes orgânicos, como etanol, tolueno, acetona ou diclorometano (SJÖSTRÖM, 1993). Estão presentes principalmente na casca das árvores (MORAIS et al., 2005).

Para JAYNE e BODIG (1993), os extrativos são responsáveis, também, por importantes modificações nas características físicas da madeira. MORAIS et al. (2005) apresentam a grande diversidade de compostos que compõem alguns extrativos encontrados em coníferas, conforme a Figura 2.3.

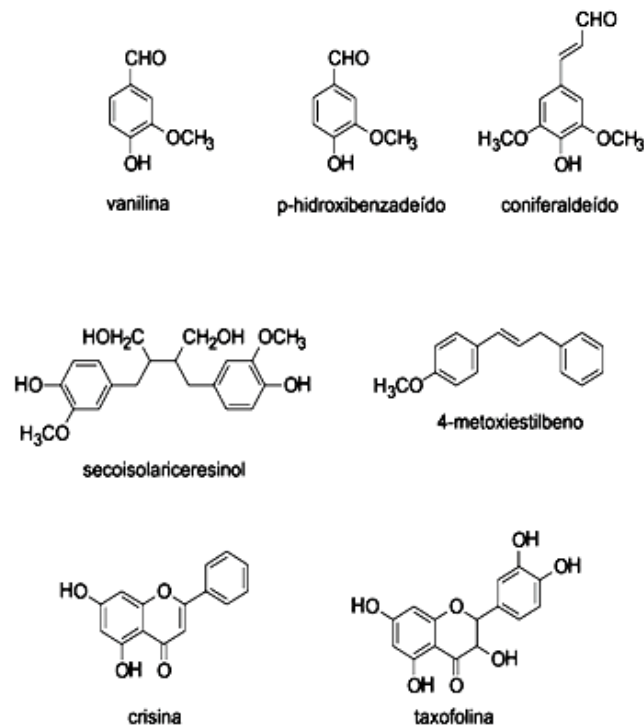


FIGURA 2.3 - ESTRUTURAS REPRESENTATIVAS DE ALGUNS EXTRATIVOS ENCONTRADOS EM CONÍFERAS
Fonte: MORAIS et al. (2005)

2.3.2 Processos e Mecanismos da ligação entre o Cimento e a Madeira

O termo compatibilidade, que vem sendo aplicado na área de pesquisa sobre compósitos cimento-madeira se refere ao tempo de endurecimento do cimento e se esse processo é ou não perturbado em presença da madeira (JORGE et al., 2004). A resistência do cimento Portland depende principalmente dos teores de C_2S e C_3S . A adição de quaisquer outros materiais, tais como partículas de madeira ou outros aditivos, orgânicos ou inorgânicos irá afetar a magnitude da reação de hidratação, do tempo de reação e da resistência final do material (HACHMI e CAMPBELL, 1989).

HACHMI e CAMPBELL (1989) determinaram que os carboidratos reagem com o cálcio, alumínio e cátions de ferro do cimento e através de hidrólise com a manose e galactose ou através dos ácidos glucorônicos para retardar a reação de hidratação do cimento Portland, reduzindo sua cristalinidade e resistência. Nos estágios mais avançados da hidratação do cimento, a água e os componentes da madeira dissolvidos são, provavelmente, arrancados da madeira e migram para a superfície das partículas de madeira. Estes compostos inibem os estágios mais avançados da hidratação e endurecimento do cimento. Além disso, a retirada da água das partículas da madeira causa uma retração das partículas que reduzem a ligação da pasta de cimento com as partículas de madeira.

De acordo com MILLER e MOSLEMI (1991) e BERALDO e CARVALHO (2004), resinas e outras substâncias químicas podem, também, migrar para a superfície da madeira durante o período de secagem da madeira, formando uma camada hidrófoba que reduz as pontes de hidrogênio entre a madeira e o cimento, o que, sem dúvida, implica na redução da resistência na interface.

Para BERALDO e CARVALHO (2004), não se deve apenas considerar a quantidade de extrativos da madeira, mas também o tipo de extrativo (ácidos graxos, taninos, carboidratos e outros) e para SIMATUPANG et al. (1988), os extrativos da madeira são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento. Seus princípios ativos são os compostos fenólicos e os carboidratos livres, enquanto que

para HACHMI e MOSLEMI (1990), as substâncias solúveis em água apresentam um efeito mais pronunciado sobre a inibição da pega do cimento.

Os compostos fenólicos presente no cerne de algumas espécies florestais têm efeito nocivo quanto à interação com o cimento Portland, como demonstrado por SANDERMANN e BRENDEL (1956) apud MILLER e MOSLEMI (1991). Estes estudos indicam que a existência de mais de 0,2% destes compostos na madeira inibem totalmente a hidratação do cimento Portland.

O efeito de substâncias inibitórias ao cimento pode ser verificado quando se varia a concentração das mesmas em relação à massa de cimento (BERALDO, 1994). A glicose, na concentração de 1%, inibiu completamente a pega de um tipo de cimento (SIMATUPANG, 1986). Conforme DIETRICH (1964), citado por FENGEL e WEGENER (1984), mesmo em coníferas, que de acordo com MOSLEMI (1988) e HACHMI e CAMPBELL (1989), são mais compatíveis com o cimento Portland, se verificam altas porcentagens de açúcares simples no floema e nos limites do floema com xilema, decrescendo rapidamente o conteúdo em direção aos limites do cerne e alburno.

2.3.3 Agressividade da Matriz Cimentícia

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) os cristais de Ca(OH)_2 produzidos durante a hidratação do cimento Portland, representam 20% a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada o que, conforme HACHMI e CAMPBELL (1989) aumenta o pH da pasta para aproximadamente 12,5 propiciando o inchamento, dissolução e degradação da madeira.

Para FAN et al. (2000), o aumento do pH da matriz é capaz de remover grande parte dos extrativos e dissolver consideráveis partes dos componentes da madeira, especialmente a hemicelulose, proporcionando alterações dimensionais no compósito cimento-madeira.

2.3.4 Métodos de Avaliação da Madeira para uso em Compósitos

A hidratação de materiais cimentícios é resultado de um somatório de reações químicas exotérmicas dos compostos do cimento, liberando calor. O monitoramento da hidratação pode ser medido como total de calor acumulado (pela variação da temperatura) ao longo do tempo. Pesquisas utilizando esta técnica, realizadas por LERCH (1946) citado por SANDBERG e BENINI (2008), já demonstravam que a taxa de liberação de calor pela hidratação depende grandemente da composição química e características físicas do cimento, presença de materiais cimentícios suplementares, aditivos químicos e de outras substâncias que possam influenciar no processo de hidratação do cimento.

Portanto, como a reação de hidratação do cimento Portland é exotérmica, é comum analisar a compatibilidade entre o cimento e a madeira através da determinação da temperatura desta reação de hidratação. Para tanto SANDERMANN e KHOLER (1964) citados por HOFSTRAND et al. (1984) apud IWAKIRI (2005), sugeriram que espécies altamente compatíveis, quando misturadas com o cimento, apresentem uma temperatura superior a 60°C, enquanto espécies incompatíveis não excedam a temperatura de 50°C.

Conforme HACHMI e CAMPBELL (1989), o comportamento típico de uma curva de desenvolvimento do calor de hidratação de uma mistura cimento-água-madeira, pode ser verificada na Figura 2.4.

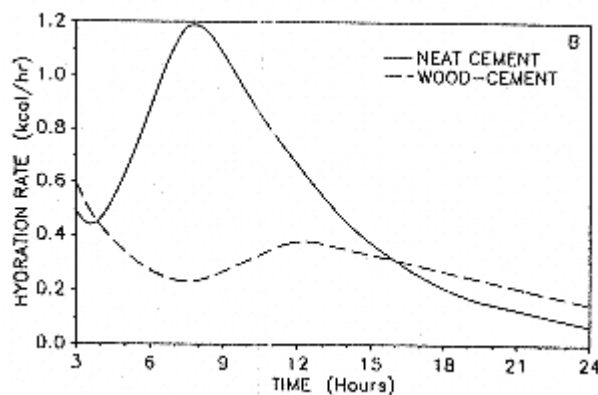


FIGURA 2.4 - CURVAS TÍPICAS DE HIDRATAÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTO PORTLAND + ÁGUA E CIMENTO PORTLAND + ÁGUA + MADEIRA

Fonte: HACHMI e CAMPBELL (1989)

Para descrever um índice de compatibilidade com mais precisão, HOFSTRAND et al (1984), citado por IWAKIRI (2005), desenvolveram uma equação mais sofisticada para indicar um índice de compatibilidade entre o cimento e a madeira, que considera as temperaturas máximas das reações de hidratação de misturas contendo e não contendo madeira, assim como, também, as taxas máximas de variação de temperatura por tempo, das misturas. Este índice é representado pela expressão:

$$I = 100x \frac{(t_2 - t'_2)}{t'_2} x \frac{(T'_2 - T_2)}{T'_2} x \frac{(S'_2 - S_2)}{S'_2} \quad (3)$$

Onde: t_2 = tempo para atingir a máxima temperatura (cimento e água);

T_2 = Temperatura máxima de hidratação (cimento e água);

S_2 = Taxa máxima de variação de temperatura por tempo (cimento e água)

t'_2 = tempo para atingir a máxima temperatura (cimento, madeira e água)

T'_2 = Temperatura máxima de hidratação (cimento, madeira e água)

S'_2 = Taxa máxima de variação de temperatura por tempo (cimento, madeira e água);

LEE e HONG (1986) apresentam um indicador de compatibilidade entre o cimento e a madeira baseado em resultados de ensaios para a determinação da resistência à compressão axial de amostras cilíndricas feitas com o molde padrão ASTM. Naquele estudo as amostras foram produzidas com cimento Portland Tipo I, similar ao cimento Portland Comum brasileiro, especificado pela NBR 5.732 (1991), e com resíduos de madeira das espécies *Southern-pine*, *White-oak*, *Yellow-poplar*, *Sweet-gum* e *Hickory*, na proporção 13:1. Os resultados indicam que a resistência à compressão é diretamente proporcional à temperatura máxima de hidratação. Este mesmo método é verificado nos trabalhos de BERALDO (1994), ZUCCO (1999), PIMENTEL (2000), LATORRACA (2000), BERALDO e CARVALHO (2004), MATOSKI (2006), entre outros.

Outros métodos utilizados para avaliação da aptidão e das características dos compósitos cimento-madeira, tais como, avaliação por ultra-som, podem ser

observados nos trabalhos de BERALDO (1994) e STANCATO (2006) e determinação do desempenho à tração na flexão, conforme LEE et al. (1987).

Determinação da Temperatura Utilizando Redes de Bragg em Fibras Óticas

A tecnologia de medição da temperatura por fibra ótica foi apresentada pela primeira vez em 1981 na Universidade de Southampton (AUFLEGER et al., 2003).

Redes de Bragg são assim denominadas em homenagem à Sir Willian Lawrence Bragg (1890 – 1971), físico australiano ganhador do prêmio Nobel, com trabalho baseado no fenômeno de difração de raios-X em cristais. Bragg descobriu que os raios-X são refletidos em cristais, de acordo com a lei física da reflexão da luz e, que a distância entre os planos paralelos de átomos determinam um ângulo de reflexão de acordo com o comprimento da onda do raio-X. Esta relação é denominada lei de Bragg (MASTRO, 2000). Sistemas sensores para o estudo de vibrações mecânicas e de temperatura através de redes de Bragg em fibras óticas são promissores em virtude de suas pequenas dimensões, inércia química, imunidade eletromagnética, alta sensibilidade, possibilidade de monitoração remota e de multiplexagem, etc. (MARTELLI et al., 2004; MOSER et. al, 2006; CHOQUET et al, 2000).

Uma rede de Bragg é essencialmente uma microestrutura que pode ser inscrita no núcleo de uma fibra ótica ($\varnothing_{\text{núcleo}} \approx 10\mu\text{m}$, $\varnothing_{\text{fibra}} \approx 125\mu\text{m}$) por métodos diversos, utilizando radiação ultravioleta coerente, emitida por um laser. Essa microestrutura consiste numa pequena alteração periódica e localizada, do índice de refração, que tem origem num mecanismo físico denominado fotossensibilidade, particularmente observável em fibras de sílica com elevadas dopagens de germânio ou em fibras óticas standard, submetidas a tratamento com hidrogênio a alta pressão (FERREIRA et al. 2004).

Conforme FERREIRA et al. (2004) Quando uma luz proveniente de uma fonte de largo espectro é guiada pela fibra e incide na rede de difração, ocorre o espalhamento de luz nos planos consecutivos da rede. Para cada rede há um determinado comprimento de onda para o qual é satisfeita uma condição de

ressonância em que as ondas geradas em cada plano estão em fase, originando uma reflexão forte. Esse comprimento de onda é denominado comprimento de onda de Bragg, λ_B , e a dependência no período da rede de difração, Λ_B , é dado por:

$$\lambda_B = 2n_{ef} \Lambda_B \quad (4)$$

Onde: n_{ef} : índice de refração efetivo da fibra ótica

Tal como a maioria dos sensores de fibra ótica, os sensores de Bragg são intrinsecamente sensíveis à temperatura, às deformações axial e transversal, à pressão e, em situações particulares, ao campo magnético. Por intermédios dessas sensibilidades, os sensores de Bragg podem ser utilizados na medição de uma grande variedade de grandezas físicas (FERREIRA et al. 2004).

A dependência de um sensor de Bragg na temperatura T pode ser obtida por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T = \beta_T \Delta T \quad (5)$$

Onde: β_T = coeficiente de sensibilidade térmica do sensor de Bragg;

α = coeficiente de expansão térmica da fibra;

ζ = coeficiente termo-ótico que estabelece a relação entre o índice de refração efetivo e a temperatura.

Os sensores de Bragg respondem, então, a variação da temperatura refletindo um sinal ótico com uma assinatura espectral bem definida no comprimento de onda de Bragg. A ação do parâmetro a medir traduz-se numa alteração dessa assinatura espectral evidenciada por uma variação no comprimento de onda de Bragg (FERREIRA et al. 2004).

2.3.5 Fatores que Afetam a Interação Cimento-Madeira

A compatibilidade entre a madeira e a matriz cimentícia pode ser fortemente influenciada pelas seguintes características:

- Espécie vegetal (JORGE et al., 2004);
- Características físicas e químicas da madeira
- Tamanho e geometria da partícula de madeira SORFA e BONGERS (1982) e VALENZUELA (1989) apud LATORRACA 2000; ZUCCO (1999) e CASTRO (2000);
- Idade das árvores BERALDO e CARVALHO (2004); PUGEL et al. (1990) e BIBLIS e LO (1968) citados por LATORRACA (2000);
- Estação do ano em que a madeira é cortada (WEATHERWAX e TARKOW, 1964 e BIBLIS e LO, 1968 citados por LATORRACA, 2000, BERALDO e CARVALHO, 2004);
- Tempo de espera entre o corte da madeira e a utilização (SHWARTZ e SIMATUPANG, 1984; SANDERMANN e SCHMITS, 1966 citados por SIMATUPANG et al.,1978; SIMATUPANG,1996 e VALENZUELA, 1989 citados por BERALDO, 1994);
- Quantidade de açúcares e gomas presentes na madeira (SANDERMANN et al. 1960 citados por SAMPLE e EVANS, 2004);
- Tipo de cimento utilizado JORGE et al. (2004), BERALDO (1994), BERALDO e CARVALHO (2004);
- Proporcionamento entre o cimento, a água e a madeira SCHMITZ (1959) e SIMATUPANG et al. (1978) citados por LATORRACA (2000);
- Temperatura ambiente;
- Quantidade de água presente na produção do compósito.

Este último item merece uma análise mais cuidadosa, pois a água está presente no processo de produção dos compósitos cimento-madeira sob três formas:

- água livre adicionada de acordo com o conteúdo de umidade das partículas,

- água utilizada na dissolução dos aditivos e,
- água presente na madeira (BIRAULT, 1989).

É necessário adicionar água até o ponto de saturação das fibras (PSF), pois se considera que abaixo deste teor de umidade, a água não estará disponível ao cimento como um líquido (SIMATUPANG et al., 1978 apud LATORRACA, 2000).

Esse exemplo pode ser observado na equação (6) sugerida por SIMATUPANG (1979) e apresentada por MOSLEMI e PFISTER (1987) apud IWAKIRI (2005).

$$C_a = R_{a/c} \cdot C + (PSF - U) \cdot M \quad (6)$$

Onde: C_a = Consumo de água (kg)

$R_{a/c}$ = Relação água/cimento;

C = Consumo de cimento (kg)

PSF = Ponto de saturação das fibras (adotado como 30%);

U = Teor de umidade da madeira (%) e M = Quantidade de madeira (kg)

2.3.6 Tratamentos Visando Melhorar a Compatibilidade entre o Cimento e a Madeira

Como nem sempre é possível escolher espécies compatíveis com o cimento, pode-se tentar melhorar essa compatibilidade com tratamentos simples e confiáveis. Conforme SIMATUPANG et al. (1988), essas técnicas podem ser: maturação da madeira ou das partículas, extração dos componentes que causam inibição, secagem das partículas, utilização de cimento de Alta Resistência Inicial, utilização de cimento aluminoso, uso de aceleradores de pega, dentre outros.

A seguir são apresentados alguns tratamentos que visam melhorar a compatibilidade entre o cimento e a madeira, conforme:

- Extração com água quente e fria (SIMATUPANG, 1986 e SOUZA, 1994 apud LATORRACA, 2000, GNANAHARAN e DHAMODARAN, 1985 citados por JORGE et al., 2004, BERALDO e ROLIM 1996, HACHMI e CAMPBELL 1989, entre outros);

- Extração com soluções alcalinas como hidróxido de sódio e cálcio (LATORRACA, 2000, BERALDO, 1997, GRANDI, 1991, PEREIRA et al., 2001 e COUTINHO, 1997 citados por JORGE et al., 2004);
- Impregnação das partículas de madeira por materiais hidrófugos como o Neutrol (AGOPYAN, 1991);
- Impregnação das partículas de madeiras com agentes bloqueadores, como silicatos e sulfatos de sódio, magnésio e alumínio (MILANI, 2005);
- A utilização de aditivos químicos aceleradores de pega (WEI e TOMITA, 2001 apud SEMPLE e EVANS, 2004; NAGADOMI et al., 1996 apud LATORRACA, 2000; BERALDO et al., 2000; SIMATUPANG et al., 1978 apud SEMPLE e EVANS, 2004; RASHWAN et al., 1992 apud MILANI, 2005);
- Degradação Biológica: Quanto a este aspecto não há um consenso entre os pesquisadores, pois enquanto BIBLIS e LO (1968) e SIMATUPANG et al. (1978) citados por LATORRACA (2000), afirmam ser esta medida benéfica para interação cimento-madeira, WEATHERWAX e TARKOW (1967) indicam o contrário.

2.4 MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS

O uso de materiais cimentícios alternativos não é uma novidade na construção civil, pois segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), estes materiais provêm do período de 1500 a.C., na Grécia, onde se adotava um material de origem vulcânica originado na ilha Santorini. O termo pozolana, por sua vez, foi utilizado pela primeira vez na Itália, no ano 300 a.C. para descrever as cinzas vulcânicas provenientes da vila de Pozzuoli, próxima à cidade de Nápoles.

As normas ASTM C 618 (1991) e ABNT NBR 12.653 (1992), definem como pozolana o material silicoso ou sílico-aluminoso, que apresenta poder aglomerante quando na presença de umidade em temperaturas próximas à ambiente, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio, produzido na hidratação do cimento.

Especificação das Pozolanas

A norma NBR 12.653 (1992) - *Materiais pozolânicos*, especifica três classes para os materiais pozolânicos, conforme Tabela 2.4.

TABELA 2.4 - ESPECIFICAÇÃO DAS POZOLANAS

Classificação	Materias que Obedecem aos Requisitos
Classe N	Pozolanas naturais, materias vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas.
Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso
Classe E	Os materiais que diferem das classes anteriores e a cinza volante proveniente da queima de carvão sub-betuminoso

Fonte: NBR 12.653 (1992)

A NBR 12.653 (1992) estabelece, também, algumas exigências mínimas com relação às características químicas (Tabela 2.5) e físicas (Tabela 2.6) dos materiais pozolânicos.

TABELA 2.5 - EXIGÊNCIAS QUÍMICAS PARA MATERIAIS POZOLANICOS

Propriedades	Classe do Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínima)	70,0	70,0	50,0
SO ₃ (% máxima)	4,0	5,0	5,0
Teor de Umidade (% máxima)	3,0	3,0	3,0
Perda ao Fogo (% máxima)	10,0	6,0	6,0
Álcalis Disponíveis em Na ₂ O (% máxima)	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12.653 (1992)

TABELA 2.6 - EXIGÊNCIAS FÍSICAS PARA MATERIAIS POZOLANICOS

Propriedades	Classe do Material Pozolânico		
	N	C	E
Material Retido na Peneira 45 μm (% máxima)	34,0	34,0	34,0
Índice de Atividade Pozolânica:			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mínima)	75,0	75,0	75,0
Com cal aos 7 dias, em MPa (resist. mínima)	6,0	6,0	6,0
Água Requerida (% máxima)	115,0	110,0	110,0

Fonte: NBR 12.653 (1992)

Ação das Pozolanas

O cimento Portland, se totalmente hidratado, produz em torno de 28% de sua própria massa de Ca(OH)_2 (CARMO, 2006). Por outro lado, conforme NEVILLE (1997), dificilmente ocorre a hidratação de 100% do cimento Portland, tendendo a resultar, pelo menos 20% de sua própria massa de Ca(OH)_2 . No que se refere à ação química, a introdução de pozolanas proporciona uma reação com esse hidróxido de cálcio, produzido durante a hidratação do cimento (CARMO, 2006).

A capacidade das pozolanas em reagir com o Ca(OH)_2 é propriedade fundamental destes materiais (SANTOS, 1992). Esta reação resulta na formação de compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e os aluminatos de cálcio hidratado, que são os principais elementos responsáveis pela resistência das pastas hidratadas de cimento (CARMO, 2006).

De acordo com CARMO (2006), a ação física das pozolanas nos concretos é mais intensa, visto que estes materiais, por apresentarem uma finura mais elevada que o cimento tende a apresentar:

- Aumento da densidade da matriz cimentícia, devido ao preenchimento dos espaços vazios da matriz, fenômeno conhecido como micro-carga;
- Refinamento da estrutura dos poros da matriz e dos produtos de hidratação do cimento;

- Densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados. Esta alteração interfere na movimentação das partículas de água livre, provocando a eliminação ou redução do acúmulo de água que comumente fica retida sob os agregados. Este efeito é acompanhado pela redução do índice de vazios entre as partículas de cimento e a superfície dos agregados, fenômeno denominado de microfiter, e da redução da concentração de Ca(OH)_2 nesta região.

Benefício do Uso das Pozolanas

Conforme UCHIKAWA (1992) apud AITCIN (2000) e CARMO (2006), a utilização de pozolanas em adição ou substituição parcial ao cimento Portland, apresenta as seguintes vantagens:

- Redução do consumo de cimento;
- Eliminação ou retardamento da reação álcali-agregado;
- Maiores resistências mecânicas em idades tardias: melhorando a microestrutura da pasta endurecida de aglomerante ao reagir com o Ca(OH)_2 produzindo CSH, fazendo com que a resistência, com o passar do tempo, tenda a superar a do cimento Portland comum;
- Menor calor de hidratação: o uso de pozolanas diminui a velocidade inicial de hidratação do cimento, reduzindo o calor de hidratação;
- Maior trabalhabilidade, devido ao melhor arranjo e maior volume do aglomerante há um envolvimento mais eficiente dos grãos do agregado;
- Melhor resistência ao ataque ácido;
- Durabilidade: diminuição da permeabilidade em função da redução do diâmetro dos poros da pasta hidratada.

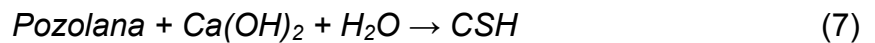
Além dos benefícios citados, convém lembrar que grande parte dos materiais pozolânicos provém de resíduos de processos industriais, que sem uma política séria de controle ambiental, acabam por ser descartados em rios, campos, lagoas ou

simplesmente depositados à beira de estradas, como no caso das cinzas de casca de arroz.

Fatores que Influenciam a Atividade das Pozolanas

Entende-se por atividade pozolânica como a capacidade que uma determinada pozolana tem em reagir com o hidróxido de cálcio, isto é, quanto maior o valor do hidróxido de cálcio consumido pela pozolana, maior sua atividade (NITA e JOHN, 2007).

Esta reação se processa da seguinte forma: durante as reações de hidratação do C_2S e C_3S ocorre a formação do $Ca(OH)_2$. A sílica existente nas pozolanas reage com o $Ca(OH)_2$, formando os silicatos de cálcio hidratados (CSH) que tem menor reação CaO/SiO_2 , formando produtos de menor basicidade do que os produzidos pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento e, portanto, são mais estáveis quimicamente. Esta reação, bem como a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentos (SANTOS, 1997).



Esta reação, por se dar a temperatura ambiente, é geralmente lenta e pode levar meses para ser completada, entretanto, quanto mais vítrea e mais fina for à pozolana, mais rápida será a reação com a cal. Ao se utilizarem adições ativas misturadas ao cimento Portland, em proporções adequadas, teoricamente, toda a cal produzida pela hidratação do C_3S e C_2S poderia ser transformada em CSH, porém, em condições reais, a reação pozolânica nunca é completa (AÏTCIN, 2000).

Índice de Atividade Pozolânica

A reatividade de uma pozolana é decorrência de dois fatores: elevada área superficial (superfície específica) e estrutura predominantemente não cristalina (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

No Brasil, a avaliação da atividade pozolânica de um material, baseadas na resistência mecânica das misturas ou em ensaios químicos, podem ser efetuados de acordo com os métodos de ensaio proposto pelas seguintes normas ou recomendações técnicas:

- NBR 5751 (1977) - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica: Índice de atividade pozolânica com cal;
- NBR 5752 (1992) - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland;
- NBR 5733 (1980) - Método de Fratini;
- Método de Chapelle Modificado/ IPT.

Existem, ainda, métodos internacionais, denominados:

- ASTM C 989 (2009) – *Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortar*;
- ASTM C 1073 (2003) – *Standard Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali*;
- LUXAN et al (1989), citado nos trabalhos de WEBER (2001) e DAFICO (2001) – Que avalia a reatividade das pozolanas através de sua condutividade elétrica.

2.4.1 Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro silício e de outras ligas de silício. O silício e suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão e ferro, durante a produção de ligas ferro-silício. Durante a redução da sílica, dentro do arco elétrico, um sub-óxido de silício ou monóxido de silício gasoso, SiO, é produzido. Como esse gás escapa para a parte superior da carga, ele se resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica ou dióxido de silício (SiO₂), sendo coletadas por um sistema de eliminação de pó (AÏTCIN, 2000).

Este rejeito industrial recebeu inicialmente denominações tais como fumos de sílica ou microssílica, contudo a NBR 13.956 (1997) estabeleceu a denominação sílica ativa como padrão (CARMO, 2006).

Em 2001 a produção mundial de sílica ativa era de 585,7 milhões de toneladas, tendo como maiores produtores a Noruega e os Estados Unidos. No Brasil, naquele ano, a produção era de 10,5 milhões de toneladas (IBGE, 2002 apud CARMO, 2006).

As primeiras investigações sobre o uso da sílica ativa em concretos se deram nos anos 60, na Noruega. Na década de 80, estas pesquisas se estenderam para outros países, como Canadá e Estados Unidos (MALHORTA, CARETTE e SIVASUNDARAM, 1994 apud CARMO, 2006).

Conforme CARMO (2006) a adoção da sílica ativa no Brasil, só começou a ser debatida em congressos em 1984, com a realização do 1 Seminário Tecnológico Elken, porém, este material só recebeu maior atenção no *8th International Congress on the Chemistry of Cement*, que ocorreu no Rio de Janeiro em 1986.

Características Físicas e Químicas da Sílica Ativa

As características químicas e físicas da sílica ativa dependem do tipo de liga produzida, tipo de forno e da composição química e dosagem das matérias primas.

A sílica ativa é um pó fino cuja cor varia de cinza claro a cinza escuro. Como o SiO_2 é incolor, a cor da sílica ativa é determinada pelo teor de carbono e de óxido de ferro presentes. O teor de SiO_2 da sílica ativa varia entre 85% a 90%, em função do tipo de liga produzida. Do ponto de vista físico, as partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, com diâmetros variando de menos de 0,1 μm até 1 μm ou 2 μm , de tal forma que a esfera média da sílica ativa é até 100 vezes menor que a média das partículas de cimento Portland (ACI 234R-96, 2001 apud MENDES, 2002).

A superfície específica média da sílica ativa, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio (BET), é de 20.000 cm^2/g podendo variar de 13.000 cm^2/g a 25.000 cm^2/g .

A massa específica é da ordem de $2,20 \text{ g/cm}^3$, menor que a do cimento Portland, que é de aproximadamente $3,10 \text{ g/cm}^3$ (NEVILLE 1997).

A massa unitária varia entre valores como 250 kg/m^3 a 300 kg/m^3 , em estado natural a valores entre 500 kg/m^3 a 700 kg/m^3 , quando densificada (KHAYAT e AİTCIN, 1993 apud MENDES, 2002).

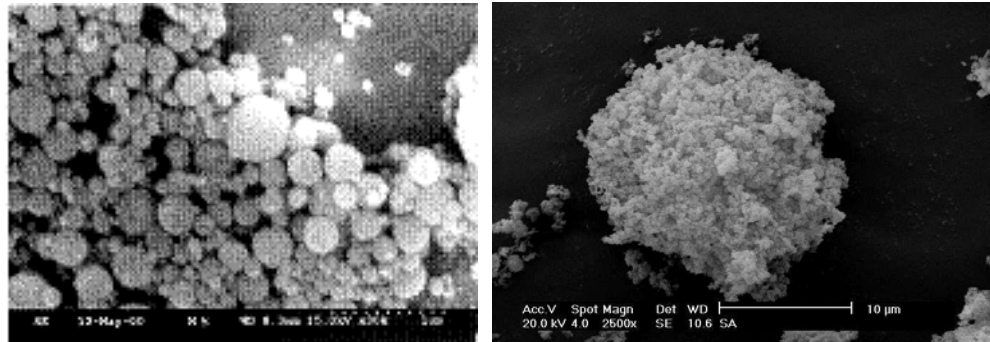


FIGURA 2.5 - MICROGRAFIA DE UMA AMOSTRA DE SİLICA ATIVA E DE UM GRUMO DE PARTÍCULAS DE SİLICA ATIVA
Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008) e DAFICO (2001)

Dosagem de Sílica Ativa

De acordo com AİTCIN (2000) a dosagem ideal de sílica ativa, necessária para fixar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do C_3S e do C_2S do cimento Portland, estaria entre 25% e 30% da massa de cimento. Porém, estas dosagens não seriam viáveis na prática, devido à quantidade elevada de aditivo superplastificante necessária.

As dosagens de sílica ativa, geralmente empregadas nos concretos de alto desempenho, se encontram na faixa de 5% a 15% sobre a massa do cimento (ACI 363R-92, 2001 apud MENDES, 2002).

Para alguns pesquisadores, teores abaixo de 5% não resultam em aumento da resistência mecânica dos concretos, pois esta quantidade é insuficiente para permitir o fortalecimento da interface pasta-agregado. Dosagens acima de 15% resultam em menores ganhos de resistência e aumentos consideráveis no custo final do concreto (NEVILLE, 1997).

Quanto à quantidade de sílica ativa utilizada no concreto, podem-se citar os seguintes trabalhos e conclusões: MALHORTA e MEHTA (1996) concluíram que o teor ótimo de sílica ativa varia entre 7% a 10% da massa de cimento, podendo em algumas situações especiais chegar a 15%. AÏTCIN (2000) sugere valores entre 8% e 10%. SABIR (1995) apud MENDES (2002) indica que teores de substituição acima de 16% proporcionam uma uniformidade nos resultados de resistência à compressão, ISAIA (1996) trabalhou com teores de 10% e 20%, DAL MOLIN (1995) trabalhou com misturas com 10% de adição de sílica ativa, CARETTE e MALHORTA (1993) citados por MENDES (2002), utilizaram em seus estudos 10% de sílica ativa, LOPES (1998) e MENDES (2002), com 8% e CARMO (2006) com variações entre 5 a 20% .

Efeitos da Sílica Ativa na Microestrutura dos Concretos

Os benefícios da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades dos concretos devem-se principalmente a dois mecanismos de ação: o efeito químico ou efeito pozolânico e os efeitos físicos: efeito microfiler e de refinamento dos poros dos produtos de hidratação do cimento (MALIER, 1991 apud MENDES, 2002).

O efeito pozolânico consiste na capacidade da sílica ativa de se combinar rapidamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (CSH) adicional, produto este que é o principal responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento (DAL MOLIN, 1995).

O efeito microfiler consiste no preenchimento dos vazios entre as partículas maiores de cimento Portland e em função disto, um aumento da fluidez do concreto com uma relação água/cimento muito baixa (GROVES e RICHARDSON, 1994 apud AÏTCIN, 2000).

Em função de sua grande finura, a adição de sílica ativa, em substituição de parte do cimento, resulta em um aumento na demanda de água para manter a mesma trabalhabilidade de uma pasta de cimento puro. Isto produz um concreto com relação água/cimento mais elevada (NEVILLE, 1997). Assim, todo o benefício que se consegue na resistência e durabilidade do concreto pela ação físico-química da sílica ativa, pode

ser contraposto pela maior quantidade de água necessária para tornar o concreto trabalhável (ALMEIDA, 1996 apud MENDES, 2002).

Para evitar-se a adição de mais água na mistura, é imprescindível o uso de aditivos superplastificantes, aditivos redutores de água de alta eficiência, que dispersam as partículas de cimento e sílica ativa, diminuindo o atrito interno existente entre elas (KHAYAT e AİTCIN, 1993 apud MENDES, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

2.4.2 Metacaulim

O metacaulim, também denominado metacaulim de alta reatividade, é originado da calcinação da caulinita de alta pureza, sendo uma das adições minerais mais eficazes para obtenção de resistências elevadas em concretos. A caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - é essencialmente um silicato de alumínio hidratado, que após sua calcinação perde a maioria dos radicais OH^- e passa a ser um silicato de alumínio desidratado, no estado amorfo, passando em seguida por um processo de moagem altamente eficiente, conferindo elevada área superficial às partículas (ROCHA e VASCONCELOS, 2006) .

Além das vantagens em função da alta reatividade com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e em função da finura das partículas, que conferem ao produto final uma maior compacidade, a utilização do metacaulim inibe a reação álcali-agregado e pode reduzir o calor de hidratação, pois a quantidade necessária de cimento Portland, para atingir um nível de resistência, se torna bem menor (ROCHA e VASCONCELOS, 2006).

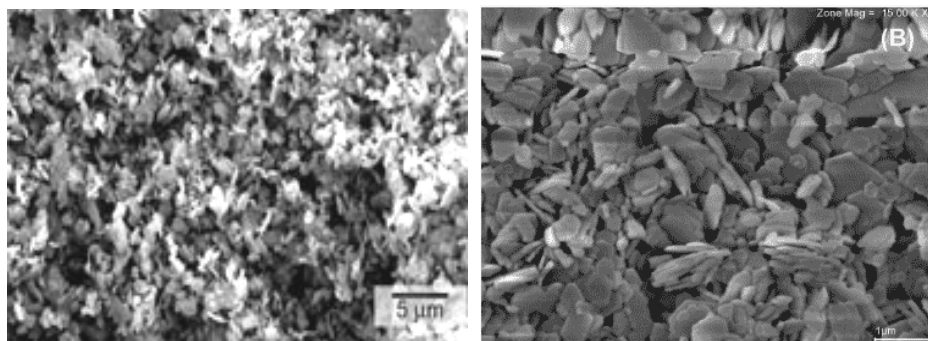


FIGURA 2.6 - MICROGRAFIAS DE UMA AMOSTRA DE METACAU LIM
Fonte: www.metacaulim.com.br (2009) e MAIA et al. (2007)

Em função da potencialidade de emprego do metacaulim como uma pozolana de alta reatividade, CARMO 2006, constata um aumento no número de publicações internacionais sobre o assunto, principalmente a partir da metade da década de 90, e cita os trabalhos desenvolvidos por CALDARONE, GRUBER e BURG (1994) e ZHANG e MALHOTRA (1995).

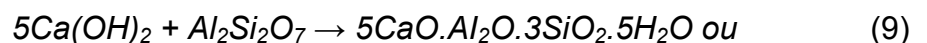
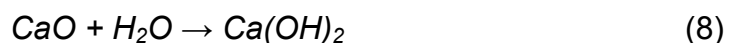
No Brasil, têm-se observados poucos estudos sobre o assunto. Dentre estes, pode-se destacar os trabalhos de ZAMPIERI (1989), que estudou o metacaulim proveniente de argilas calcinadas, SOUZA (2003), que aborda a utilização do metacaulim em concretos de alto desempenho, ROCHA e VASCONCELOS (2006), que estudou a microestrutura do metacaulim e CARMO (2006), que fez uma análise técnica e econômica comparativa entre o uso do metacaulim e da sílica ativa em concretos.

Características Físicas e Químicas do Metacaulim

MALHOTRA e MEHTA (1996) relatam que o metacaulim é a única pozolana que não é caracterizada pelo alto teor de sílica, tendo geralmente proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 , em massa.

Segundo ZAMPIERI (1989), as reações pozolânicas entre o metacaulim e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são, em essência, reações de dissolução e formação de novas fases. O metacaulim, principalmente devido ao grande desordenamento atômico oriundo do tratamento térmico, ao entrar em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland, provoca a dissolução do silício e do alumínio na superfície de suas partículas, que, posteriormente, reagem com o excesso de cálcio existente, cristalizando em aluminatos, silicatos e alumino-silicatos de cálcio hidratado.

As reações químicas iniciam normalmente após o fim de pega do cimento e só cessam quando todo o metacaulim da mistura reagir com o CaO livre da matriz, de acordo com a seguinte expressão:



CASH (cristais de genelita) + CSH (portlandita)

Quantidades Disponíveis

Conforme DNPM (2009), a produção mundial de caulim, para as mais diversas aplicações, tais como na indústria do papel, refratários, tintas, louças e cerâmicas, entre outras, no ano de 2007 foi de 37,35 milhões de toneladas, sendo os EUA o país que apresentou a maior produção individual, com 7,3 milhões de toneladas (19,6% do total produzido). O Brasil respondeu em 2007 por 6,8% da produção mundial, com 2,52 milhões de toneladas (DNPM, 2009). De acordo com LOUGHBROUGH (1993) apud CARMO (2006), a região norte, em especial os estados do Pará e Amapá, é responsável por 80% da produção nacional, o que pode onerar a utilização nos grandes centros consumidores do centro-sul do país.

2.4.3 Cinza Volante

As cinzas volantes são o resíduo da queima de carvão mineral em pó, proveniente de fornos que usam carvão mineral moído como combustível. O pó, bastante nocivo ao meio ambiente, é coletado por filtros de mangas ou filtros eletrostáticos (FREITAS JÚNIOR, 2005).

Estas cinzas podem ter composição química e de fases diferentes, pois estão relacionadas exclusivamente com a quantidade de impurezas contidas na queima do carvão na usina de energia (AITCIN, 2000).

De acordo com CAMÕES (2005), a produção mundial de cinzas volantes é estimada em mais de 700 milhões de toneladas/ano, das quais 70% (cerca de 500 milhões de toneladas) são adequadas e podem ser utilizadas como adição em concretos e outros produtos de cimento.

A maior parte das partículas das cinzas volantes são esferas sólidas com 20 µm de diâmetro médio, com superfície específica em torno de 2.000 a 3.000 cm²/g (Blaine), possuindo em sua composição 60% a 85% de vidro, 10% a 30% de compostos cristalinos e até cerca de 10% de carvão não queimado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Do ponto de vista físico, AÏTCIN (2000) descreve a cinza volante como partículas esféricas simples (Figura 2.7A), com uma distribuição granulométrica similar à do cimento Portland e, em alguns casos, podendo conter partículas ocas (cenosferas) e partículas angulosas (Figura 2.7B).

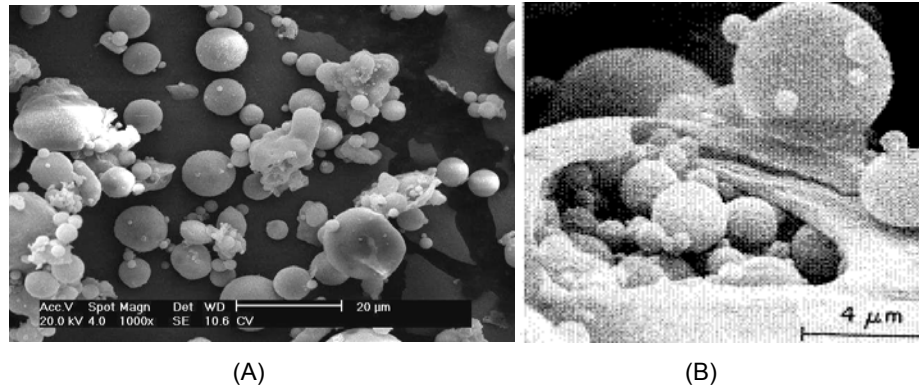


FIGURA 2.7 - MICROGRAFIA DE UMA AMOSTRA DE CINZA VOLANTE (A) - PARTICULAS VÍTREAS ESFÉRICAS; (B) - PLEOSFERA COM PARTICULAS VÍTREAS NO SEU INTERIOR
Fonte: DAFICO (2001) e MEHTA e MONTEIRO (2008)

Reatividade das Cinzas Volantes

O grau de reatividade de cada cinza volante, que tem como efeito à velocidade de ganho da resistência mecânica, além de sua composição química, depende também da sua granulometria, características da superfície e morfologia dos grãos. As características geométricas dos grãos também influem na trabalhabilidade do concreto. O ACI 234-R (1996) apud FREITAS JÚNIOR (2005) salienta que variações nas propriedades físicas ou químicas destas adições podem causar variações apreciáveis no produto final, portanto é extremamente importante que estas sejam bem testadas e que tenham sua uniformidade assegurada, antes do seu uso.

Características dos concretos com cinzas volantes

MEHTA e MONTEIRO (2008) apresentam as seguintes características de concretos contendo adição de cinzas volantes:

- As cinzas volantes são menos reativas quando comparadas com a sílica ativa, mas têm efeito sobre o concreto no estado plástico por favorecer a

trabalhabilidade devido a retardar o início de pega do cimento Portland com redução da quantidade das reações de hidratação enquanto o concreto está fresco;

- Retardamento da velocidade do ganho de resistência mecânica nas primeiras idades (até os 28 dias), porém, posteriormente, a resistência alcançada se iguala e até ultrapassa a do clínquer hidratado;
- Redução do calor de hidratação devido a sua melhor distribuição ao longo do tempo, comparando ao calor liberado pela hidratação do clínquer;
- Minimização da permeabilidade do concreto devido a fatores tais como o efeito das reações pozolânicas fixarem o Ca(OH)_2 , minimizando sua solubilidade, minimizando a retração e o aparecimento de microfissuras por contração térmica;
- Diminuição da possibilidade de ocorrência das reações álcali-agregado. A sílica das cinzas volantes reage e fixa os álcalis antes destes reagirem com a fração silicosa dos agregados.

Teores de adição de cinzas volantes

Segundo FREITAS JÚNIOR (2005) os teores ideais de adição de cinzas volantes estão entre 15% e 25% da massa de cimento, sendo que no Brasil a maior fração do uso destas adições é na composição dos cimentos Portland tipos CP II Z , no qual a norma NBR 11.578 (1991) permite a adição de 6% a 14% e, CP IV, no qual a norma NBR 5.736 (1991) permite a adição de 15% a 50%.

2.4.4 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

O arroz é um dos mais importantes alimentos do mundo, seu consumo equivale a 1/5 do total de grãos demandados pela população. Isto se deve, segundo POUHEY (2005) ao seu alto valor nutritivo e baixo custo.

O cultivo de arroz ocupa o 2º lugar em área plantada no mundo, só perdendo para o trigo. O maior produtor do mundo é a China, seguido pela Índia, Indonésia, Bangladesh, Vietnã e outros. O Brasil ocupa o 10º lugar, com uma produção de cerca de 2% da produção mundial (POUEY, 2005).

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992 apud SANTOS, 1997). Quando queimada a lignina e a celulose podem ser removidas, resultando numa estrutura celular porosa.

Conforme POUEY (2005) a cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo agro-industrial decorrente do processo de queima da casca de arroz, sendo largamente encontrada em regiões onde este cereal é beneficiado. Após as primeiras operações de beneficiamento do arroz surge a casca, que é um subproduto do processo. Devido a seu alto poder calorífico (3.000 kcal/kg), a casca é amplamente empregada no parque industrial como fonte de energia, tanto na própria indústria de beneficiamento para secagem e parboilização dos grãos. Isto gera grande quantidade de cinzas, pois após a queima completa, cerca de 20% da casca de arroz é convertida em cinzas, as quais ainda são consideradas um resíduo agro-industrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartadas ou lançadas em aterros, rios, etc., gerando muitos problemas ambientais (Figura 2.8).

A vantagem do uso da CCA é que a fonte agrícola é farta. Dos 12,1 milhões de toneladas de arroz que o país produz por ano (IBGE, 2009), a casca corresponde a 20% desta massa (2,4 milhões de toneladas), que são rejeitadas, criando um grave problema ambiental, principalmente nas regiões onde o cultivo de arroz se faz em larga escala. Este resíduo agrícola poderia se converter em 480 mil toneladas de sílica, o suficiente para suprir o mercado de concretos estruturais e outros. Desta forma, uma vez que esta tecnologia fosse aplicada integralmente, poder-se-ia resolver um grave problema ambiental e gerar uma fonte de renda adicional para os produtores de arroz.



FIGURA 2.8 - LANÇAMENTO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NA SANGA DAS CHARQUEADAS, MUNICÍPIO DE TAPES (RS)

Fonte: Júlio Wandam (2007)

De acordo com MALHOTRA (1993) citado por WEBER (2001), as cinzas produzidas por combustão sem controle são normalmente cristalinas e de baixo valor pozolânico. A combustão controlada em temperaturas entre 500°C a 700°C produz cinzas altamente pozolânicas.

POUEY (2005) conclui que as CCA produzidas em temperaturas entre 400°C e 600°C não apresentaram alterações em suas características mineralógicas, cujo aspecto positivo é não tornar cristalinas as partículas amorfas.

Além do processo térmico a finura da cinza também apresenta grande influência sobre a sua atividade pozolânica, pois as mais importantes características físicas da cinza estão relacionadas ao seu grau de moagem (DAL MOLIN et al., 1997).

O efetivo emprego da CCA na construção civil encontra restrições por motivos tais como sua coloração escura e a falta de uniformidade apresentada em termos de características mineralógicas. A cor escura não é um problema de ordem técnica, mas estética e que pode ser contornada mediante tratamentos químicos, tal como banho com ácido clorídrico (HCl), que permite o clareamento das cinzas até a cor branca (DAFICO e PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2002). Já a composição mineralógica está associada à atividade pozolânica, e a falta de uniformidade do material disponível implica na incerteza do grau de reatividade.

A viabilidade técnica de aplicação da CCA em diversas áreas da indústria e da engenharia tem sido comprovada por inúmeros trabalhos experimentais como os apresentados por DAFICO (2001), SANTOS (1997), WEBER (2001), POUHEY (2005), entre outros.

Características Químicas e Físicas das CCA

O componente predominante da cinza da casca de arroz é a sílica, com teores entre 94% a 96% e é considerada como ligeiramente impura, em função principalmente do processo de queima em fornalhas de leito fluidizado, que acaba por produzir cinzas com elevados teores de carbono residual (WEBER, 2001).

Independente dos parâmetros empregados no processo de combustão, a composição química da CCA sempre apresenta elevados teores de SiO_2 , variando de 72,1% a 94,7%, conforme estudos de SILVEIRA (1996). Porém, conforme aquele autor, os baixos teores de SiO_2 indicam que as cinzas foram mal queimadas e apresentam uma grande quantidade de carbono residual.

As características físicas usualmente determinadas para as CCA são: massa específica, superfície específica (Blaine), diâmetro das partículas e distribuição granulométrica.

AGOPYAN (1991) obteve para CCA provenientes de São Paulo, superfície específica variando entre $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ e $18.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ e massas específicas variando entre $1,88 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $2,11 \text{ g}/\text{cm}^3$.

O tamanho máximo das partículas de CCA para sua utilização como adição mineral deve ser menor que $10 \mu\text{m}$, conforme MALHOTRA e MEHTA (1996).

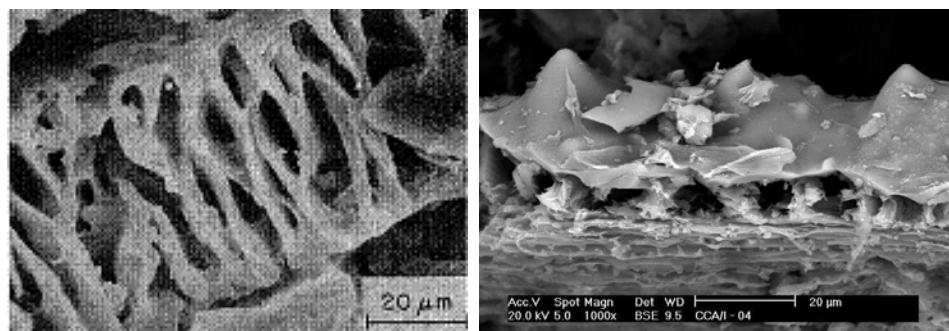


FIGURA 2.9 - MICROGRAFIA DE DUAS AMOSTRAS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ
Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008) e DAFICO (2001)

2.4.5 Resíduo de Cerâmica Calcinada

A utilização de argilas ativadas termicamente (argilas calcinadas) em argamassas e concretos tem recebido considerável atenção nos últimos anos, devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que esses materiais podem promover.

Uma possibilidade de obtenção de argila calcinada é a partir de resíduos de indústrias que utilizam argila como matéria-prima, como ocorre na indústria cerâmica, que normalmente utilizam argilas ilíticas, que passam por um processo de queima e sinterização que pode chegar a uma temperatura de 950°C (GONÇALVES et al., 2006).

Características do Resíduo de Cerâmica Calcinada

Quanto à estrutura interna das argilas, CARMO (2006) cita o trabalho de GRIM (1962), que apresenta a estrutura dos argilo-minerais constituídas por unidades lamelares, sendo cada unidade formada por uma folha tetraédrica de silicato (SiO_4) e uma folha octaédrica de $\text{Al}(\text{OH})_3$, cujas unidades estão ligadas entre si pelos átomos de oxigênio, que têm em comum. Esta estrutura, quando sujeita ao tratamento térmico, com temperaturas entre 400°C e 550°C tem seu arranjo estrutural destruído, pela retirada dos íons hidroxila. O material formado é denominado metacaulinita, apresentando uma estrutura amorfa. Este tratamento térmico é essencial para o desenvolvimento da atividade pozolânica por parte das argilas.

As argilas mais utilizadas para a produção de pozolanas são as caulinitas, que apresentam maior atividade pozolânica, porém as montmorilonitas e as ilitas podem também ser utilizadas com sucesso (GONÇALVES et al, 2006).

Na Tabela 2.7 são apresentadas às características químicas típicas do resíduo de cerâmica calcinada.

TABELA 2.7 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA

Constituintes	Teor
SiO ₂	63,89%
Al ₂ O ₃	25,49%
Fe ₂ O ₃	7,73%
CaO	0,29%
MgO	0,04%
K ₂ O	0,95%
NaO ₂	-
TiO ₂	-

Fonte: GONÇALVES et al. (2006)

Fonte de Resíduos de Cerâmica Calcificada

De acordo com DIAS (2004), a indústria da cerâmica vermelha compreende os materiais empregados na construção civil, tais como tijolos, blocos, telhas, tubos cerâmicos, manilhas e argila expandida. Conforme aquele autor, o setor de cerâmica vermelha conta com cerca de 11 mil empresas no Brasil, em sua maioria de pequeno porte e o índice de perdas nesse setor pode variar de 3% a 30%.

Conforme GONÇALVES et al. (2006) este índice de perdas é bastante discutido, pois depende do nível tecnológico de cada indústria em cada região, do tipo de matéria-prima utilizada, da qualidade e escolaridade da mão-de-obra, ente outros itens. Aquele autor admite um nível de perdas médio de 10%, o que é confirmado por RUY (2004), que pesquisou a qualidade dos materiais cerâmicos produzidos na região metropolitana de Curitiba.

Ao inferir este percentual de perdas, de 10% sobre a produção nacional de cerâmica vermelha, que de acordo com os últimos dados da ABCERAM (2008), que são de 65 milhões de toneladas, obter-se-á uma produção de resíduo de cerâmica calcificada de 6,5 milhões de toneladas, volume significativo e que ocasiona problemas ambientais em função da deposição irregular.

Outra fonte importante de resíduo de cerâmica calcinada são os resíduos sólidos urbanos. Estima-se que 40% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos têm origem no processo construtivo, dos quais 50% são dispostos irregularmente sem qualquer critério de seleção. Em massa, o montante de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados no Brasil é de aproximadamente $68,5 \times 10^6$ toneladas/ano (ÂNGULO et al., 2001). A participação de materiais cerâmicos na composição do RCD atinge até 30% do total de resíduos (PINTO, 1997; ÂNGULO et al. 2001), o que resulta em mais de 20,5 milhões de toneladas/ano.

Teores de Resíduo de Cerâmica Calcinada (RCC) Utilizáveis

GONÇALVES et al. (2006) estudando a hidratação de pastas de cimento Portland CP II F (cimento Portland composto com adição de filler) , com resíduo de cerâmica calcinada, através de análise térmica, concluíram que um percentual de substituição do cimento por 10% de resíduo de cerâmica apresentou melhor comportamento em relação a maior quantidade de hidratos formados, em substituição ao Ca(OH)_2 do cimento. ANJOS et al. (2003), utilizaram teores entre 20% a 40% de resíduo de cerâmica em compósitos reforçados com fibras de bambu e concluíram que o teor de 20% apresentou melhores resultados.

2.4.6 Escória de Alto-Forno

A escória de alto-forno é o subproduto da manufatura do ferro gusa num alto forno. Todas as impurezas contidas no minério de ferro e no coque passam para a escória de alto-forno. Como todas essas impurezas poderiam resultar numa mistura com ponto de fusão muito alto, agentes fundentes são adicionados à carga do alto-forno de modo que a composição química resultante das impurezas fique dentro de uma região muito bem definida do diagrama de fases $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$, correspondendo a uma das duas áreas de temperatura de fusão mais baixas dentro desse diagrama. Assim, do ponto de vista químico, a escória tem uma composição muito constante, pois

qualquer alteração traduz-se em demandas significativas de energia e custos finais (AÏTCIN, 2000).

O minério de ferro é fundido em alto-forno em temperatura elevada (1500°C) juntamente com carvão (coque) e fundente (calcário). O carvão atua como combustível e como redutor, pois se associa ao oxigênio desprendido do minério resultando o ferro líquido, que é chamado ferro gusa ou ferro de primeira fusão. O calcário e impurezas presentes nas matérias-primas como a sílica (SiO_2), entre outros óxidos, formam a escória básica ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$) que, por meio de resfriamento brusco granula-se, tornando-se adequada à fabricação do cimento. (OLIVEIRA, 2000).

O ferro gusa é a matéria-prima para a produção do aço e conforme ISAIA (2005) a produção brasileira em 2005 foi de cerca de 35 milhões de toneladas. Destas operações, conforme OLIVEIRA (2000), para a produção de uma tonelada de ferro gusa, resulta na obtenção de cerca de 300 kg de escória granulada de alto-forno, o que pode representar, com base nestes dados, na produção de 10,5 milhões de toneladas de escória de alto-forno para aquele ano.

A escória fundida apresenta massa específica muito baixa, cerca de $2,80 \text{ g/cm}^3$, quando comparada ao ferro gusa, que está acima de $7,0 \text{ g/cm}^3$ o que faz a escória derretida flutuar sobre o ferro gusa em estado líquido, o que permite sua separação e drenagem.

A escória pode ser resfriada de duas maneiras diferentes, com reflexos sobre sua composição e reatividade, que são:

a- *Resfriamento lento* - a escória se cristaliza principalmente na forma de melilita, uma solução sólida de ackermanita e gelenita. Quando resfriada dessa forma, a escória praticamente não tem valor hidráulico e não pode ser utilizada como material cimentício alternativo, mesmo que finalmente moída, podendo, porém, ser utilizada como agregado na produção de concretos, asfaltos, bases rodoviárias, etc. (AÏTCIN, 2000).

b- *Resfriamento rápido* - desta forma a escória se cristaliza numa forma vítrea e pode, então, desenvolver propriedades cimentícias, se adequadamente moída e ativada. O resfriamento rápido pode ser realizado com jatos de água, como apresentado na Figura 2.10.



FIGURA 2.10 - RESFRIAMENTO RÁPIDO E ESTOQUE DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO
Fonte: Arcelor Mittal Brasil (2009)

Características das Escórias de Alto-Forno

BATTAGIN e ESPER (1988) estudaram a composição química das escórias produzidas pelas cinco maiores siderúrgicas brasileiras, transcritas de forma resumida na Tabela 2.8. Nesta mesma tabela, apresentam-se as características médias das escórias francesas e norte-americanas, conforme AÏTCIN (2000).

Ativação da Escória para Uso como Aglomerante

A reatividade da escória está associada a sua obtenção no estado vítreo. Porém, conforme OLIVEIRA (2000), esta condição é essencial, mas não suficiente, pois é necessário que a escória seja, também, solúvel, isto é, atacável pela água, para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Esta solubilidade é favorecida pelo teor de CaO presente na escória. Conforme aquela autora, essa reação é lenta, mas em meio fortemente alcalino ou através da reação de sulfatos torna-se mais acelerada.

TABELA 2.8 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DAS ESCÓRIAS FRANCESA, NORTE-AMERICANA E BRASILEIRA

Constituinte	Escória Francesa	Escória Norte Americana	Escória Brasileira
SiO ₂	29% a 36%	33% a 42%	30% a 35%
Al ₂ O ₃	13% a 19%	10% a 16%	11% a 18%
CaO	40% a 43%	36% a 45%	40% a 45%
Fe ₂ O ₃	< 4,0%	0,3% a 20%	0% a 2%
MgO	< 6,0%	3 % a 12%	2,5% a 9%
S ⁻	< 1,5%	-	0,5% a 1,5%

Fonte: BATTAGIN e ESPER (1988) e AİTCIN (2000)

Teores de Utilização das Escórias

Atualmente a maior parte da escória de alto-forno brasileira é usada como matéria prima na indústria cimenteira, para a produção dos cimentos Portland tipo CP II E (cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno), que pode conter até 34%, em massa, de escória de alto-forno, conforme a NBR 11.578 (1991) e CP III (cimento Portland de alto-forno), que pode conter até 70%, em massa, de escória, conforme a NBR 5735 (1991).

2.4.7 Utilização de Materiais Cimentícios Alternativos em Compósitos Cimento-Madeira

O cimento é geralmente o componente mais caro de um compósito cimento-madeira, especialmente diante das quantidades requeridas. Portanto seria necessário, visando reduzir o custo, procurar materiais substituintes ao cimento, mais baratos, mas que mantenham a eficiência do cimento (MOSLEMI, 1989).

Por outro lado, o mecanismo de degradação das fibras vegetais em meio alcalino decorre da reação da água do poro com a lignina e a hemicelulose da lamela média das fibras, enfraquecendo a ligação individual das células (SOROUSHIAN e MARIKUNTE, 1992 apud NITA e JOHN, 2007).

JOHN e AGOPYAN (1993) indicam que o emprego de materiais cimentícios alternativos podem colaborar para um aumento da durabilidade de compósitos com fibras vegetais. Com o consumo de parte do Ca(OH)_2 que está concentrado na zona de transição ocorre a melhora da aderência entre fibra e matriz e a redução do pH da solução com a combinação dos íons Ca^{2+} presentes.

SIMATUPANG et al., (1989), cita o uso de adição de sílica ativa e de cinza de casca de arroz, como forma de melhorar a compatibilidade entre o cimento Portland e a madeira.

LANGE et al., (1989) testaram substituições parciais do cimento Portland alemão PZ 35F por sílica ativa, escória de alto-forno e cinza de casca de arroz. Neste estudo, os autores testaram diversos tipos de madeira, sem qualquer pré-tratamento e, como aditivo acelerador, utilizaram o CaCl_2 . O material produzido (placas de 44 cm x 44 cm) foi prensado por 7 horas à temperatura de 40°C, e os resultados obtidos foram:

- A substituição parcial do cimento por escória de alto-forno foi efetuada em teores de 10% a 80%, com variações de 10%, sendo que a maior resistência foi determinada para substituição parcial do cimento por 30% de escória, enquanto que para teores acima de 50%, verificaram-se quedas substanciais na resistência do compósito;
- Quanto à sílica ativa, os teores de substituição testados também variaram entre 10% a 80%, com mesmas variações de 10%, sendo determinado que 30% de substituição se mostrou como teor mais viável. A sílica ativa se mostrou como o material mais viável para prevenir a inibição do cimento por certos açúcares da madeira, principalmente a arabinogalactose;
- A substituição parcial do cimento por pequenas porções de cinza de casca de arroz promoveu um aumento da qualidade do material produzido, porém o autor não cita qual o teor ótimo para esta substituição, limitando-se a dizer que os valores ficam bem abaixo dos determinados para a substituição parcial por sílica ativa.

Além da influência em relação à resistência do compósito produzido, LANGE et al., (1989) cita ainda, os seguintes benefícios trazidos pelas substituições parciais do cimento:

- Redução da alcalinidade da matriz cimentícia;
- Alteração da porosidade do material;
- A matriz cimentícia se apresentou menos sensível aos efeitos inibitórios da madeira;
- Aumento da resistência diante do uso de madeiras menos compatíveis com o cimento Portland;
- Aumento da durabilidade do material, em função da redução do pH da matriz;
- Melhores características diante da umidade;
- Menor retração do material.

2.5 ADITIVOS

A norma Européia EN 934 (2001) citada por ISAIA (2005), define aditivos como materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior a 5% sobre a massa de cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido.

ISAIA (2005) apresenta a classificação dos aditivos de acordo com a Norma Européia EN 934 e apresenta a normalização brasileira (ABNT) e norte-americana (ASTM) correspondente para cada tipo de aditivo.

- Redutores de água ou Plastificantes (ABNT EB 1.763 - Tipo P e ASTM C494 -Tipo A);
- Redutores de água de Alto Desempenho ou Superplastificantes (ABNT EB 1.763 -Tipo SP e ASTM C494 - Tipo F);
- Incorporadores de Ar (ABNT 1.763 - Tipo IAR e ASTM C260);
- Retardadores (ABNT EB 1.763 - Tipo R e ASTM C494 - Tipo 13);
- Aceleradores (ABNT EB 1.763 - Tipo A e ASTM C494 - Tipo C);

- Retentores de Água;
- Impermeabilizantes;
- Retardadores/ Retentores de Água/ Plastificantes (ABNT EB 1.763 - Tipo PR e ASTM C494 - Tipo D);
- Redutores de Água de Alto Desempenho/ Superplastificantes e Retardadores (ABNT EB 1.763 - Tipo SPR e ASTM C494 - Tipo G);
- Redutores de Água/ Plastificantes e Aceleradores (ABNT EB 1.763 - Tipo PA e ASTM C494 - Tipo E).

2.5.1 Aditivos Superplastificantes

Estes aditivos são também conhecidos como aditivos superfluidificantes ou aditivos redutores de água de alta eficiência, porque são capazes de reduzir de três a quatro vezes a água de amassamento de uma determinada mistura de concreto, comparado aos aditivos redutores de água normais ou plastificantes (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Conforme KREIJGER (1980 apud MEHTA e MONTEIRO, 2008), a estrutura típica dos aditivos redutores de água é de hidrocarbonetos que contém grupos polares aniônicos de cadeia molecular longa e de alta massa molecular (20.000 a 30.000), com um grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos (Figura 2.11A); quando um superplastificante com vários grupos polares aniônicos na cadeia de hidrocarboneto é adicionado ao sistema cimento-água, a cadeia polar é adsorvida na superfície da partícula de cimento. Assim, não apenas a tensão superficial da água é reduzida, mas também as partículas de cimento se tornam hidrofílicas (Figura 2.11B). A representação esquemática da formação de flóculos pelas partículas de cimento antes da adição do superplastificante e a dispersão dos flóculos após a adição pode ser visualizada na Figura 2.11C.

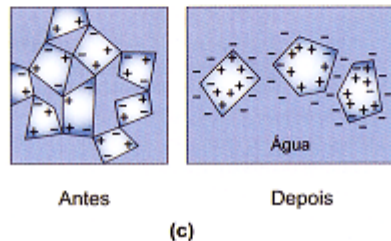
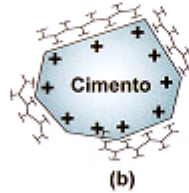
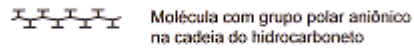
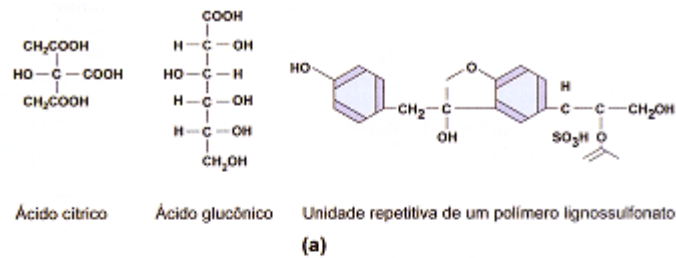


FIGURA 2.11 - ESTRUTURAS E MECANISMOS TÍPICOS DA AÇÃO DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES
 Fonte: KREIJGER (1980) apud MEHTA E MONTEIRO (2008)

De acordo com ISAIA (2005), os superplastificantes comerciais podem ser geralmente classificados, de acordo com a natureza química de sua base, que são:

- Lignosulfonatos;
- Condensados de Naftaleno Sulfonado - BNS (*Beta Naphtalene Sulfonate*);
- Condensados de Sais de Melamina - SMF (*Sodium Melamine Formaldehyde Condensate*);
- Poliacrilatos - PAC/PC (*Polyacrylate*);
- Éteres Policarboxílicos - PCE (*Policarboxilate Ether*).

AÏTCIN (2000) indica que a dosagem usualmente empregada de aditivo superplastificante pode se situar entre 1% a 4% de solução de aditivo total (sólidos mais veículo) em relação à massa de cimento.

2.5.2 Aditivos Aceleradores de Pega

Aditivos aceleradores são úteis para modificar as propriedades do concreto de cimento Portland, propiciando redução do tempo de cura, aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material, entre outras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os aceleradores de pega são compostos orgânicos ou inorgânicos solúveis em água. Dentre os compostos inorgânicos encontram-se os sais de elementos alcalinos ou alcalino-terrosos à base de cloretos, fluoretos, carbonatos, silicatos, fluorsilicatos, aluminatos, boratos, nitratos, nitritos, tiosulfatos, etc. Dentre os compostos inorgânicos encontram-se, também, os hidróxidos de sódio, potássio ou amônio e, entre os compostos orgânicos, destaca-se a trietanolamina (ISAIA, 2005).

Para MEHTA e MONTEIRO (2008) o aditivo acelerador de pega mais conhecido e amplamente utilizado é o cloreto de cálcio (CaCl_2).

2.5.3 Utilização de Aditivos em Compósitos Cimento-Madeira

ZHENG TIAN e MOSLEMI (1985) citados por SEMPLE e EVANS (2000), estudaram o efeito de 30 substâncias sobre a temperatura e o tempo de hidratação do compósito madeira *larch-cement-water*. Eles encontraram que certos aditivos exerceram efeitos negativos sobre a hidratação e, dentre aqueles que apresentaram os melhores resultados estava incluído o cloreto de cálcio.

Outros pesquisadores também avaliaram de forma positiva o uso de Cloreto de Cálcio para reduzir os efeitos inibidores dos extrativos da madeira sobre a hidratação do cimento Portland, entre esses se podem citar KAYAHARA et al. (1979); LEE e SHORT (1989); SORIANO et al. (1998) indicados no trabalho de SEMPLE e EVANS (2000), LATORRACA (2000); MA et al. (2000); SOROUSHIAM et al. (2003) citado por MATOSKI (2005), entre outros.

MA et al. (2000), pesquisaram o uso de Cloreto de Magnésio (MgCl_2) Carbonato de Sódio (Na_2CO_3), Carbonato de Sódio e Hidrogênio (NaHCO_3), Silicato de

Sódio (Na_2SiO_3) e Cloreto de Cálcio (CaCl_2) em compósitos produzidos com madeira e outros materiais lignocelulósicos.

SEMPLE e EVANS (2000) testaram o uso de 137 aditivos químicos na produção de compósitos com cimento e madeira *Acácia mangium*, sendo a maioria composta por cloretos e nitratos, sulfatos, óxidos, acetatos, carbonatos, fluoretos, etc., incluindo SnCl_4 , AlCl_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ e FeCl_3 . Os autores notaram que todos estes aditivos aceleraram a hidratação do cimento e foram mais efetivos que o CaCl_2 , em função dos cátions Sn^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Ni^{2+} e Sr^{2+} , que atuaram significativamente sobre as substâncias fenólicas presentes no cerne da madeira. Neste estudo, em função da essência florestal que foi utilizada na produção dos compósitos, o CaCl_2 ficou em 11ª colocação.

Na França e no México o sulfato de alumínio e o silicato de sódio são utilizados em nível industrial, conforme BIRAULT (1989) e SOLÓRZANO (1989) apud LATORRACA (2000).

2.6 BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO SIMPLES PARA ALVENARIA

De acordo com sua finalidade e comportamento esperado, o concreto pode possuir características próprias, podendo ser classificados em dois grupos distintos, denominados concretos plásticos e concretos secos.

Os concretos plásticos são assim denominados por formarem depois de misturados e homogeneizados, uma massa facilmente adensável. Esta característica permite que estes concretos sejam transportados e lançados até os locais que serão aplicados. Na produção de elementos através de vibro-compressão utilizam-se os concretos secos.

Concretos Secos

O concreto seco é utilizado na produção de uma série de artefatos de concreto, incluindo os blocos, é assim chamado porque sua mistura deve possuir um

teor de umidade (relação água/cimento) até o limite em que os blocos comecem a perder a coesão e aderir às paredes dos moldes. Isto faz com que estes concretos possuam consistência, medida pelo abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) igual à zero, e há a necessidade de que a retirada do ar aprisionado seja feita por máquinas que conferem compacidade a mistura (DANTAS FILHO, 2004).

Conforme FERREIRA JÚNIOR (1985) o adensamento do concreto pode ser feito por equipamentos hidráulicos, pneumáticos ou manuais e segundo FRASSON JÚNIOR (2000) a umidade de moldagem das misturas, caracterizada pela Lei de Lyse¹, deve se situar entre 6% a 8%, de forma a possibilitar uma moldagem sem excesso ou falta de água.

TANGO (1994) lembra algumas precauções devem ser verificadas ao tratar com concretos secos, pois a consistência desse tipo de concreto se assemelha ao da terra úmida, diferindo daquele normalmente utilizado em estruturas, de consistência plástica. Neste último, a pasta ocupa praticamente todos os espaços vazios intergranulares deixados pelos agregados, enquanto que no concreto para blocos existe a presença significativa de ar aprisionado em seu interior. Dessa forma, o concreto para blocos não segue rigorosamente a Lei de Abrams², consagrada para os concretos plásticos, em que a resistência é aumentada com menores proporções possíveis de água.

Conforme TANGO (1994) existe uma umidade ótima na qual se consegue obter misturas com melhor compacidade, muito semelhante ao que ocorre na compactação de solos, entretanto, existe uma quantidade limite de umidade, acima da qual não é possível a produção das peças, por dificuldade de desforma por aderência aos moldes ou perda do formato adequado após desforma.

Estas diferenças fazem com que os métodos de dosagem sejam também distintos e, o que vale para os concretos plásticos nem sempre pode ser utilizado como regra para os concretos secos.

¹ Lei de Lyse: "A quantidade de água a ser empregada em um concreto com determinado grupo de materiais, para obter-se uma dada trabalhabilidade, é praticamente constante e independe do traço deste concreto". Na prática, para um dado grupo de materiais, existe uma relação água/materiais secos constante para obter-se uma dada trabalhabilidade.

² Lei de Abrams: Lei segundo a qual a resistência do material se relaciona diretamente com a relação água/cimento.

2.6.1 Histórico

A norma brasileira NBR 6.136 (2008) define blocos vazados para alvenaria como sendo elementos que possuem furos prismáticos perpendiculares à face que os contém e cuja seção transversal média útil seja inferior a 75% da seção transversal bruta.

Os blocos de concreto, assim como são conhecidos hoje, surgiram nos Estados Unidos da América, no final do século XIX. Acredita-se que o primeiro bloco de concreto tenha sido moldado em 1882, nos EUA. (PCA, 1988 apud MEDEIROS, 1993).

Na década de 20, Frank Lloyd Wright abriu novas perspectivas para o mercado de blocos de concreto, fabricando pela primeira vez blocos especiais sob encomenda para um determinado projeto (LEFER, 1976 apud MEDEIROS, 1993).

No Brasil existem registros da utilização de blocos de concreto por volta de 1940. Na época foram construídas cerca de 2.400 casas no conjunto habitacional de Realengo, na cidade do Rio de Janeiro (ABCP, 1978).

Outros marcos importantes são a construção em 1974, do conjunto Lapa D, e o conjunto habitacional de Itaquera, da Cohab-SP, ambos em São Paulo, contendo edifícios de até 13 pavimentos, ainda sob supervisão de Green Ferver, consultor norte americano (GRANDI, 2002).

As maiores construções em alvenaria estrutural até o momento são o Hotel Excalibur em Las Vegas (EUA), com quatro torres de 28 pavimentos cada (Figura 2.12A). No Brasil temos o edifício Solar dos Alcântaras em São Paulo (SP), com 24 pavimentos (Figura 2.12B) e na cidade de Curitiba (PR), o edifício Felice Condomínio Club, que com suas duas torres de 18 pavimentos cada, é considerado o maior edifício construído em alvenaria estrutural com blocos de concreto, no sul do país (Figura 2.12C e D).



(A) (B) (C) (D)
 FIGURA 2.12 - EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS COM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO

2.6.2 Diferenciais da alvenaria de blocos de concreto

GRANDI (2002) e ISAIA (2007) demonstram os diferenciais de um sistema construtivo tradicional, com blocos cerâmicos, para outro utilizando blocos de concreto, sendo que este último apresenta as seguintes vantagens em detrimento dos métodos convencionais:

- Redução da utilização de madeira e, conseqüentemente, de carpintaria;
- Redução do custo da obra de até 30%;
- A obra é mais limpa (redução da geração de entulhos);
- Redução do custo de limpeza e retirada de entulhos da obra;
- Facilidade na correção de patologias;
- Maior qualidade sem a necessidade de equipamentos caros;
- Maior velocidade na conclusão da obra;
- Padronização e nivelamentos perfeitos;
- Menor custo para instalações elétricas e hidráulicas, uma vez que não há necessidade de quebrar as paredes para realizar estas instalações;
- Diminuição da necessidade de armaduras de aço e conseqüentemente de mão de obra;
- Aumento da produtividade de pedreiros e de outros profissionais envolvidos no processo;

- A obra, caso utilize blocos para alvenaria estrutural, dispensa o uso de vigas e pilares de concreto armado.

2.6.3 Materiais Empregados na Produção de Blocos de Concreto

Como regra geral, a maioria dos pesquisadores indica que os materiais adequados para a produção de concretos convencionais são também adequados para a produção de blocos de concreto, embora devam ser consideradas as peculiaridades intrínsecas de cada processo (FERREIRA, 1993 apud SOUSA, 2001).

Normalmente os materiais utilizados na produção de blocos de concreto, se resumem em aglomerante, agregados graúdos e miúdos, água e eventualmente aditivos e corantes.

No caso do aglomerante, SOUSA (2001) indica o cimento Portland tipo CP II F (Cimento Portland Composto com Adição de Filer), classe 32, como sendo o ideal para a produção de pré-moldados, enquanto PRUDÊNCIO JÚNIOR (2002) indica o uso do CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), pelas características de conferir resistências mecânicas maiores nas primeiras idades, possibilitando o uso dos blocos mais rapidamente.

Os agregados normalmente utilizados para a produção de blocos pré-fabricados de concreto, são: pedrisco, areia natural ou areia artificial, também denominada pó de pedra, ou a mistura desses materiais, desde que de acordo com as especificações da NBR 7.211(2005), ou agregados leves como escória de alto forno, argila expandida ou outros agregados, que satisfaçam as especificações próprias a cada um desses materiais conforme NBR 6.136 (2008).

A NBR 6.136 (2008) permite o uso de aditivos, desde que não acarretem efeitos prejudiciais ao concreto, devidamente comprovados por ensaios. Conforme MEDEIROS (1993), os aditivos mais utilizados na fabricação de blocos de concreto são os redutores de água, que possibilitam para uma mesma relação água/cimento, um consumo menor de cimento ou redução da quantidade de água sem alteração da trabalhabilidade do concreto.

2.6.4 Produção dos Blocos de Concreto

Dosagem

Dosagem é o estudo realizado para fixar as quantidades dos materiais constituintes, visando obter um concreto e conseqüentemente, os blocos pré-fabricados, com as características desejadas, que conforme FERREIRA JÚNIOR (1985) são:

- Coesão no estado fresco, de forma que possam ser desmoldados e transportados sem que seu formato seja alterado;
- Máxima compacidade, para que a absorção de água seja mínima;
- Resistência compatível com aplicação a que se destina; e,
- Aspecto da superfície, que deve ser lisa em blocos que irão ficar aparentes e áspera quando forem recobertos, evitando assim, a necessidade de aplicação de chapisco.

Os blocos de concreto são materiais de grande interesse, pois além do custo relativamente baixo, apresentam também um baixo teor energético incorporado à sua produção, pois não passam pelo processo de queima, como os blocos cerâmicos para alvenaria (SOUSA, 2001).

Os métodos de dosagem de blocos de concreto mais conhecidos são:

- Método da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP: que se baseia no proporcionamento entre agregados que resultem na maior compacidade possível;
- Método Besser (*Besser Company*): baseado no ajuste de traço pela granulometria final das misturas;
- Método do *American Concrete Institute* - ACI: que se baseia no módulo de finura (MF) da mistura de agregados utilizados, que deve ficar em torno de 3,70.

Porém, segundo MEDEIROS (1994), a maioria dos fabricantes de blocos no Brasil não aplica qualquer método racional na dosagem do concreto. Normalmente

adota-se um método empírico de proporcionamento de materiais baseado em séries de tentativa e erro.

Equipamentos de Produção

Os equipamentos utilizados na produção de blocos de concreto são denominados vibro prensas. Elas recebem esta denominação devido ao mecanismo de funcionamento empregado durante o processo de moldagem dos blocos: vibração associada à prensagem. A primeira função é responsável pelo preenchimento do molde e adensamento da mistura, e a segunda, influencia o adensamento e o acabamento dos blocos (SOUSA, 2001).

MEDEIROS (1993) apresenta a seqüência de funcionamento das vibro-prensas durante a moldagem dos blocos, resumindo às seguintes etapas:

- a- Preenchimento da gaveta alimentadora com a mistura destinada à moldagem dos blocos;
- b- Preenchimento do molde metálico onde os blocos são moldados, fase acompanhada pela vibração do molde;
- c- Compactação dos blocos através de extratores, fase acompanhada por nova vibração do molde, finalizando quando a altura desejada para os blocos é atingida;
- d- Desforma dos blocos logo após o término da operação anterior, fase em que extratores permanecem imóveis, enquanto o molde ascende, permitindo que os blocos permaneçam sobre o *palet* onde foram moldados;
- e- O *palet* com os blocos recém moldados avançam para frente da máquina, enquanto um novo *palet* vazio ocupa seu lugar sobre o molde;
- f- O molde metálico desce então para a sua posição original, enquanto os extratores ascendem, preparando-se para um novo ciclo.

Na Figura 2.13 apresenta-se a seqüência de funcionamento das máquinas vibro-prensas.

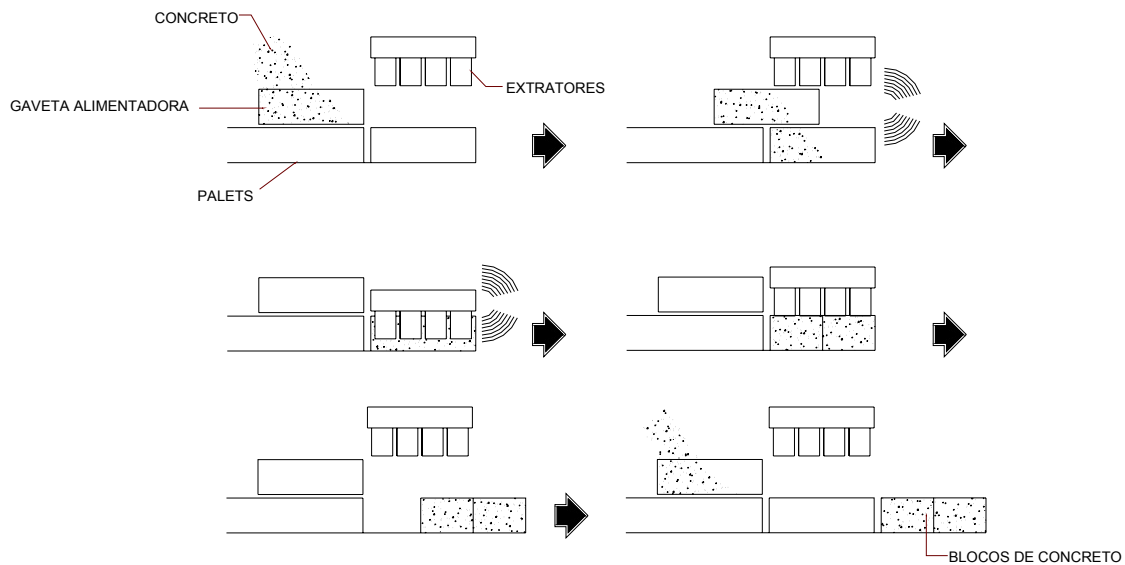


FIGURA 2.13 - SEQÜÊNCIA BÁSICA DE FUNCIONAMENTO DE UMA VIBRO-PRENSA AUTOMÁTICA
 Fonte: MEDEIROS (1993)

O tempo ótimo de vibração será o mínimo necessário para proporcionar aos blocos a máxima compactidade. Esse tempo irá variar conforme a máquina de moldagem e as características do concreto fresco, sendo que o importante é que seja conhecido e rigorosamente controlado, através de cronômetro ou de sistema automático de medição.

Em condições normais de moldagem, MEDEIROS (1993), sugere os seguintes tempos para o ciclo de produção dos blocos, dependendo do tipo e potência do sistema de vibração:

- Tempo de alimentação: 2 a 4 segundos;
- Tempo de vibração: 3 a 5 segundos;
- Tempo de desforma: 1 a 2 segundos

Cura

O processo de cura corresponde a um conjunto de operações que visa proporcionar aos blocos, durante certo tempo, condições de umidade, temperatura e pressão, necessários a uma adequada reação de hidratação do cimento. Qualquer

alteração nessas condições pode refletir diretamente nas características finais dos blocos de concreto (TANGO, 1984).

SOUSA (2001) apresenta três tipos de cura, que geralmente são utilizados na produção de blocos de concreto, que são:

- Cura através de autoclaves;
- Cura natural ou ao ar livre; e,
- Cura em câmara de vapor.

MEHTA e MONTEIRO (2008) consideram sete dias como um período mínimo de cura ao ar livre para concretos contendo cimento Portland comum, sendo desejável, porém, períodos mais longos para concretos contendo cimentos compostos ou com adições minerais, de modo a garantir a contribuição das reações pozolânicas na resistência do material.

2.6.5 Classificação dos Blocos de Concreto

Conforme a norma NBR 6.136 (2008) os blocos de concreto devem atender, quanto ao uso, às seguintes classes:

- Classe A – Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;
- Classe B – Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Classe C – Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo (M10 máximo 1 pavimento, M12,5 máximo 2 pavimentos e M15 e M20 edificações maiores);
- Classe D – Sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

2.6.6 Nomenclatura e Dimensões dos Blocos de Concreto

A nomenclatura e as principais dimensões de um bloco de concreto são apresentadas na Figura 2.14.

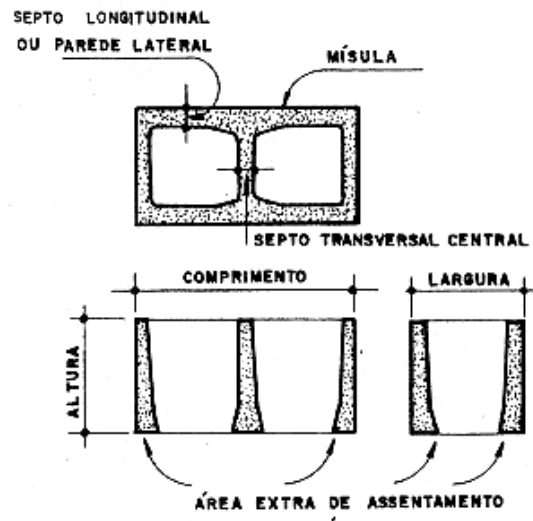


FIGURA 2.14 - NOMENCLATURA DAS PARTES E DIMENSÕES DE UM BLOCO DE CONCRETO
Fonte: MEDEIROS (1993)

Outro aspecto de extrema importância é a coordenação dimensional, ou seja, o tamanho dos blocos deve ser compatível com os vãos estruturais ou com as dimensões das paredes estruturais, tamanho dos caixilhos, entre outros.

As dimensões reais dos blocos vazados de concreto, modulares e sub-modulares devem corresponder às dimensões constantes da Tabela 2.9.

TABELA 2.9 - BLOCOS DE CONCRETO: DIMENSÕES REAIS

Família de Blocos											
	Nominal	20		15		12,5			10		7,5
Designação	Módulo	M-20		M-15		M-12,5			M-10		M-7,5
	Amarração	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2
	Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30	7,5x40
Largura (mm)		190	140	140	115	115	115	90	90	90	65
Altura (mm)		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Comprimento (mm)	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	190	290	390
	Meio	190	190	140	190	115	-	190	90	-	190
	2/3	-	-	-	-	-	240	-	-	190	-
	1/3	-	-	-	-	-	115	-	-	90	-
	Amarração L	-	340	-	-	-	-	-	-	-	-
Amarração T	-	540	440	-	365	365	-	290	290	-	
Compensador A	90	90	-	90	-	-	-	90	-	-	90
Compensador B	40	40	-	40	-	-	-	40	-	-	40

Fonte: NBR-6.136(2008)

As tolerâncias permitidas pela NBR 6.136 (2008) nas dimensões dos blocos indicados na Tabela 2.11 são de $\pm 2,0$ mm para a largura e $\pm 3,0$ mm para a altura e o comprimento. A espessura mínima de qualquer parede de bloco deve atender a

Tabela 2.10. A tolerância permitida nas dimensões das paredes é de até - 1,0 mm para cada valor individual.

TABELA 2.10 - BLOCOS DE CONCRETO: ESPESSURA MÍNIMA DAS PAREDES DOS BLOCOS

Classe	Designação	Paredes		
		Longitudinais ¹ (mm)	Paredes ¹ (mm)	EspeSSura Equivalente ² (mm/m)
A	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
B	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
C	M-10	18	18	135
	M-12,5	18	18	135
	M-15	18	18	135
	M-20	18	18	135
D	M-7,5	15	15	113
	M-10	15	15	113
	M-12,5	15	15	113
	M-15	15	15	113
	M-20	15	15	113

¹ Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.

² Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

Fonte: NBR 6.136 (2008)

2.6.7 Requisitos Físicos e Mecânicos

Resistência à Compressão

A resistência à compressão da unidade é o principal parâmetro de projeto da parede de alvenaria. Esta propriedade torna-se, por este motivo a principal variável de controle do processo produtivo do bloco de concreto (MEDEIROS, 1993).

Os valores mínimos para resistência à compressão dos blocos de concreto, fixados pela norma NBR 6.136 (2008), em função das classes de uso, encontram-se apresentados na Tabela 2.11.

TABELA 2.11 - VALORES MÍNIMOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA

Classe	Resistência Característica f_{bk} (MPa)	Absorção Média		Retração por Secagem ¹ (%)
		Agregado Normal (%)	Agregado Leve (%)	
A	≥ 6,0		≤ 13,0	
B	≥ 4,0		(média)	
C	≥ 3,0	≤ 10,0	≤ 16,0	≤ 0,065
D	≥ 2,0		(individual)	

¹ Ensaio Facultativo

Fonte: NBR 6.136 (2008)

Absorção de Água e Índice de Vazios

A capacidade de absorção de água pelo bloco é uma propriedade relacionada à porosidade do material e influencia diretamente a aderência do bloco com a argamassa (TANGO, 1984).

Os componentes de alvenaria devem apresentar um valor mínimo de absorção de água, abaixo do qual não haverá penetração adequada de nata de aglomerante em seus poros, e um valor máximo, para que não ocorra intensa retirada de água da argamassa, prejudicando a hidratação do aglomerante. Para mesmas condições de assentamento, quanto maior a área de contato argamassa/bloco, maior a aderência, a penetração de argamassa nas ranhuras e furos dos blocos (THOMAZ e HELENE, 2000).

A NBR 6.136 (2008) especifica em 10% o limite para a absorção média de água para blocos de concreto produzidos com agregados convencionais e 13% para o valor médio e 16% como limite para valor individual, caso os blocos sejam produzidos com agregado leve.

Estabilidade Dimensional

Frente às oscilações de temperatura, os materiais constituintes dos blocos apresentarão diferentes variações dimensionais, podendo induzir destacamentos entre alvenaria e estrutura (paredes de vedação) ou entre paredes ligadas com juntas a prumo (THOMAZ e HELENE, 2000).

A norma brasileira NBR 6.136 (2008), que especifica os blocos de vazados de concreto para alvenaria, estabelece que a retração por secagem dos blocos, realizados conforme a NBR 12.118 (2008), não deve ultrapassar o valor de 0,065%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No decorrer deste, serão apresentadas as várias etapas do programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, bem como os materiais e métodos utilizados.

Como evidenciado no decorrer das diversas fases do estudo, na determinação de características das matérias primas e/ou dos materiais produzidos, foram aplicados métodos de ensaio baseados em normas Brasileiras. Na falta destas, foram utilizadas normas internacionais ou adaptações, de acordo com revisão bibliográfica referente ao tema.

Em função das características da pesquisa, o programa experimental foi dividido em 6 Fases, abaixo descritas:

1ª Fase - Estudo Preliminar – Caracterização dos Materiais e Análise da interação entre o Cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp.*

2ª Fase - Análise da substituição parcial do cimento Portland do compósito por seis materiais cimentícios alternativos (sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto forno, resíduo de cerâmica calcinada e cinza de casca de arroz);

3ª Fase - Estudo da dosagem e produção de blocos pré-moldados de concreto em fábrica e definição do traço de referência;

4ª Fase - Desenvolvimento de sistema alternativo de moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de concreto por vibro-compressão em laboratório;

5ª Fase - Estudo de dosagens com substituições do agregado miúdo convencional do traço de concreto para produção de blocos, pelo resíduo de *Pinus spp.*;

6ª Fase - Produção dos blocos protótipos em fábrica e análise de desempenho;

3.1 MATERIAIS

Resíduo Vegetal

O resíduo de madeira *Pinus spp*, utilizada neste estudo é proveniente da empresa *Madeireira Juruqui*, situada à estrada *Justo Manfron, 07*, município de *Almirante Tamandaré (PR)*.

Aglomerante

Como aglomerante, em toda a pesquisa, foi utilizado o Cimento Portland, tipo CPV ARI RS, (Alta Resistência Inicial – Resistente a Sulfatos, NBR 5.733 (1991) – *Cimento Portland de alta resistência inicial*), por ser o tipo de cimento mais utilizado para a produção de artefatos de concreto na região. Este material foi adquirido da empresa *Buschle e Lepper SA, Rod. BR 116, 14.951, Curitiba (PR)*.

Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, se apresentam a composição normalizada do cimento CPV ARI RS e as características químicas e físicas, informadas pelo fabricante.

TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO DO CIMENTO CPV-ARI-RS.

Composição (% em massa)					
Tipo de Cimento	Sigla	Clinker +CaSO ₄	Material Carbonático	Adição Mineral	Especificação Técnica
Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos	CPV ARI RS	75% a 85%	0% a 5%	-	NBR 5.735 (1991)

Fonte: NBR 5.735 (1991)

TABELA 3.2 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO CPV-ARI-RS.

Composição Química (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO Livre	Álcalis Totais	Resíduo Insolúvel	Perda ao Fogo
22,43	6,34	3,17	54,08	4,89	3,10	1,65	0,73	11,93	3,75

Fonte: Cia. de Cimento Itambé - www.cimentoitambe.com.br

TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO CPV-ARI-RS

Características Físicas						
Blaine (cm ² /g)	Massa Específica (g/cm ³)	Início de Pega (h:min)	Fim de Pega (h:min)	Finura # 200 (%)	Finura # 375 (%)	Expansibilidade (mm)
4.957	3,12	2:05	2:55	0,16	1,26	0,53

Fonte: Cia. de Cimento Itambé - www.cimentoitambe.com.br

As resistências mínimas a compressão do cimento CPV ARI RS, de acordo com a NBR 5.733 (1991), são apresentadas na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 - RESISTÊNCIA À MÍNIMA À COMPRESSÃO DO CIMENTO CPV-ARI-RS

Resistência Mínima à Compressão (MPa)		
RC 1 dia	RC 3 dias	RC 7 dias
11,00	24,00	34,00

Fonte: NBR 5.733 (1991)

Agregados Convencionais

Agregado Miúdo

O agregado miúdo mineral utilizado nesta pesquisa classifica-se como Areia Média Fina, e foi adquirido de *Mineração Pianaro Ltda, Rua Caetano Munhoz da Rocha, 2.885, Campo Largo (PR)*.

Agregado Graúdo

O agregado graúdo mineral utilizado, denominado Brita 0, foi adquirida da empresa *Inecol Indústria de Comércio de Pedras Britadas Ltda, sita à Rod. BR 277, km 8,5, Campo Largo (PR)*.

Areia Normalizada

Neste trabalho, para determinação da resistência à compressão do cimento Portland, utilizou-se a areia normalizada, conforme NBR 7214 (1982) – *Areia normal para ensaio de cimento*, adquirida do *IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP)*.

Água de Amassamento

Foi utilizada água potável, da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná - Sanepar.

Materiais Cimentícios Alternativos

- **Sílica Ativa:** Nesta pesquisa utilizou-se a sílica ativa produzida pela Camargo Corrêa S.A. com nome comercial de *Silmix*[®], adquirida na empresa *Impermix Comércio de Materiais de Construção Ltda*, sita à *Rua Alferes Poli, 1.199, Curitiba (PR)*.
- **Metacaulim:** Utilizou-se o material *Metacaulim HP*[®] produzido e comercializado pela empresa *Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda*, sita à *Av. Humberto Cereser, 5.530, Jundiá (SP)*.
- **Cinza Volante:** Utilizou-se o material oriundo da queima do carvão mineral da *Usina Termelétrica de Charqueadas*, sita à *Rod. RS 401, km 401, Charqueadas (RS)*;
- **Escória de Alto-Forno:** Material oriundo da *Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão (SP)*;
- **Cinza de Casca de Arroz:** Material fornecido pela empresa *Companhia de Arroz Urbano, Rua João Januário Ayroso, 3.183, Jaraguá do Sul (SC)*;
- **Resíduo de Cerâmica Calcinação:** Material fornecido pela *Cerâmica Duas Palmeiras Ltda, localizada à Rua Nicola Pellanda, 2000, Curitiba (PR)*.

Aditivos Químicos

- **Acelerador de Pega:** Cloreto de cálcio bi-hidratado - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, produzido pela *IPC do Nordeste Ltda., Pólo Petroquímico de Camaçari, Camaçari, BA* e comercializado pela empresa *Buschle e Lepper SA, Rod. BR 116, 14.951, Curitiba (PR)*. Na Tabela 3.5, apresentam-se algumas características do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, informadas pelo fabricante.

TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO ACELERADOR DE PEGA - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Características					
Forma	Estado	Cor	pH	Solubilidade	Massa Específica (g/cm^3)
Cristais ou Prismas	Sólido	Branca	8,0 a 9,0	Alta	0,80 a 0,84

Características informadas pelo fabricante

- Aditivo Superplastificante de Pega Normal: *Muraplast FK 49B*, que é uma mistura de lignosulfonatos, naftalenos e melaminas, produzido e fornecido pela empresa *MC – Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda*, sita à *Rua Henry Martin, 235, Vargem Grande Paulista (SP)*. Algumas Características do aditivo superplastificante *Muraplast FK 49B*, fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 - CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Características					
Tipo	Estado	Cor	pH	Teor de Sólidos	Massa Específica (g/cm^3)
Superplastificante de Pega Normal	Líquido	Marrom	8,0	37,0% a 39,0%	1,20

Características informadas pelo fabricante

3.1 1ª FASE – ESTUDO PRELIMINAR: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DETERMINAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E O RESÍDUO DE *PINUS spp*

O presente estudo preliminar objetivou analisar a influência da granulometria do resíduo de madeira, do teor de aditivo acelerador de pega e de 12 tipos de pré-tratamentos dados ao resíduo de *Pinus spp*, através das características físicas e mecânicas do compósito curado.

Paralelamente a este estudo, efetuou-se a análise da temperatura e tempo de hidratação dos compósitos, buscando comparar as características do compósito curado com os índices de inibição para cada mistura.

Para atingir este objetivo o estudo foi dividido em 7 Etapas, demonstradas no fluxograma apresentado na Figura 3.1.

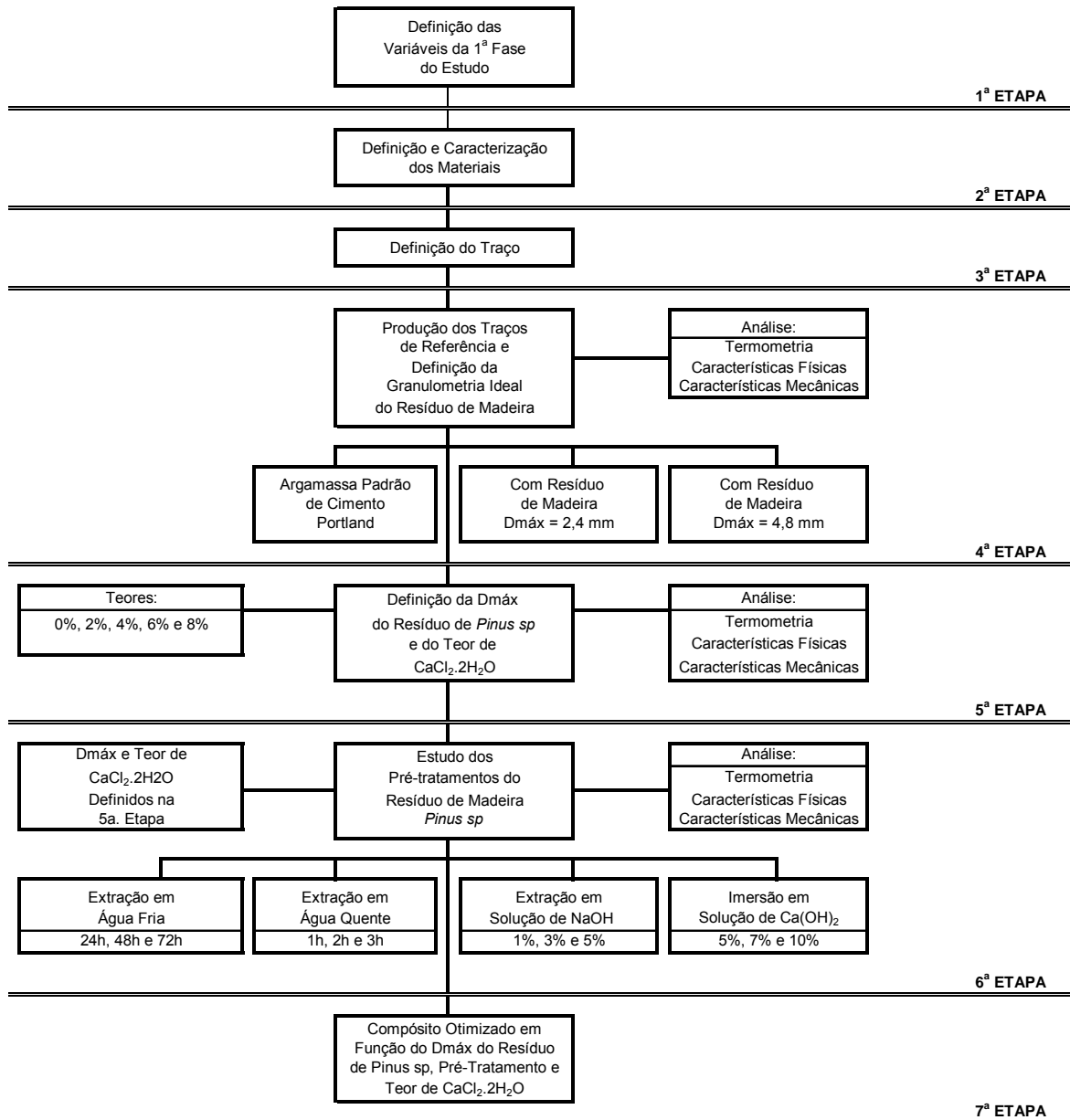


FIGURA 3.1- FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA 1ª. FASE DO ESTUDO

3.3.1 Definição das variáveis de estudo.

Nesta 1ª Fase do estudo, consideraram-se como variáveis independentes, as seguintes características do compósito e materiais constituintes:

- a- Granulometria do resíduo de madeira;

- b- Tipo de pré-tratamento do resíduo de *Pinus spp*;
- c- Tipo e teor de aditivo químico acelerador de pega ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

As variáveis dependentes, por sua vez, são as características apresentadas pelo compósito, no estado fresco e endurecido, que são:

- a- Temperatura e Tempo de hidratação;
- b- Características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias de idade);
- c- Características mecânicas (resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias de idade e resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade).

3.3.2 Caracterização dos materiais utilizados na pesquisa

Resíduo de Madeira Pinus spp

O resíduo de *Pinus spp* proveniente do desdobro de toras em serra circular e serra fita, foi coletada e seca ao ar. Após este período de secagem foi peneirada e separada em duas porções, uma com dimensão máxima¹ de 2,4 mm e outra com dimensão máxima de 4,8 mm, o que conferiu ao resíduo a mesma faixa granulométrica do agregado miúdo mineral, comumente utilizado na produção de artefatos de concreto. Em toda a pesquisa utilizou-se o resíduo de *Pinus spp* com a presença de fragmentos de casca da árvore.

¹ Dimensão Máxima: Refere-se à abertura da malha da peneira da série ABNT, em mm, em que se verifica uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% da amostra ensaiada.



FIGURA 3.2 - OBTENÇÃO DO RESÍDUO DE *PINUS SPP*

A caracterização do resíduo de *Pinus spp*, foi feita de acordo com os seguintes procedimentos:

- Para a análise granulométrica utilizaram-se os procedimentos em conformidade com a NBR NM 248 (2003), porém em vez da amostra inicial ter 1 kg, utilizou-se apenas 100 gramas de resíduo de madeira.
- Para a determinação da massa específica absoluta da serragem, utilizou-se um frasco de Chapman, conforme NBR NM 52 (2003), sendo o método adaptado com a substituição da água (200 cm^3) por álcool (350 cm^3) e a massa de agregado miúdo, que originalmente seria de 500 g, por 75 g de serragem de madeira na condição de umidade absolutamente seca.
- Para a determinação da massa unitária, utilizou-se a norma NBR NM 52 (2003), com adaptações quanto ao volume do recipiente utilizado e a massa de material ensaiado.
- Para a determinação da massa específica aparente, absorção de água e coeficiente de inchamento médio, da madeira sólida, utilizou-se a norma NBR 7.190 (1997).
- A análise de extrativos totais foi determinada de acordo com a norma TAPPI T 204 cm (1997).

Agregados Minerais

Os agregados minerais, miúdos (areia) e graúdos (brita 0), foram ensaiados conforme normalização técnica pertinente, ou seja:

- Determinação da massa específica e massa unitária dos agregados miúdos, conforme NBR NM 52 (2008) e dos agregados graúdos, conforme NBR NM 53 (2003);
- Análise granulométrica e composição dos dois tipos de agregados, conforme NBR NM 248 (2008);
- Determinação do teor de material pulverulento, nos dois agregados, conforme NBR NM 46 (2003);
- Determinação do teor de argila em torrões, em ambos agregados, conforme NBR 7.218 (1987);
- Determinação do teor de matéria orgânica, conforme NBR NM 49 (2001);
- Determinação da absorção de água dos agregados miúdos, conforme NBR NM 30 (2001);
- Determinação do coeficiente de inchamento médio e do teor de umidade crítica do agregado miúdo, conforme NBR 6.467 (2006).

Caracterização dos materiais cimentícios alternativos

Os materiais alternativos que não se apresentavam na forma de pó, no caso a EAF, CCA e o RCC, inicialmente foram secos em estufa, até constância de massa e foram moídos em moinho-de-bolas (Figura 3.3A), até finura que conferissem características que permitisse atuarem como substituintes ao cimento Portland (Figura 3.3B).



FIGURA 3.3 - MOINHO DE BOLAS E MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS MOÍDOS

Após esta preparação inicial, estes tiveram suas características químicas determinadas por fluorescência e difratometria de raios-x. A caracterização física, através da determinação da finura por peneiramento nas peneira de malha 75 μm (peneira ABNT n° 200), conforme NBR 11.579 (1991) 44 μm (peneira ABNT n° 325), conforme NBR 9.202 (1985) e, determinação da superfície específica (Blaine), conforme NBR NM 76 (1998) (Figura 3.4A).

O Índice de Atividade Pozolânica (IAP) dos materiais cimentícios alternativos foram determinados de acordo com a NBR 5.751 (1992)(Figura 3.4B).

A moagem e os ensaios de caracterização dos materiais cimentícios alternativos foram realizados no *Laboratório de Novos Produtos do Centro Técnico da Votorantim Cimentos, sito à Rodovia PR 092 n° 1.303, Curitiba (PR)*.

3.3.3 Definição dos traços para produção do compósito cimento-madeira

Adotou-se como traço para o compósito cimento-madeira, 200g de cimento Portland CPV ARI RS e 15g de resíduo *Pinus spp*, absolutamente seca, assegurando a relação cimento/ madeira: 1: 13,33 e relação água/cimento igual a 0,40.



(A)

(B)

FIGURA 3.4 - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (A) E DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE (B)

A confecção dos corpos-de-prova cilíndricos baseou-se na Norma Brasileira NBR 7215 (1996), e a quantidade de cada material para a produção de 6 corpos-de-prova resultou em:

- Cimento:..... 1.200 g
- Resíduo de *Pinus spp*:..... 90 g
- Água:..... 480 g

Na análise termométrica, a serragem foi utilizada na condição absolutamente seco, enquanto que na confecção dos corpos-de-prova para determinação das características físicas e mecânicas, foi considerada a umidade em que o resíduo se encontrava e procedida sua correção em função da expressão:

$$Ca = R_{a/c} \cdot C + (PSF - U) \cdot m \quad (10)$$

Onde: Ca = Consumo de água de amassamento;

$R_{a/c}$ = Relação a/c;

PSF = Ponto de saturação das fibras da madeira, adotado como 30%;

U = Teor de umidade do resíduo de madeira, determinado no momento da mistura;

m = Massa de madeira do traço (Resíduo de *Pinus spp*).

3.3.4 Determinação do tamanho ótimo da amostra

Para determinação da amostra mínima a ser ensaiada e verificação da normalidade da distribuição e confiabilidade dos resultados, inicialmente foram moldados 30 corpos-de-prova com compósito cimento-madeira (resíduo de *Pinus-spp*), e posterior rompimento à compressão aos 7 dias de idade. Uma vez comprovada a normalidade da distribuição dos dados, calculou-se o tamanho da amostra, conforme a equação:

$$n = z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{Er^2} \quad (11)$$

Onde: n = número de repetições;
 E_r = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;
 CV = coeficiente de variação da amostra;
 $z_{\alpha/2}$ = valor tabelado que, para um nível $\alpha = 5\%$ de significância, possui o valor de 1,96.

3.3.5 Produção e controle tecnológico dos corpos-de-prova

Após a preparação das misturas, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensão nominal de 50 mm, confeccionados em 4 camadas de mesma altura e cada camada, adensadas com 30 golpes de soquete padrão. A cura inicial dos corpos-de-prova, com duração de 24 horas, deu-se em câmara úmida, conforme NBR 9.479 (2006), com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa mínima de 95 %, onde permaneceram com os moldes e cobertos com uma placa de acrílico, para proteção, conforme NBR 7.215 (1996). Após o período de cura inicial, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e mantidos em câmara úmida, imersos em água, até a data de ensaio.

Mistura dos materiais

Para mistura dos materiais utilizou-se um misturador mecânico marca *Emic*, dotado de uma cuba de aço inoxidável com capacidade de 5 litros e capaz de realizar misturas em velocidades de 140 ± 5 rpm (baixa velocidade) e 285 ± 5 rpm (alta velocidade).

Os materiais foram misturados, com base numa adaptação da NRB 7.215 (1996).

3.3.6 Determinação da Consistência e Análise Termométrica dos Compósitos

Determinação da consistência da mistura

A consistência da mistura, ou sua plasticidade foi determinada mediante ensaio de escorregamento sem restrições em equipamento denominado mesa cadente ou *flow-table*, e seguiu as especificações da NBR 7.215 (1996).



FIGURA 3.5 - SEQUÊNCIA DE PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS: MISTURA MECÂNICA, DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA E CURA INICIAL

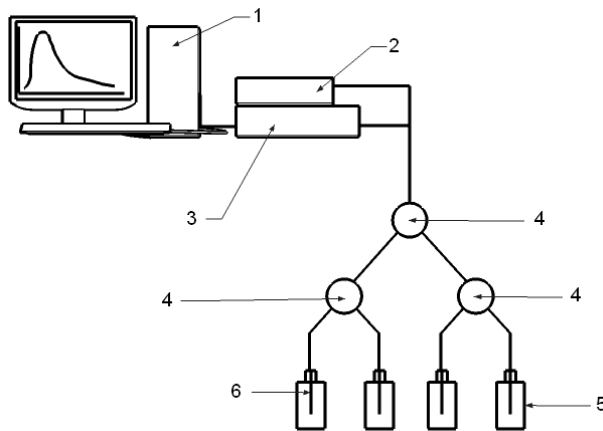
Análise termométrica das misturas

Nesta análise, foram utilizados sensores de Bragg em fibras óticas de sílica (SiO_2), marca *Nuferr*[®] Tipo *GF1*, gravadas com raios laser, no Núcleo de Dispositivos Fotorefrativos da UTFPR, com comprimento de onda de Bragg dentro da janela de transmissão ótica, em torno de 1.550 nm e multiplexadas para permitir até 4 leituras de temperatura simultaneamente.

As fibras foram ligadas a uma fonte ótica de banda larga, sendo o sinal refletido pelos sensores gravados, desviados por acopladores óticos, marca *Opto Link*, para um analisador de espectros óticos (OSA) marca *Mícron Optics SM 125*, capaz de indicar o comprimento de onda de Bragg de cada sensor (1.534 mm, 1.538 mm, 1.546 mm e 1.558 mm), conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 3.6.

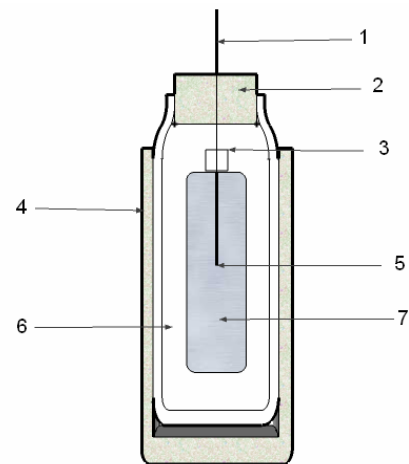
Após a mistura dos compósitos, prepararam-se amostras com 100g, que eram envoltas em papel alumínio e acondicionadas dentro de ampolas térmicas. As fibras óticas eram, então, inseridas na mistura fresca, dando início à determinação da temperatura de hidratação dos compósitos.

SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS



- 1- Computador
- 2- Fonte ótica de banda larga
- 3- Analisador de espectros óticos
- 4- Acopladores óticos
- 5- Ampolas Térmicas
- 6- Sensores de Bragg

DETALHE DA AMPOLA TÉRMICA



- 1- Fibra ótica
- 2- Tampa com isolamento térmico
- 3- Agulha
- 4- Isolamento térmico
- 5- Sensor de Bragg
- 6- Ampola Térmica
- 7- Compósito

FIGURA 3.6 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Para proteção das fibras óticas, estas foram colocadas no interior de agulhas e o espaço entre as fibras e as paredes das agulhas eram preenchidas por uma fina camada de óleo mineral, de forma a não permitir que o espaço vazio entre as paredes da agulha e a fibra pudesse alterar as leituras de temperatura. Após as 24 horas de leitura das temperaturas, estas agulhas eram descartadas juntamente com o compósito

endurecido. Os ensaios foram efetuados no LOOP - Laboratório de Ótica e Optoeletrônica, da UTFPR.

O sistema de determinação da temperatura com redes de Bragg em fibras óticas é apresentado nas fotos constantes da Figura 3.7.

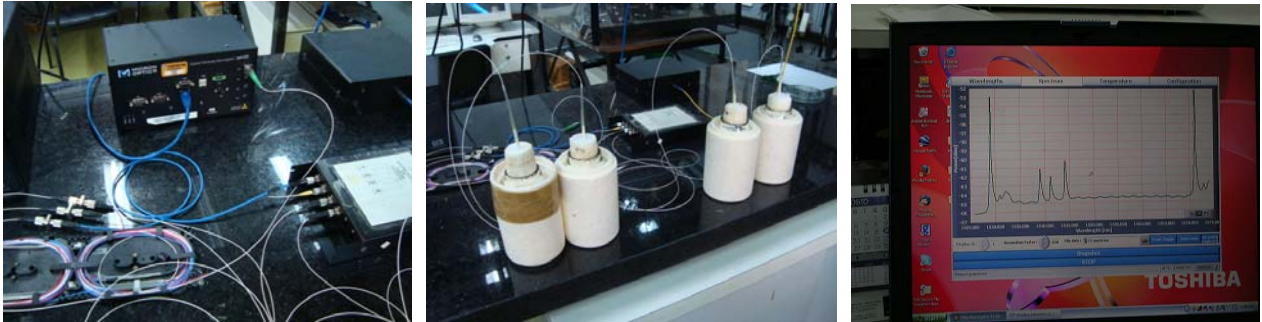


FIGURA 3.7 - TÉCNICA DE ENSAIO DE TERMOMETRIA COM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

3.3.7 Análise do Desempenho dos Compósitos

Características Físicas

O desempenho dos compósitos foi determinado mediante ensaios para determinação das características físicas do material aos 28 dias de idade, compreendendo os ensaios para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água, conforme norma NBR 9.778 (2005).

De acordo com aquela norma, a absorção de água é determinada por meio da proporcionalidade entre as massas do material seco em estufa e saturado em água, conforme a expressão:

$$abs(\%) = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (12)$$

Onde: m_{sat} = massa do CP após saturação em água por 24 horas (kg);

m_s = massa do CP após permanência em estufa à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 24 horas (kg)

O índice de vazios (%), por sua vez, conforme a mesma norma, é determinado pela expressão:

$$i_v(\%) = \frac{(m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_{im})} \times 100 \quad (13)$$

Onde: m_{im} = massa do corpo-de-prova saturado imerso em água (kg).

A massa específica da amostra seca (kg/m^3) é determinada pela expressão:

$$\gamma_s = \frac{m_s}{(m_{sat} - m_{im})} \quad (14)$$

Características Mecânicas

As características mecânicas, compreendendo os ensaios para determinação da resistência à compressão (Figura 3.8) aos 7, 14, 28 e 91 dias de idade, conforme NBR 7.215 (1997), onde o valor da tensão de ruptura à compressão, é dado pela expressão:

$$f_{cj} = P/S \quad (15)$$

Onde: f_{cj} = resistência à compressão na idade j dias (MPa);

P = valor da carga de ruptura (kgf);

S = área da seção resistente (cm^2).



FIGURA 3.8 - CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS: ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A determinação da resistência à tração por compressão diametral, conforme NBR 7.222 (1994) é calculada pela fórmula:

$$f_{ctm} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot l} \quad (16)$$

Onde: f_{ctm} = resistência à tração por compressão (MPa)

P = carga de ruptura (kgf);

l = comprimento do corpo-de-prova (cm), e;

D = diâmetro do corpo de prova (cm)

Para não haver influências de irregularidades nos topos dos corpos-de-prova, e garantir a ruptura por compressão simples, foi utilizado como capeamento, peças de neoprene guarnecidas por capacetes de aço.

Nos ensaios para determinação da tração por compressão diametral (Figura 3.9), utilizou-se um dispositivo para distribuir a carga ao longo do eixo longitudinal do corpo-de-prova e para evitar influência de irregularidades que por ventura houvesse nas superfícies dos corpos-de-prova, foram utilizados discos de neoprene com dureza 60 a 70 *shore* guarnecidas por pratos de aço.

pequenas peças de madeira, conforme prescreve a norma NBR 7.222 (1994).

As características físicas dos compósitos produzidos nesta pesquisa foram determinadas em máquina universal de ensaio marca *Emic*, modelo *DL 30000*, com tomada de dados por computador. Os ensaios foram realizados no Labmat - Laboratório de Materiais de Construção, da UTFPR.

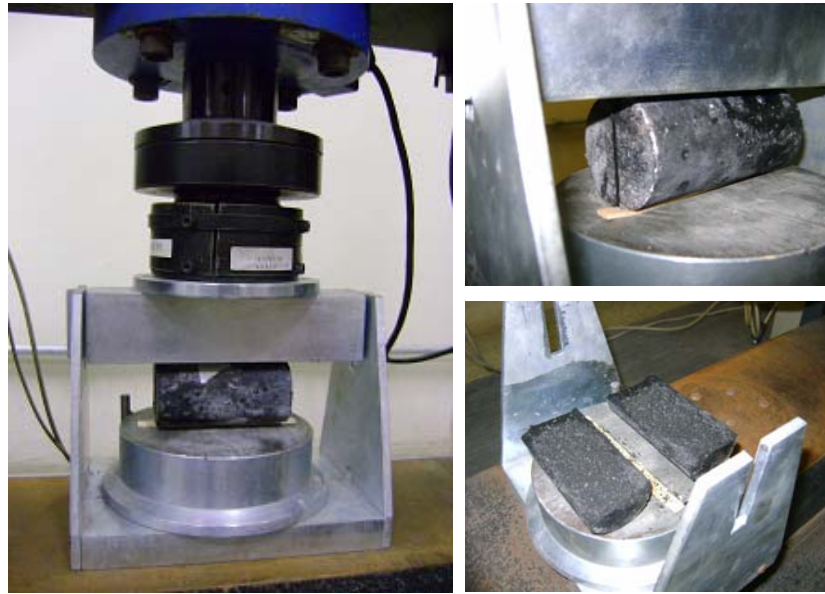


FIGURA 3.9 - CORPOS-DE-PROVA CILINDRICOS: DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

3.3.8 Definição do Teor de Aditivo Acelerador e da Granulometria Ideal do Resíduo

Para análise do desempenho do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ como acelerador de pega do cimento Portland, e para verificar o teor de aditivo que conferiria as melhores características ao composto, adotaram-se 5 teores, solubilizados à água de amassamento da mistura, iguais a 0%, 2%, 4%, 6% e 8%, relativos ao consumo de cimento, como compostos de referência, e foram moldados, também, misturas sem $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

A fim de adotar uma única distribuição granulométrica para continuidade do estudo, efetuaram-se as séries de moldagem com o resíduo após peneiramento com as peneiras 4,8mm e 2,4mm da série normal da ABNT.

Nesta fase da pesquisa, o resíduo de madeira ainda não havia passado por nenhum pré-tratamento, apenas secagem ao ar.

Número de corpos-de-prova e características determinadas

Nesta etapa do estudo foram produzidos 248 corpos-de-prova e ensaiados para determinação das características físicas e mecânicas.

Para determinação das características físicas, foram moldados 4 corpos-de-prova para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água dos compósitos, para cada teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Para determinação das características mecânicas, foram moldados 16 corpos-de-prova, sendo 12 para a determinação da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias (4 corpos-de-prova para cada idade) e 4 corpos-de-prova para a determinação da resistência à tração aos 28 dias de idade.

Após a determinação do teor ótimo de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para cada dimensão máxima do resíduo utilizado, foram moldados mais 48 corpos-de-prova, sendo 24 para cada dimensão máxima ($D_{\text{máx}}$), para a determinação das mesmas características (físicas e mecânicas), sendo determinada, também, a resistência à compressão aos 91 dias, prevendo que este valor seria adotado como uma das referências para a análise dos compósitos produzidos na 2ª. Fase da pesquisa.

3.3.9 Definição dos pré-tratamentos dados ao resíduo de *Pinus spp*

Adotaram-se os seguintes tipos de pré-tratamento aos resíduos de madeira:

a- **Solubilização em água fria:** Neste pré-tratamento, o resíduo de *Pinus spp* permaneceu imerso em água fria por períodos de 1, 2 e 3 dias. Após estes períodos, o material foi espalhado em área coberta e passou por um período de secagem ao ar. A proporção de água utilizada foi de 10 litros para cada 1 kg de resíduo de madeira.

b- **Solubilização em água quente (100 °C):** Neste pré-tratamento, o resíduo de *Pinus spp* permaneceu imerso em água a 100 °C, por períodos de 1, 2 e 3 horas. Após estes períodos de tempo, o material foi espalhado em área coberta para secagem ao ar. A proporção de água utilizada foi de 10 litros para cada 1 kg de resíduo de madeira.

c- **Solubilização em solução de NaOH:** Neste pré-tratamento, o resíduo de *Pinus spp* permaneceu imerso em soluções de NaOH, com teores de 1%, 3% e 5%, em massa, por um período de 1 hora. Após este período de tempo, sofreu um processo de lavagem com água fria e foi espalhado em área coberta para secagem ao ar. A proporção de solução de NaOH utilizada foi de 10 litros para cada 1 kg de resíduo de madeira.

d- **Solubilização em solução de Ca(OH)₂:** Neste pré-tratamento, o resíduo de *Pinus spp* permaneceu imerso em soluções de Ca(OH)₂, com teores de 5%, 7% e 10%, em massa, durante um período de 24 horas. Após este período, o material foi lavado com água fria e foi espalhado em local coberto para secagem ao ar. A proporção de solução de Ca(OH)₂ utilizada foi de 10 litros para cada 1 kg de resíduo de madeira.

Número de corpos-de-prova e características determinadas

Nos ensaios para análise do desempenho dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os 12 pré-tratamentos indicados, foram produzidos 240 corpos-de-prova, sendo que destes, 4 CP foram ensaiados para determinação das características físicas do compósito produzido com cada pré-tratamento do resíduo e 16 CP, ensaiados para a determinação das características mecânicas, sendo 12 CP ensaiados para determinação da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade (4 CP para cada idade) e 4 CP para determinação da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade do compósito.

3.3.10 Determinação de extrativos da madeira

Após a coleta e peneiramento e secagem inicial, ao ar, uma porção de resíduo de *Pinus spp* foi selecionado para a determinação dos extrativos. Desta porção, para a análise dos extrativos totais, o resíduo passou por um refinamento através do moinho de martelos e peneiramento, sendo utilizada a fração passante na peneira n° 16

internacional (malha 40 ASTM) e retida na peneira n° 24 internacional (malha 60 ASTM).

Os extrativos totais foram determinados pela soma dos extrativos determinados com álcool-benzeno, água fria e água quente.

Os ensaios para determinação dos extrativos e para análise do efeito dos pré-tratamentos sobre o resíduo de *Pinus spp*, foram efetuados no Laboratório de Polpa e Papel da UFPR.

3.4 2ª FASE - ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND

Esta Fase do estudo foi dividida em 3 etapas, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.10.

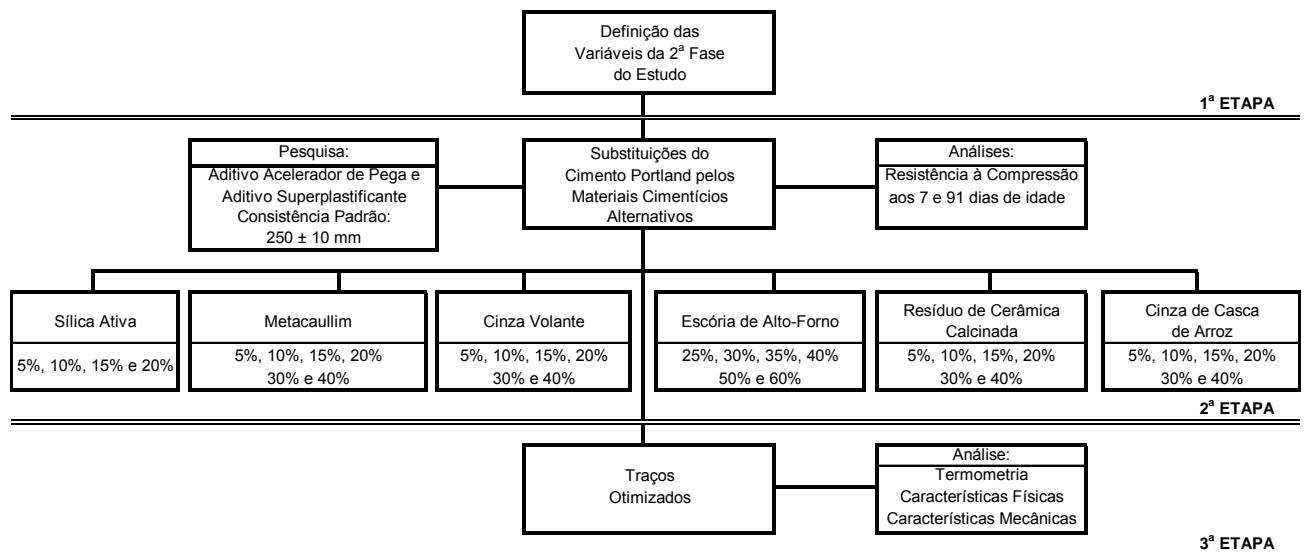


FIGURA 3.10 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA 2ª FASE DO ESTUDO

Nesta 2ª Fase, consideraram-se como variáveis independentes, as seguintes características do compósito e materiais constituintes:

- a- Granulometria do resíduo de *Pinus spp*;

- b- Tipo de pré-tratamento da madeira;
- c- Teor de aditivo químico acelerador de pega;
- d- Tipo e teor de substituição ao cimento Portland;
- e- Teor de aditivo químico redutor de água;

As variáveis dependentes, por sua vez, são as características apresentadas pelo compósito, em estado fresco e endurecido, que são:

- a- Temperatura de hidratação do compósito;
- b- Tempo de hidratação do compósito;
- c- Características físicas do compósito (consistência da mistura, massa específica, índice de vazios e absorção de água);
- d- Características mecânicas do compósito (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral);

Adotou-se como traço referência para composição do compósito cimento madeira, o mesmo traço da 1ª. Fase do estudo.

Nesta Fase da pesquisa passou-se a adotar a relação água/aglomerante igual a 0,35.

Conforme verificado na 1ª. Fase do estudo adotou-se para todo o restante da pesquisa o pré-tratamento extração em água fria por um período de 24 horas, denominado na continuidade da pesquisa pela sigla AF-48H.

3.4.1 Compósitos de Referência

Para a análise de desempenho dos compósitos com substituições parciais do cimento Portland, adotaram-se os seguintes compósitos de referência:

- **Referência 1** – Argamassa padrão para determinação da resistência à compressão do cimento Portland, determinada conforme norma NBR 7.215 (1997);

- **Referência 2** – Compósito produzido com cimento Portland e resíduo de *Pinus spp* sem qualquer tipo de pré-tratamento (*in natura*) ou adição de qualquer tipo de aditivo químico;
- **Referência 3** – Compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp* sem qualquer pré-tratamento (*in natura*) e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- **Referência 4** – Compósito produzido com resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

3.4.2 Teores de substituição do cimento Portland

Os teores de substituições parciais do cimento Portland dos compósitos cimento-madeira (resíduo de *Pinus spp*), foram tomadas com base na massa de cimento Portland do traço e variaram em função do tipo da substituição, conforme apresentado na Tabela 3.7

TABELA 3.7 – TEORES DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E TEORES DE ADITIVOS ACELERADOR DE PEGA E SUPERPLASTIFICANTE

Material Cimentício Alternativo	Teores de Substituição ao Cimento Portland					
	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Sílica Ativa (SA)	5%	10%	15%	20%		
Metacaulim (MC)	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Cinza Volante (CV)	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Resíduo de Cerâmica Calcinada (RCC)	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Cinza de Casca de Arroz (CCA)	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Escória de Alto Forno (EAF)	25%	30%	35%	40%	50%	60%
Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0% a 4,5%	0% a 4,5%	0% a 4,5%	0% a 4,5%	0% a 4,5%	0% a 4,5%
Teor de Superplastificante	O necessário para obter uma consistência de $250 \pm 10\text{mm}^*$					

* Medida da Consistência na Mesa Cadente (Flow Table), conforme NBR 7.215 (1997)

3.4.3 Teor de Aditivo Acelerador de pega

Conforme ensaios preliminares indicaram, não seria possível fixar o teor de aditivo acelerador de pega, conforme determinado na 1ª Fase da pesquisa, então se passou a trabalhar, para cada teor de substituição do cimento Portland, com teores de

CaCl₂.2H₂O, variando de 0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%. O teor limite de 4,5% foi adotado por ter apresentado o melhor desempenho na 1ª Fase da pesquisa.

3.4.4 Teor de Aditivo Superplastificante

Em função da grande finura dos materiais cimentícios alternativos e diante da necessidade de manter a Relação água/aglomerante inalterada, a partir desta Fase da pesquisa, adotou-se a utilização de aditivo químico redutor de água, tipo superplastificante de pega normal. A escolha deste aditivo se deve ao fato de ser um aditivo de 2ª. geração, portanto uma mistura de lignosulfonatos, naftalenos e melaminas, o que confere ao produto um bom desempenho aliado a um custo menor que outros, denominados de 3ª. geração, além do uso em pré-fabricação de elementos de concreto estar entre as indicações para seu uso, de acordo com catálogo do fabricante.

O teor de aditivo superplastificante foi adotado em função da consistência do compósito fresco, medida na mesa cadente, conforme norma NBR 7.215 (1997) e adotado em porcentagem da soma da massa de cimento e dos materiais cimentícios dos traços dos compósitos. Os teores de aditivo superplastificante adotados no estudo estão apresentados na Tabela 3.8.

TABELA 3.8 – TEORES DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE PARA CADA TIPO DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Material Cimentício Alternativo	Teor de Substituição ao Cimento	Teor de Aditivo Superplastificante (%)*
Sílica Ativa (SA)	5% a 20%	0,20% a 4,40%
Metacaulim (MC)	5% a 40%	0,60% a 7,80%
Cinza Volante (CV)	5% a 40%	<i>Não Necessário</i>
Resíduo de Cerâmica Calcinada (RCC)	5% a 40%	0,60% a 2,60%
Cinza de Casca de Arroz (CCA)	5% a 40%	0,60% a 4,20%
Escória de Alto Forno (EAF)	25% a 60%	<i>Não Necessário</i>

* **Porcentagem sobre a massa do cimento + mat. cimentício alternativo**

Os teores de aditivo superplastificante utilizados nos compósitos deste trabalho dizem respeito à soma das frações sólida e líquida do aditivo.

3.4.5 Número de corpos-de-prova e análise do desempenho do compósito

Diante das 34 substituições do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos e na necessidade de variar o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em 5 teores (0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%), e de superplastificante, de forma a garantir uma consistência constante para os compósitos, houve a necessidade de produzir 170 misturas, sendo de foram moldados 8 corpos-de-prova em cada mistura (4 CP para determinação da resistência à compressão aos 7 dias e 4 CP para determinação da resistência à compressão aos 91 dias). Portanto, produziram-se ao todo, nesta etapa da pesquisa, 1.360 corpos-de-prova.

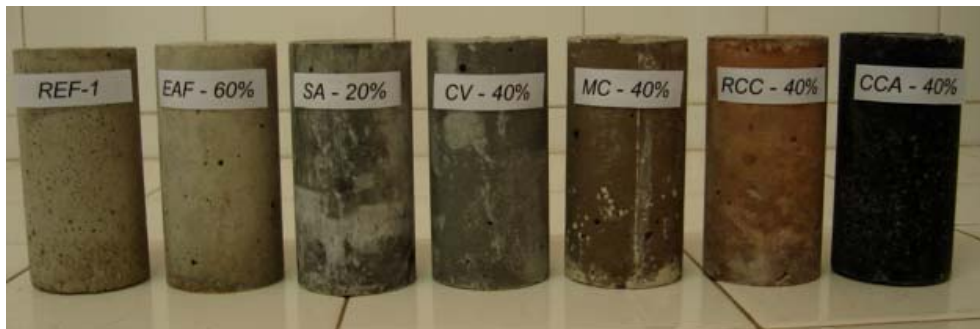


FIGURA 3.11 - COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM OS TEORES MÁXIMOS DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A idade de 91 dias para a determinação da resistência à compressão do compósito foi escolhida em função das reações de hidratação dos materiais cimentícios alternativos serem mais lentas que as do cimento Portland.

3.4.6 Determinação dos Teores Ótimos das Substituições ao Cimento Portland

Com base nos resultados de resistência à compressão dos compósitos cimento-madeira (resíduo de *Pinus spp*) produzidos com as substituições parciais do cimento Portland, pelos seis materiais cimentícios alternativos, efetuaram-se análises multivariadas através de regressões múltiplas, considerando-se como variáveis dependentes as resistências dos compósitos aos 91 dias de idade e como variáveis

independentes os teores de substituição ao cimento Portland, os teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e os teores de aditivo superplastificantes utilizados na produção das misturas.

Com os 7 traços otimizados foram então produzidos 140 corpos-de-prova, sendo 20 para cada traço otimizado. Destes 20 corpos-de-prova, 4 foram utilizados para determinar as características físicas dos compósitos (massa específica, índice de vazios e absorção de água), 12 corpos-de-prova para determinação das resistências à compressão do compósito aos 7, 28 e 91 dias de idade (4 CP para cada idade) e 4 corpos-de-prova para determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

3.4.7 Determinação da Temperatura e Tempo de hidratação das misturas otimizadas

Foram adotados os mesmos procedimentos da 1ª Fase da pesquisa, porém, apenas sobre os traços otimizados para cada tipo de substituição ao cimento Portland.

3.5 3ª FASE – ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE BLOCOS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO DE REFERÊNCIA.

Esta Fase do estudo foi dividida em 5 etapas, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.12.

Nesta 3ª Fase, consideraram-se como variáveis independentes, as seguintes características dos blocos pré-fabricados e materiais constituintes:

- a- Proporcionamento dos materiais (traços);
- b- Unidade de Moldagem;

As variáveis dependentes, características apresentadas pelo concreto no estado fresco e endurecido, são:

- a- Características físicas (massa específica no estado fresco e endurecido, índice de vazios e absorção de água no estado endurecido);
- b- Características mecânicas (resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade).

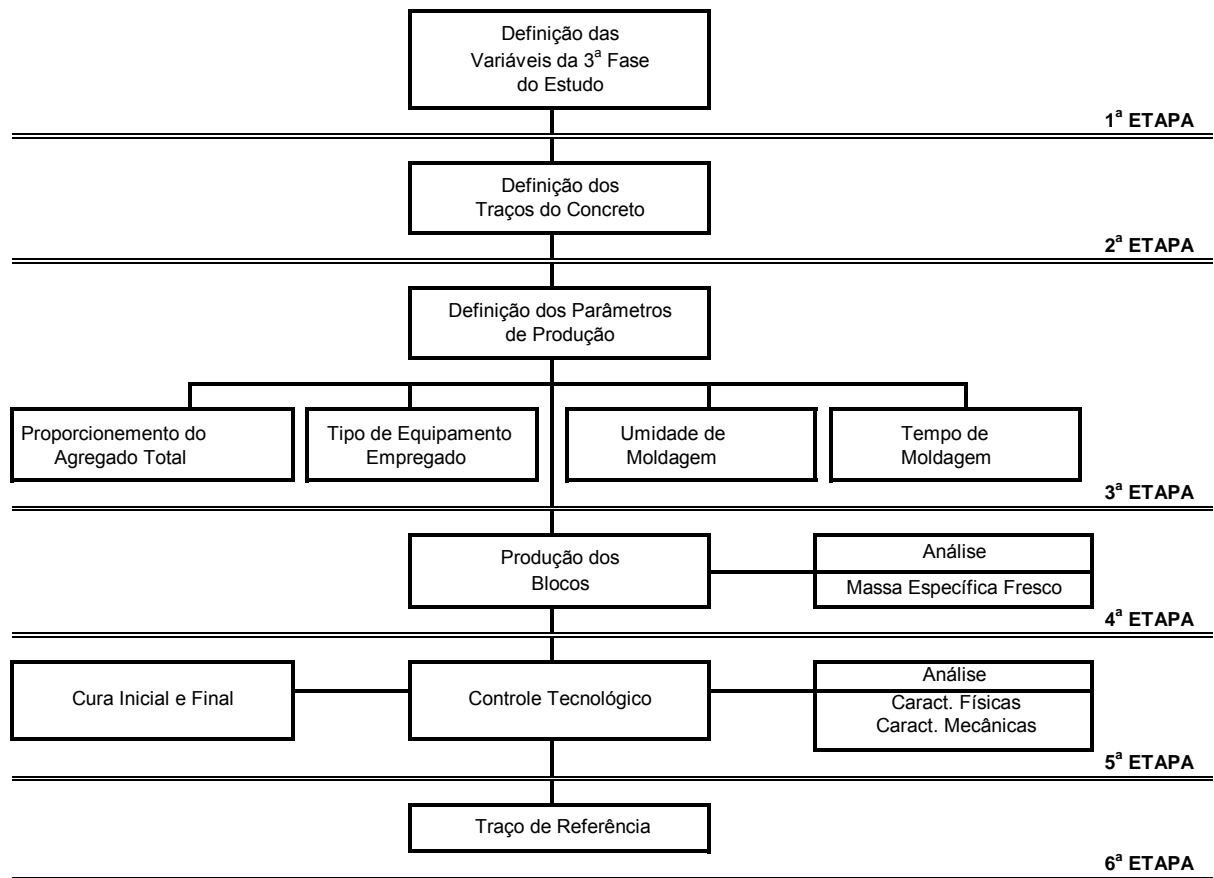


FIGURA 3.12 - FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DA 3ª FASE DO ESTUDO

3.5.1 Definição dos Parâmetros de Produção e Moldagem dos Blocos

Os blocos de referência foram produzidos em uma máquina vibro-prensa marca *Trillor Montana*, modelo *MBX 200*, na empresa *Bricka Sistemas Construtivos Ltda*, localizada a *Rua Salgado Filho, 395, município de Pinhais (PR)*. Este equipamento infere uma carga unidirecional vertical de 1.010 kgf durante a compressão do concreto fresco para produção dos blocos, sendo capaz de produzir até 4 mil blocos por dia.

O proporcionamento do agregado total (agregado miúdo + agregado graúdo) foi feito mediante a determinação da mistura de maior massa unitária compactada, o

que traduz o menor índice de vazios possível para a mistura, conforme método ABCP, resumidamente exposto na revisão da literatura.

A maneira mais eficiente de determinar qual a melhor relação cimento/agregado, é fazer testes de produção, com diversos consumos de cimento e ensaiando os elementos produzidos à compressão, determinando a melhor relação em função do desempenho técnico e econômico.

Nesta análise, partiu-se de três relações cimento/agregado pré-estabelecidas (traços piloto), em volume, de 1:6, 1:8 e 1:10, de forma a permitir a investigação das resistências obtidas e subsidiar a escolha de um traço padrão, que corresponda às especificações impostas pelas normas brasileiras NBR 6.136 (2008) e NBR 12.118 (2008).

O consumo inicial de cimento C_c , para cada traço foi determinado com base nos índices físicos do cimento e dos agregados utilizados. A quantidade de água foi estabelecida, inicialmente para uma umidade de moldagem de 6,0%, pois representa o teor médio utilizado pelas empresas produtoras de blocos pré-fabricados de concreto, sendo que este teor deve ser ajustado em função do equipamento utilizado. Os traços piloto são apresentados de maneira resumida na Tabela 3.8.

Durante a produção dos blocos procedeu-se a pesquisa da melhor consistência de moldagem, através de diversas tentativas de moldagem na vibroprensa, de acordo com o traço do concreto adotado, o modelo do equipamento utilizado, e variando os teores de umidade de moldagem, a partir do teor inicial estabelecido em 6,0% até 9,5%, com variações de 0,5%.

TABELA 3.9 – BLOCOS DE CONCRETO: TRAÇOS EM MASSA

Materiais	Traços em Volume		
	1 : 6	1 : 8	1 : 10
Cimento CPV ARI RS (kg)	335,00	265,00	220,00
Areia (kg)	1.019,63	1.052,53	1.073,31
Brita 0 (kg)	993,49	1.025,54	1.045,79
Água (UM = 6,0%)(kg)	140,89	140,58	140,35

Diante de tal análise de produção, para o traço 1:6, ficou fixado o teor de umidade de 6,5% e para os traços 1:8 e 1:10, o teor de umidade adotado foi de 6,0%.

E função do equipamento utilizado adotou-se um tempo médio de moldagem de 6,0 segundos e de ciclo de 12 segundos (com pequenas variações por tratar-se de equipamento não automatizado).

A Figura 3.13 apresenta de maneira resumida a seqüência de procedimentos para determinação dos parâmetros de produção e moldagem dos blocos de referência.



FIGURA 3.13 - EQUIPAMENTO UTILIZADO E SEQUÊNCIA DE TRABALHOS PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS

Número de Corpos-de-Prova

Após o estabelecimento dos teores de umidade de moldagem, foram produzidos 30 blocos de cada traço (perfazendo um total de 90 blocos) que foram ensaiados para determinação das seguintes características:

- Massa específica dos blocos no estado fresco e no estado endurecido, aos 28 dias de idade;
- Índice de vazios do material, aos 28 dias de idade;
- Absorção de água, por imersão, aos 28 dias de idade;
- Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade;

Todos os ensaios foram realizados conforme preconiza a NBR 12.118 (2008).

Cura dos Blocos de Referência

A cura dos blocos se deu ao ar, em ambiente abrigado e recebendo molhagens diariamente, seguindo as mesmas condições dos elementos produzidos na fábrica de pré-moldados.

3.5.2 Determinação das Características Físicas

De acordo com a NBR 12.118 (2008), a massa específica, o índice de vazios e a absorção de água dos blocos de concreto são determinados por meio da proporcionalidade de massa do material no estado seco, saturado com superfície seca e saturado e imerso em água (pesagem hidrostática), da mesma forma como determinadas para os corpos-de-prova cilíndricos de concreto e argamassa, conforme visto na 1ª. Fase do estudo, inclusive, determinadas com as mesmas expressões matemáticas.

Para a determinação da retração dos blocos por secagem, foram fixados pequenos pinos de aço inoxidável, cimentados em cavidades através de agente cimentante (que de acordo com a norma NBR 12.118 (2008) pode ser o próprio cimento

Portland) nos corpos-de-prova, que podem ser blocos inteiros ou prismas retirados das paredes laterais.

3.5.3 Determinação das Características Mecânicas

Para determinação da resistência à compressão dos blocos de referência, foi utilizada uma máquina de ensaios marca *Emic*, modelo *PC 200*, equipada com pratos especiais para ensaios, que permite a distribuição uniforme do carregamento sobre os blocos, com transmissão de modo progressivo e sem ocorrência de choques. O equipamento conta também com tomada de dados por computador e permite ensaios com blocos de concreto até carregamentos de 200 tf. Antes dos ensaios os blocos tiveram suas faces regularizadas através de lixamento.

Os resultados foram obtidos pela razão entre a carga determinada na ruptura dos blocos e sua área bruta (sem descontar as áreas dos furos), conforme determina a NBR 12.118 (2008).

O ensaio de determinação da resistência à compressão dos blocos de referência é apresentado na Figura 3.14.



FIGURA 3.14 - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS

3.5.4 Definição dos Traços de Referência

Em função dos resultados obtidos para a resistência à compressão dos blocos moldados de acordo com os três traços piloto, adotou-se o traço 1:10 como traço de referência para as próximas fases do estudo.

Esta escolha se deve as resistências verificadas para estes traços, que possibilitam sua utilização tanto para alvenaria sem função estrutural, quanto para alvenaria estrutural.

Estes traços serviram de base para todo o restante do estudo, como paradigma em termos de resistência à compressão, massas específicas no estado fresco e endurecido, absorção de água, retração por secagem e caracterização geométrica, em relação aos blocos produzidos com concreto substituindo-se o agregado convencional por resíduo de madeira particulada e o cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos.

3.6 4ª FASE - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO

Nesta Fase da pesquisa apresenta-se a metodologia adotada para a produção de corpos de prova cilíndricos com diâmetro nominal de 50mm, de forma a reproduzir as mesmas características do concreto produzido pela máquina produtora de blocos de concreto (vibro-prensa), e com condições de serem utilizados na investigação das influências da substituição dos agregados convencionais pela serragem de *Pinus spp*, sobre as características físicas e mecânicas do concreto.

Para alcançar este objetivo, esta 4ª Fase da pesquisa seguiu as etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 3.15.

Nesta Fase da pesquisa, apresentam-se as seguintes variáveis de estudo:

Variável Independente

a- Tempo de moldagem no sistema alternativo de vibro-compressão;

As variáveis independentes, por sua vez, são as características apresentadas pelo concreto produzido no sistema alternativo de moldagem, que são:

a- Massa específica no estado fresco;

b- Características físicas (massa específica do concreto no estado fresco e endurecido, índice de vazios e absorção de água do concreto endurecido);

c- Característica mecânica (resistência à compressão aos 7 dias de idade).

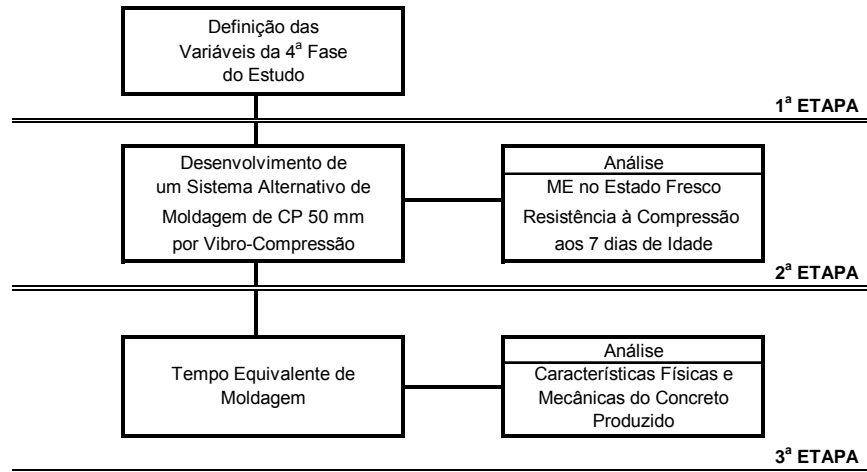


FIGURA 3.15 - FLUXOGRAMA DA 4ª FASE DA PESQUISA

3.6.1 Moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto por vibro-compressão

A investigação da influência da substituição dos agregados convencionais por resíduo de madeira foi realizada, inicialmente, em corpos de prova cilíndricos de concreto, com diâmetro nominal de 50mm, moldados em uma única camada e adensados pelo efeito concomitante de vibração e compressão, de forma a reproduzir a moldagem efetuada em uma máquina produtora de blocos (vibro-prensa).

O objetivo desta metodologia foi o de reduzir as variações típicas do processo de produção e dos ensaios de caracterização e especificação do concreto, além de que o estudo em corpos de prova cilíndricos possibilita a verificação de características que dificilmente seriam investigadas com os blocos de concreto, como por exemplo, a resistência à tração do concreto, que pode ser determinada através da solicitação de corpos-de-prova cilíndricos à compressão diametral.

De maneira a produzir um concreto similar ao produzido na confecção dos blocos através da vibro-prensa, adotou-se a massa específica do concreto fresco como paradigma de comparação, empregando-se uma técnica baseada na consistência do concreto, através da adaptação da norma norte-americana ASTM C 1170 (1991) –

Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table.

Segundo esta norma, a consistência do concreto é estabelecida em função do tempo que uma determinada amostra de concreto leva para adensar sob determinada energia de adensamento, em uma mesa vibratória. Este tempo, expresso em segundos, é denominado por aquela norma como tempo Vebe.

3.6.2 Equipamento Desenvolvido

Iniciou-se o estudo em laboratório, mediante a adoção uma massa de 10,5 kg (que representa a metade da carga, em kg/cm^2 , transferida pela máquina vibro-prensa durante a produção dos blocos de concreto) que desliza por um tubo guia (Figura 3.16), e pressiona o concreto, no interior de um molde, em função da vibração produzida por uma mesa, por um período de tempo determinado, denominado por *Tempo Equivalente de Moldagem*.

Para garantir que o molde seria inteiramente preenchido, produziu-se um prolongamento para os moldes dos corpos-de-prova, confeccionados em PVC, conforme pode ser verificado na Figura 3.16.

Antes de cada utilização, todo o sistema foi verificado quanto ao nivelamento do conjunto, de modo a garantir uma compactação homogênea do concreto.

Para garantir a imobilidade do molde cilíndrico, este foi fixado à mesa vibratória, por meio de barras parafusadas em cantoneiras soldadas nas laterais da mesa.

Neste procedimento utilizou-se uma mesa vibratória marca *Trillor Montana* e para a mistura dos materiais, uma betoneira de eixo inclinado, marca *Menegotti*, com capacidade de 120 litros.



FIGURA 3.16 - SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM POR VIBRO-COMPRESSÃO

3.6.3 Determinação do Tempo de Equivalente de Moldagem

Com o concreto dosado de acordo com o traço pré-estabelecido e o teor de umidade da mistura aferido na produção dos blocos, passou-se há analisar o tempo necessário para a moldagem na mesa vibratória e com a massa de 10,5 kg, de forma a obter-se um concreto, com massa específica igual a do concreto produzido na vibroprensa. Para tanto foram produzidos corpos de prova com traço 1:10, com umidade de moldagem igual a 6,0%, e com tempos de vibro-compactação de 5s, 10s, 15s, 20s, 25s, 30s, 35s, 40s, 50s, e 60s.

Em função das características físicas e mecânicas do concreto produzido com o sistema alternativo de vibro-compressão, puderam-se estabelecer funções matemáticas para determinação dos tempos de moldagem equivalentes para produção em laboratório, de corpos-de-prova cilíndricos com as mesmas características dos blocos produzidos em fábrica. Este tempo foi então adotado para a 5ª Fase do estudo.



FIGURA 3.17 - CORPOS-DE-PROVA PRODUZIDOS COM DIFERENTES TEMPOS DE MOLDAGEM NO SISTEMA ALTERNATIVO DE VIBRO-COMPRESSÃO

Determinação do tamanho ótimo da amostra

Para determinação da amostra mínima produzida pelo sistema alternativo de moldagem de corpos-de-prova cilíndricos por vibro-compressão, a ser ensaiada e verificação da normalidade da distribuição e confiabilidade dos resultados, inicialmente foram moldados 30 corpos-de-prova com compósito cimento-madeira (resíduo de *Pinus-spp in natura*), e posterior rompimento à compressão aos 7 dias de idade. Uma vez comprovada a normalidade da distribuição dos dados, calculou-se o tamanho da amostra, conforme a equação apresentada em 3.3.2.5.

Número de Corpos-de-prova e características determinadas

Nesta Fase da pesquisa foram moldados com o sistema alternativo de vibro compressão, 90 corpos-de-prova, sendo 10 para cada tempo de moldagem estabelecido (5 CP para determinação das características físicas do material e 5 CP para determinação da resistência à compressão).

Os corpos-de-prova produzidos pelo sistema alternativo de moldagem por vibro-compressão forma desmoldados e curados conforme preconiza a NBR 5.738 (2003), ou seja, após moldados os corpos-de-prova ficaram no interior dos moldes por um período de cura inicial de 24 horas, sem serem movimentados para evitar a incidência de fissuras, com suas superfícies protegidas por placas de vidro ou acrílico.

Após o período de cura inicial, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e acondicionados em câmara úmida até datas de ensaio.

A massa específica do concreto fresco foi determinada com base na diferença de massa do material produzido em cada tempo de moldagem e a massa do molde vazio.

As características físicas no estado endurecido do concreto produzido com o sistema alternativo de moldagem foram determinadas conforme determina a NBR 9.778 (2005).

Para redução do tempo de tomada de decisão, optou-se pela análise da resistência à compressão dos corpos-de-prova somente aos 7 dias de idade, determinada conforme norma NBR 7.215 (1997).

Após determinado o Tempo Equivalente de Moldagem, produziram-se 28 corpos-de-prova, para determinação das características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade) e comparação com as características apresentadas pelos blocos de concreto produzidos em fábrica.

3.7 5ª FASE - ESTUDO DE DOSAGENS COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR SERRAGEM DE *PINUS SP*

Nesta Fase da pesquisa, com o tempo de moldagem com o sistema alternativo determinado da 4ª. Fase do estudo procurou-se investigar a possibilidade de substituição máxima do agregado miúdo mineral, pelo resíduo de *Pinus spp.*

Para possibilitar esta análise, seguiram-se as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 3.18.

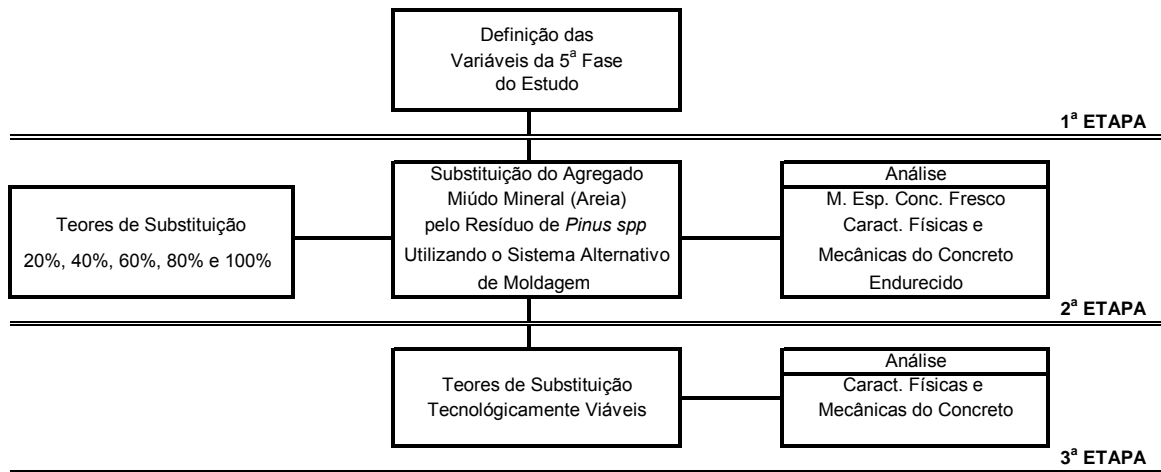


FIGURA 3.18 - FLUXOGRAMA DA 5ª FASE DA PESQUISA

Esta Fase da pesquisa apresenta as seguintes variáveis independentes:

- a- Teor de substituição do agregado miúdo convencional pelo resíduo de *Pinus spp*.
- b- Uso ou não de pré-tratamento;
- c- Teor de aditivo acelerador de pega.

As variáveis dependentes, por sua vez, são as características apresentadas pelo compósito, em estado fresco e endurecido, que são:

- a- Características físicas: massa específica no estado fresco e endurecido, índice de vazios e absorção de água, no estado endurecido, conforme NBR 9.778 (2005);
- b- Características mecânicas: resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade, conforme NBR 7.215 (1997) e a determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade, conforme NBR 7.222 (1994).

3.7.1 Características Analisadas e Número de Corpos-de-Prova

Para o desenvolvimento desta etapa do estudo, foram moldados inicialmente, com o sistema alternativo de moldagem, traços com substituições em volume do agregado miúdo convencional por 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de resíduo de *Pinus spp* sem tratamento (*in natura*), sem tratamento (*in natura*) e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com pré-tratamento AF-48H e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Foram produzidos 180 corpos-de-prova, sendo 10 CP para cada teor de substituição e para cada um dos três tipos de serragem investigadas (resíduo *in natura*, *in natura* + 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com pré-tratamento AF-48H + 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sendo que destes, 5 CP foram ensaiados para determinação das características físicas do concreto endurecido e 5 CP para determinação da resistência à compressão aos 7 dias de idade.

Após determinação, dos teores máximos de substituição do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, através de regressão simples, foram produzidos mais 72 corpos-de-prova, sendo 24 para cada tipo de resíduo (4 CP para determinação das características físicas no estado endurecido e 20 CP para determinação das características mecânicas, sendo 4 CP para determinação da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade e 4 CP para a determinação da resistência à tração por compressão diametral).

Para a desmoldagem e cura do concreto, seguiram-se os procedimentos indicados na NBR 5.738 (1994), e para determinação das características físicas e mecânicas, seguiram-se as normas NBR 7.215 (1997) e NBR 9.778 (2005).

As características mecânicas foram determinadas na máquina de ensaio já descrita na 1ª Fase do estudo.

3.8 6ª FASE – PRODUÇÃO TESTE DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

A produção dos protótipos em fábrica, que caracteriza a 6ª. Fase deste estudo foi realizada de acordo com as etapas apresentadas no fluxograma apresentado na Figura 3.19.

Esta fase da pesquisa apresenta as seguintes variáveis.

Variáveis independentes:

a- Composição do Material;

Variáveis dependentes:

b- Características Físicas;

c- Características Mecânicas;

d- Características Térmicas do Material;

e- Custos

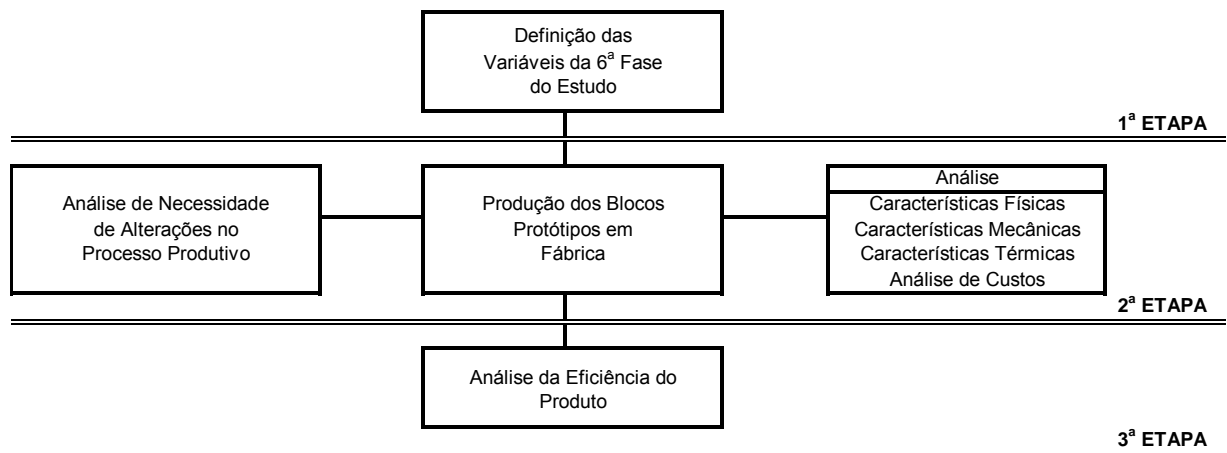


FIGURA 3.19 - FLUXOGRAMA DA 6ª FASE DA PESQUISA

3.8.1 Produção dos Blocos Protótipos

Foram produzidos 300 blocos protótipos, sendo 30 para cada série abaixo relacionada:

- **Série 1** – Concreto traço 1:10, com materiais convencionais, cujos valores foram adotados como confirmar os valores dos blocos de referência produzidos na 3ª. Fase do estudo;
- **Série 2** – Concreto traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, sem pré-tratamento (*in natura*) e sem aditivo acelerador de pega;
- **Série 3** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, sem pré-tratamento (*in natura*), mas com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- **Série 4** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- **Série 5** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 10% do cimento Portland substituído por Sílica Ativa, com 0,6% de aditivo superplastificante e sem aditivo acelerador de pega;
- **Série 6** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 10% do cimento Portland substituído por Metacaulim, com 1,1% de aditivo superplastificante e sem aditivo acelerador de pega;
- **Série 7** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 5% do cimento Portland substituído por Resíduo de Cerâmica Calcinada, com 0,5% de aditivo superplastificante e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- **Série 8** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 5% do cimento Portland substituído por Cinza Volante, sem aditivo superplastificante e sem aditivo acelerador de pega;
- **Série 9** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 25% do

cimento Portland substituído por Escória de Alto-Forno, sem aditivo superplastificante e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

- **Série 10** – Concreto Traço 1:10, com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H, com 30% do cimento Portland substituído por Cinza de Casca de Arroz, com 2,0% de aditivo Superplastificante e sem aditivo acelerador de pega;



FIGURA 3.20 - BLOCOS PROTÓTIPOS

3.8.2 Alteração dos Parâmetros de Produção

Durante a produção dos blocos com 50% do agregado miúdo convencional substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, verificou-se que os blocos invariavelmente apresentavam trincas (Figura 3.21) o que poderia inviabilizar a produção. Diante deste problema, resolveu-se diminuir a velocidade de desforma, atrasando por alguns segundos o tempo de abertura dos extratores. O aumento de 2 segundos para 5 segundos, se mostrou suficiente para a produção de blocos sem defeitos aparentes.

O aumento de 3 segundos no ciclo de produção não chega a alterar o índice de produtividade, pois como se trata de uma máquina de carregamento manual, este tempo pode ser compensado em outras atividades.



FIGURA 3.21 - TRINCAS EM BLOCOS DEVIDO A VELOCIDADE DE DESFORMA

3.8.3 Determinação das Características Físicas e Mecânicas

Com os blocos produzidos foram investigadas as características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) mediante ensaio de 5 corpos-de-prova para cada composição estudada. De outros 5 blocos de cada composição foram retirados prismas das paredes laterais para ensaio de determinação da retração por secagem.

Para a determinação das características mecânicas, foram ensaiados 16 blocos de cada composição, para a determinação da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade (4 CP para cada idade).

Todos os ensaios seguiram as prescrições constantes da NBR 12.118 (2008).

Os blocos foram produzidos com o mesmo equipamento e no mesmo local que os blocos de referência produzidos na 3ª. Fase deste estudo.

A cura dos blocos produzidos se deu ao ar, em ambiente protegido da insolação direta e molhados diariamente, visando reproduzir as mesmas condições verificadas na empresa de artefatos de concreto.

Equipamentos utilizados

Neste caso, assim como no ensaio para determinação das características mecânicas dos blocos de referência (3ª. Fase), foi utilizada uma máquina de ensaios marca *Emic*, modelo *PC 200*, com dispositivos para ensaio de blocos de concreto e tomada de dados por computador.

Quanto ao ensaio de retração por secagem, conforme permite a NBR 12.118 (2008), os ensaios foram executados com prismas retirados das paredes laterais dos blocos, onde foram fixados pinos de aço, cujas distâncias foram medidas com paquímetro digital, com precisão de 0,0005 polegadas. A leitura das distâncias relativas, entre os pinos de aço, se deu nas seguintes condições de umidade: saturado, seco ao ar e seco em estufa a 50°C, com leituras em períodos de 48 horas, até atingir constância de massa, conforme Figura 3.22.



FIGURA 3.22 - PREPARAÇÃO DOS PRISMAS E ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção – Labmat da UTFPR.

3.8.4 Determinação das Características Térmicas dos Compósitos

Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova para o ensaio de determinação das características térmicas dos concretos para blocos traço 1:10, (prismas 100 x 100 mm) retirados dos blocos mediante corte à seco, conforme apresentado na Figura 3.23.



FIGURA 3.23 – PRISMAS PARA ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Método de Ensaio

A determinação da resistência e da condutividade térmica do compósito e do concreto convencional foi feita, através de técnicas fluxométricas, utilizando um *Condutímetro Fluxométrico*, conforme normas NBR 15.220-4 (2005), em consonância com as normas internacionais ISO/DP 8302 (1991) e ASTM C177 (2004).

A determinação da condutividade térmica por este método, envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova, a partir de um certo fluxo de calor e em condições de regime permanente. A condução unidimensional é conseguida a partir do uso de um anel de guarda, de modo a restringir as perdas laterais de calor e tendo-se o comportamento térmico de uma placa infinita, conforme indicado na Figura 3.24.

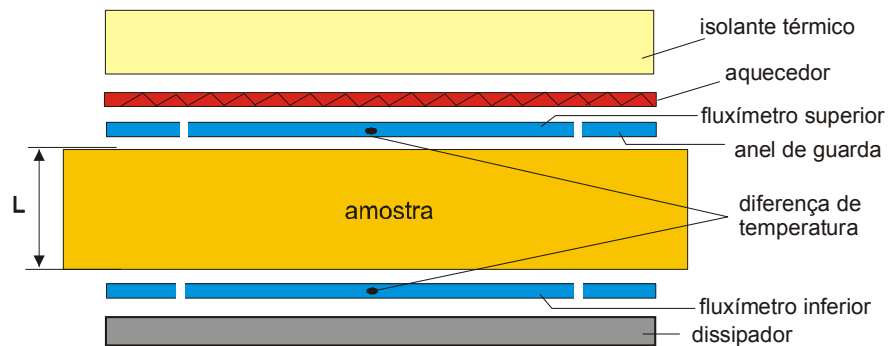


FIGURA 3.24 - ESQUEMA DO FLUXÍMETRO TIPO PLACA QUENTE PROTEGIDA
Fonte: NBR 12.094 (1991)

A resistência térmica é determinada a partir de lei de Fourier, de acordo com a expressão:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)} \quad (17)$$

Onde: R = Resistência térmica (m^2K/W);
 q_1 e q_2 = Densidade de fluxo de calor medido pelos fluxímetros (W/m^2);
 T_1 e T_2 = Temperatura nas superfícies da amostra (K).

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material, através da equação:

$$\lambda = \frac{e}{R} \quad (18)$$

Onde: λ = Condutividade térmica ($W/m.K$);
 e = Espessura da amostra (m).

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

3.8.5 Análise da Eficiência dos Blocos Protótipos

A análise da eficiência do material proposto foi determinada pelo critério de avaliação pelo método comparativo, conforme FICKER (2005) e NBR 14.653 (2001). Para tanto, as características físicas, mecânicas, econômicas e ambientais dos blocos protótipos, foram considerados atributos comparáveis às mesmas características dos blocos de concreto produzidos com os materiais convencionais.

A reciclagem de um material deve ser economicamente viável. Diante desta afirmação, procurou-se demonstrar a viabilidade econômica de uso do material, comparando os custos de produção dos blocos de referência, traço 1:10, com o custo para a produção dos blocos protótipos, traço 1:10, porém com as substituições do

agregado miúdo convencional pelo resíduo de *Pinus spp* e pelas substituições parciais do cimento Portland pelos seis materiais cimentícios alternativos, considerando a necessidade do uso de aditivos químicos, custo de preparação e transporte dos resíduos, entre outros.

O desempenho ambiental dos blocos protótipos foi determinado com base nos teores de substituição do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* e pelos teores de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, por cada um dos seis materiais cimentícios alternativos utilizados.

Os valores foram comparados com os praticados no mercado da cidade de Curitiba (PR), para a o mês de setembro de 2009.

O Índice de Eficiência foi, então, determinado com base na variação proporcional das características físicas, mecânicas, econômicas e ambientais do bloco de referência e dos blocos protótipos.

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA), através do *software Statgraphics® Plus 4.1*

Uma vez que as variâncias apresentassem diferenças significativas, é importante determinar quais grupos de médias, em particular, são importantes. Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento para comparação de médias de *Tukey-Kramer*, determinado mediante o uso do mesmo *software*.

Conforme LEVINE (1998), para o desenvolvimento de modelos estatísticos que possam ser utilizados para previsão de valores de uma variável dependente ou variável resposta, com base nos valores de pelo menos uma ou mais variáveis independentes ou explicativas, utilizaram-se técnicas de regressão simples e múltiplas. Neste trabalho, as regressões simples foram determinadas com o *software MS Excel®*, e as regressões múltiplas e seus testes de significância, através do *software Infer® 3*.

Com base nas expressões obtidas com as regressões simples e múltiplas, obteve-se a otimização dos teores, composições e métodos estudados nesta pesquisa, através de programas de simulação desenvolvidos pelo autor em linguagem computacional e conferidos pela rotina *Solver* do *software MS Excel*[®].

Para apresentação gráfica das regressões simples (2D) utilizou-se nesta pesquisa o *software MS Excel*[®], e para as regressões múltiplas (3D), foi utilizado o *software Statistica*[®] 6.0.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelas séries de ensaios realizados durante o programa experimental, e analisados em função das propriedades do material e dos parâmetros de qualidade, impostos pela comparação com materiais similares de uso corrente e pela normalização brasileira, para qualificação do produto.

Para tornar mais fácil a análise dos resultados, subdividiu-se a apresentação de acordo com as 6 Fases do estudo, sendo assim, têm-se:

- *Resultados da 1ª Fase* - Estudo Preliminar: Caracterização dos materiais utilizados e Análise da Interação entre o Cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp*;
- *Resultados da 2ª Fase* - Análise das substituições parciais do cimento Portland do compósito cimento-madeira por materiais cimentícios alternativos;
- *Resultados da 3ª Fase* - Produção dos blocos de concreto de referência;
- *Resultados da 4ª Fase* - Desenvolvimento do sistema alternativo de moldagem por vibro-compressão;
- *Resultados da 5ª Fase* - Análise da substituição parcial do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, no traço para produção de blocos;
- *Resultados da 6ª Fase* - Resultados dos blocos protótipos;

4.1 RESULTADOS DA 1ª FASE DA PESQUISA - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E O RESÍDUO DE *PINUS spp*

4.1.1 Caracterização dos Materiais Utilizados na Pesquisa

Os materiais utilizados foram caracterizados através de ensaios padronizados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, ou, na falta

destas, por normalização estrangeira, e se encontram elencados ao longo deste item, subdividido pelo tipo do material.

Aglomerante

Como aglomerante, em toda a pesquisa, foi utilizado o Cimento Portland, tipo *CPVARI-RS*, (Alta Resistência Inicial – Resistente a Sulfatos), cujas características físicas, determinadas conforme NBR 9.778 (2005), são apresentadas na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2, são apresentadas as características mecânicas do cimento, determinadas de acordo com a NBR 7.215 (1996) e NBR 7.222 (1994).

TABELA 4.1 – CIMENTO PORTLAND CPV ARI RS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CONFORME NBR 9.778 (2005)

Cimento	Massa Específica (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
CPV ARI RS	2.145,93	0,72	15,02	1,73	7,00	1,59

Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação

TABELA 4.2 - CIMENTO PORTLAND CPV ARI RS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS CONFORME NBR 7.215 (1996) E NBR 7.222 (1994)

Cimento	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)			
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
CPV ARI RS	28,79	2,98	39,28	2,61	52,31	2,64	55,05	3,51	3,79	1,27

Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração obtida por Compressão Diametral

As características mecânicas, principalmente a resistência à compressão resultaram acima dos limites mínimos especificados na NBR 5.733 (1991), o que evidencia a boa qualidade do cimento utilizado.

Resíduo de Pinus spp

O resíduo de *Pinus spp* classificada em duas granulometrias, através de peneiramento, apresenta as características constantes da Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE *PINUS spp*

Características	Norma - Método de Ensaio	D.Máx = 2,4 mm		D.Máx = 4,8 mm	
Físicas					
Massa Específica Absoluta U = 0% (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)*	1,28		1,28	
Massa Específica Absoluta U = 15% (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)*	1,22		1,22	
Massa Unitária U = 0% (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)*	0,17		0,17	
Massa Unitária U = 15% (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)*	0,20		0,19	
Massa Unitária (Madeira Sólida) U = 0% (g/cm ³)	NBR 7.190 (1997)	0,41		0,41	
Massa Unitária (Madeira Sólida) U = 15% (g/cm ³)	NBR 7.190 (1997)	0,47		0,47	
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (2008)*	2,40		4,80	
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2008)*	3,16		3,25	
Teor de Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (2003)*	0,20		0,27	
Equivalente Agregado Miúdo (%)	NBR NM 248 (2008)*	99,80		99,73	
Equivalente Agregado Graúdo (%)	NBR NM 248 (2008)*	-		-	
Absorção de Água (%)	NBR 7.190 (1997)	129,62		129,62	
Coefficiente de Inchamento Médio (%)	NBR 7.190 (1997)	7,79		7,79	
Químicas					
Extrativos Totais (%)	TAPPI 257 (2004)	2,4219		2,4219	
pH	TAPPI 257 (2004)	5,07		5,07	
Classificação	NBR NM 248 (2008)*	Equivalente Zona - 3 ABNT		Equivalente Zona - 3 ABNT	

* Adaptação da norma para especificação de agregados minerais

Para a determinação da massa específica absoluta da serragem, utilizou-se um frasco de *Chapman*, conforme NBR NM 52 (2003), sendo que o método foi adaptado para ensaio do resíduo de *Pinus spp*, conforme apresentado no Capítulo 3.

A distribuição granulométrica do resíduo de *Pinus spp*, já selecionados nas DMáx = 2,4 mm e 4,8 mm, encontram-se apresentadas da Figura 4.1.

A distribuição granulométrica caracteriza o resíduo de *Pinus spp*, na mesma faixa de um agregado miúdo convencional de granulometria média e, como pode ser observado na Figura 4.1, ambas as frações, com D_{máx} de 2,4 mm e 4,8 mm, apresentam granulometria contínua e praticamente equivalente. Tanto a massa específica quanto sua massa unitária, caracterizam o resíduo de *Pinus spp* como um agregado leve ($\gamma < 2,00 \text{ kg/dm}^3$). A alta absorção de água e o coeficiente de inchamento médio da madeira se apresentam muito acima dos valores para agregados convencionais, tradicionalmente utilizados na produção de concretos e argamassa, o que pode causar grandes problemas quanto à correção da umidade de dosagem e fissuração por variação dimensional do compósito no estado fresco.

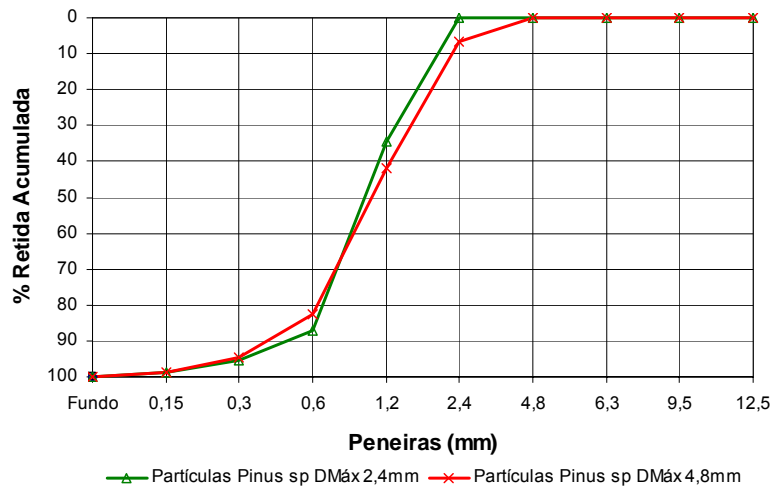


FIGURA 4.1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO DE *PINUS spp*

Areia Padronizada

Na produção da argamassa padrão de cimento Portland CPV-ARI-RS, conforme a NBR 7.215 (1991), utilizou-se 4 frações de areia normalizada, com dimensões máximas características iguais a 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm e 1,20 mm. Este material foi adquirido do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT.

Agregado Miúdo Mineral

O agregado miúdo utilizado classifica-se como Areia Média, e suas características físicas são apresentadas na Tabela 4.4. Os resultados da caracterização do agregado miúdo mineral demonstram tratar-se de uma areia quartzosa, de granulometria média, sem finos ou material pulverulento ($D_{máx} < 75 \mu m$), nem substância nocivas acima dos limites da NBR 7.211 (2005), que pudessem impedir seu emprego na produção de concretos ou argamassas.

TABELA 4.4 - AGREGADO MIÚDO MINERAL – CARACTERIZAÇÃO

Características	Norma	Resultado
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)	2,64
Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 52 (2003)	1,56
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (2008)	4,80
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2008)	2,92
Teor de Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (2003)	1,08
Agregado Miúdo (%)	NBR NM 248 (2008)	96,82
Agregado Graúdo (%)	NBR NM 248 (2008)	2,10
Teor de Argila em Torrões (%)	NBR 7218 (1987)	0,00
Teor de Matéria Orgânica (ppm)	NBR NM 49 (2001)	< 100,00
Absorção de Água (%)	NBR NM 30 (2001)	1,47
Coefficiente de Inchamento Médio	NBR 6467 (2006)	1,44
Teor de Umidade Crítica (%)	NBR 6467 (2006)	5,00
Classificação	NBR 7211 (2008)	Areia Média Zona - 3 ABNT

Agregado Graúdo Mineral

O agregado graúdo, de acordo com a caracterização apresentada na Tabela 4.5, se apresenta como uma mistura de Brita 0 e Pó de Pedra, material comumente utilizado para a produção de artefatos de concreto na região de Curitiba.

TABELA 4.5 - AGREGADO GRAÚDO MINERAL – CARACTERIZAÇÃO

Características	Norma	Resultado
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (2003)	2,70
Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 53 (2003)	1,52
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (2008)	9,50
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2008)	5,67
Teor de Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (2003)	0,25
Agregado Miúdo (%)	NBR NM 248 (2008)	7,05
Agregado Graúdo (%)	NBR NM 248 (2008)	92,70
Teor de Argila em Torrões (%)	NBR 7218 (1987)	0,00
Teor de Matéria Orgânica (ppm)	NBR NM 49 (2001)	0,00
Absorção de Água (%)	NBR NM 53 (2003)	0,80
Classificação	NBR 7211 (2008)	Brita 0

O agregado graúdo se apresenta como pedra britada n° 0, de origem granítica e sem substâncias nocivas que sua utilização.

As distribuições granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, utilizados neste trabalho, são apresentadas na Figura 4.2.

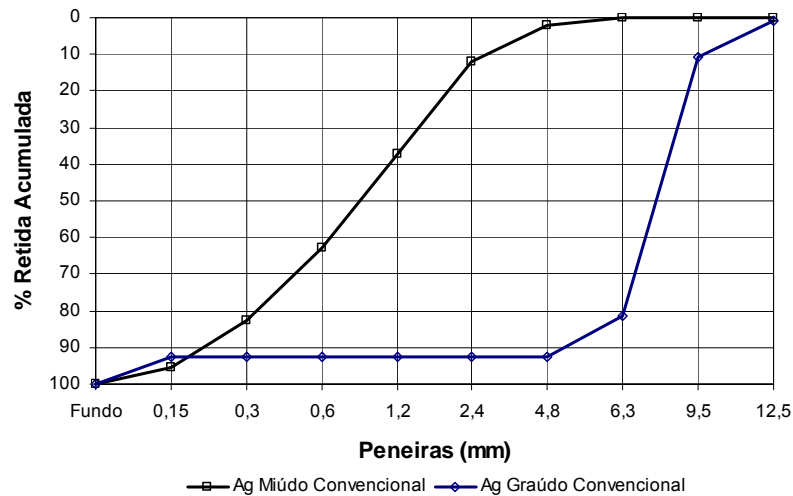


FIGURA 4.2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS CONVENCIONAIS

Água de Amassamento

Foi utilizada água potável, da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar.

4.1.2 Caracterização dos Materiais Cimentícios Alternativos

Caracterização por Fluorescência de Raios X

Os materiais cimentícios alternativos utilizadas nesta pesquisa como substituições parciais ao cimento Portland CPV ARI RS, apresentaram as características químicas e físicas demonstradas na Tabela 4.6.

Como esperado, os materiais submetidos à fluorescência de raios-x apresentaram grandes quantidades de SiO_2 e, com exceção da sílica ativa e na cinza de casca de arroz, de Al_2O_3 . Todos os materiais ensaiados apresentaram teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ acima do limite de 50 %, imposto pela NBR 12.653 (1992), para enquadramento de pozolanas nas classes N, C e E. Os teores de SO_3 e Na_2O_3 , também se apresentaram abaixo dos limites impostos pela norma brasileira.

TABELA 4.6 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS

Características	Unidade	Sílica Ativa	Metacaulim	Escória de Alto-Forno	Cinza Volante	Cinza de Casca de Arroz	Res. De Cerâmica Calcinada
Químicas							
SiO ₂	%	95,800	52,750	37,398	59,050	70,562	58,260
Al ₂ O ₃	%	0,070	35,660	12,936	25,980	0,168	25,239
Fe ₂ O ₃	%	0,060	4,090	0,722	5,210	0,148	7,487
CaO	%	0,230	0,030	39,565	0,400	0,203	0,175
MgO	%	0,480	0,650	4,786	0,470	0,025	0,171
K ₂ O	%	0,670	0,940	0,544	2,790	0,029	0,286
Na ₂ O	%	0,180	0,030	0,249	0,070	-	-
TiO ₂	%	-	0,870	0,784	-	-	0,901
SO ₃	%	-	-	1,924	-	0,400	0,046
Perda ao Fogo	%	-	2,910	-	5,410	-	-
H ₂ O	%	0,290	-	-	-	-	-
CO ₂	%	-	-	-	28,700	-	7,260
Físicas							
Material Retido # 325	%	1,10	3,30	7,80	46,80	0,85	0,73
Sup. Específica (Blaine)	cm ² /g	220.000,00*	300.000,00*	6.800,00	2.710,00	14.780,00	14.950,00
ME Absoluta	g/cm ³	2,19	2,55	2,92	2,06	2,02	2,61

Caraterísticas Químicas determinadas por Fluorescência de Raios X; * Superfícies Específicas da Sílica Ativa e do Metacaulim determinadas por BET (Informadas pelos Fabricantes)

A perda ao fogo residual, determinada para o metacaulim e para a cinza volante, indica a presença de material não totalmente calcinado, fato que pode ser considerado normal tendo em vista o processo industrial em larga escala. Este valor, abaixo do limite de 6% a 10%, conforme NBR 12.653 (1992), não deve afetar o desempenho dos materiais como aglomerante alternativo.

A superfície específica dos materiais foi determinada através de permeabilidade ao ar, conforme NBR NM 76 (1998), e se encontram dentro dos valores médios para uso como materiais cimentícios alternativos. A superfície específica da sílica ativa e do metacaulim foi determinado por adsorção de nitrogênio, e foram informadas pelos fabricantes.

A massa específica dos materiais cimentícios alternativos foi determinada conforme NBR NM 76 (1998) e apresentam valores dentro das médias esperadas, sendo que o metacaulim, a escória de alto-forno e o resíduo de cerâmica calcinada, apresentam massa específica maiores que os demais devido à presença de teores maiores de Fe₂O₃ e TiO₂.

Identificação de Fases - Difractometria de Raios X

Na Figura 4.3 são apresentados os difratogramas de raios x de amostras dos seis materiais cimentícios alternativos. O comprimento de onda (λ) utilizado foi de 1,54060 Å. A análise dos difratogramas pode a princípio, se tornar complexa devido à presença de raios coincidentes originadas de múltiplos minerais, mesmo que em baixas concentrações.

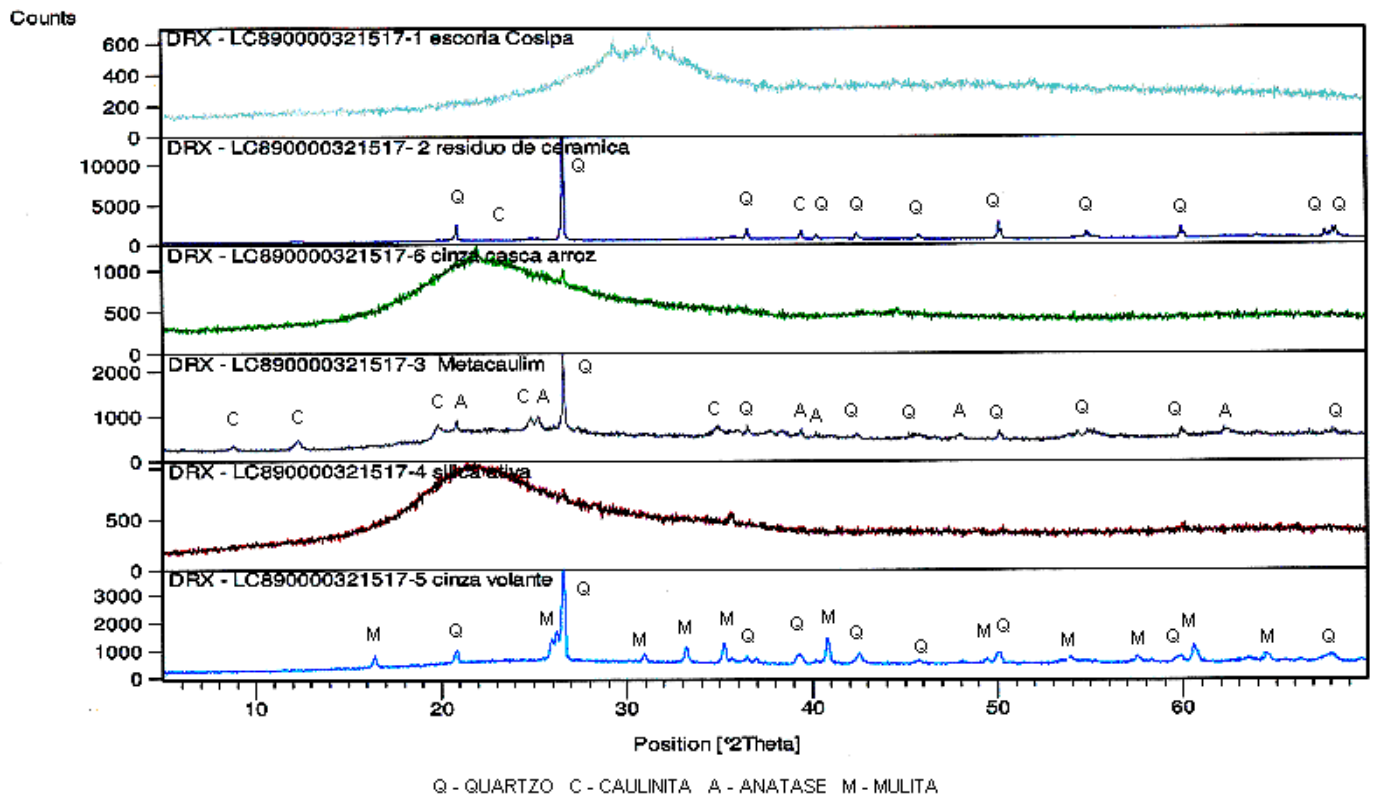


FIGURA 4.3 - MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS - DIFRATOGRAMAS DE RAOS X

Nos difratogramas apresentados foram identificados apenas os principais minerais de fase cristalina, comparando-se os ângulos 2 Teta dos picos presentes com padrões do *JPDS – Joint Committe on Powder Diffraction*, atualmente designado por *ICDD – Internacional Centre os Diffraction Data*.

A sílica ativa, a escória de alto-forno e a cinza de casca de arroz apresentaram fase totalmente amorfa, ou seja, não apresentaram nenhum pico bem definido no difratograma, apenas uma curva suave com alto teor de “ruído”, denominado halo amórfico. Esta característica era esperada, para que estes materiais pudessem ser utilizados como substituição parcial ao cimento Portland.

O metacaulim, o resíduo de cerâmica calcinada e a cinza volante, apresentaram picos facilmente identificáveis, indicando a presença de:

- Metacaulim: Quartzo (SiO_2); Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Anatase (TiO_2);
- Resíduo de cerâmica calcinada: Quartzo (SiO_2) e Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$);
- Cinza Volante: Quartzo (SiO_2) e Mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Determinação da Atividade Pozolânica

Conforme se verifica na Tabela 4.7, a sílica ativa, o metacaulim e a escória de alto-forno atingiram a resistência mínima de 6,0 MPa, que denota a atividade suficiente para serem classificados como materiais pozolânicos. A cinza volante, o resíduo de cerâmica calcinada e a cinza de casca de arroz, por sua vez, apresentaram resultados abaixo do limite especificado pela norma NBR 12.653 (1992). Porém, deve-se considerar que a cinza volante é um material cimentício alternativo comumente utilizado na produção dos cimentos Portland tipo CP II – Z, conforme NBR 11.578 (1991), que permite até 14% de substituição do clínquer e do cimento Portland tipo CP IV, onde a NBR 5.736 (1991), permite até 50% de substituição.

Quanto a cinza de casca de arroz e o resíduo de cerâmica calcinada, não há normalização pertinente quanto à utilização como materiais substituintes ao cimento Portland, porém, diversas pesquisas apontam a viabilidade do emprego em teores de até 40% (CCA) e 20% (RCC), respectivamente.

TABELA 4.7 - MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Material	RC 7d (MPa)	CV (%)
Sílica Ativa	7,40 ^C	1,35
Matacaulim	12,20 ^A	1,42
Cinza Volante	4,63 ^D	4,49
Escória de Alto Forno	11,47 ^B	2,19
Resíduo de Cerâmica Calcinada	4,03 ^E	3,79
Cinza de Casca de Arroz	4,30 ^E	2,33

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre médias ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 3 repetições; CV = Coeficiente de Variação

4.1.3 Determinação da Influência do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{\text{máx}}$ do Resíduo de *Pinus spp*, na Hidratação do Cimento Portland

Na Tabela 4.8 são apresentadas às temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) e o tempo para tal temperatura ser atingida, determinados para as reações de hidratação do compósito produzido com cimento Portland CPV ARI RS e o resíduo de *Pinus spp*, em função da variação do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Nesta primeira análise, utilizou-se o resíduo de *Pinus spp*, seco em estufa e com granulometria contínua, com maior dimensão máxima que conferisse granulometria compatível com um agregado miúdo convencional ($D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$).

Analisando os valores de $T_{\text{máx}}$ determinadas, verifica-se:

- Nenhuma temperatura medida nos compósitos atingiu a $T_{\text{máx}}$ determinada para a argamassa padrão de cimento Portland (96,04 °C);
- A $T_{\text{máx}}$ mais baixa foi determinada para o compósito sem adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- Não se verificaram diferenças estatísticas significativas a 95% de confiança para as $T_{\text{máx}}$ determinadas para as misturas com teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 2,0%, 4,0% e 6,0%, bem como entre as misturas contendo 4,0%, 6,0% e 8,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

- Constatou-se que o resíduo de *Pinus spp* é compatível com o cimento Portland CPV ARI RS, visto que:
 - A temperatura máxima atingida pelo compósito sem adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($70,72^\circ\text{C}$) confere ao resíduo de *Pinus spp* a condição de espécie vegetal altamente compatível com o cimento, de acordo com o critério de SANDERMANN e KHOLER (1964), cujo parâmetro é $T_{\text{máx}} > 60^\circ\text{C}$;
 - Pelo critério de HOFSTRAND et al. (1984), o índice de inibição, $\text{IC} = 13,4419$, indica, também, para o resíduo de *Pinus spp*, a condição de espécie vegetal não inibitória ($\text{IC} < 30$).

TABELA 4.8 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE CaCl_2 NA TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CPV ARI RS EM COMPÓSITOS COM 13,33 % DE RESÍDUO DE *PINUS spp*

Teor de CaCl_2	$T_{\text{máx}}$ ($^\circ\text{C}$)	CV (%)	Tempo para $T_{\text{máx}}$ (h)	CV (%)
CPV ARI RS	96,04* A	1,44	3,10* D	3,23
Mad in Natura	70,72* D	2,29	7,63* A	3,30
Mad in Natura + 2,0% CaCl_2	75,01* C	0,75	7,46* A	2,05
Mad in Natura + 4,0% CaCl_2	76,33** BC	2,80	4,45** C	6,74
Mad in Natura + 6,0% CaCl_2	77,23** BC	2,92	4,80** B	2,95
Mad in Natura + 8,0% CaCl_2	78,51** B	2,44	2,93** D	1,71

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança;

* Médias obtidas de 3 medições; ** Médias obtidas de 4 medições; CV = Coeficiente de Variação;

Quanto ao tempo para atingir a $T_{\text{máx}}$, verifica-se que quanto maior o teor de adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, menores os tempos para $T_{\text{máx}}$, sendo que não se verificam diferenças significativas, entre a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS e o compósito com 8,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que por sinal, apresentou, também a maior $T_{\text{máx}}$ ($78,51^\circ\text{C}$) . Esta análise preliminar poderia sugerir o teor ideal de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 8,0%, porém, tal condição deve ser confirmada através da determinação das características físicas e mecânicas dos compósitos.

As curvas de hidratação ao longo do tempo da argamassa padrão de cimento Portland e do compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*, tomadas como referências, são apresentadas na Figura 4.4(A), onde pode ser verificado nitidamente o efeito inibitório do resíduo de *Pinus spp* às reações de hidratação do cimento Portland, através da diferença da $T_{m\acute{a}x}$ determinada para os dois compósitos (diferença de $25,32^{\circ}\text{C}$) e do tempo para atingir o pico de temperatura (4 horas e 32 minutos). As curvas de hidratação desenvolvidas pelos compósitos com as adições de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, além das duas curvas de referência, são apresentadas na Figura 4.4(B). Neste segundo gráfico, fica evidente o efeito do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tanto em prover aumentos significativos da $T_{m\acute{a}x}$, quanto em reduzir o tempo para o pico de temperatura.

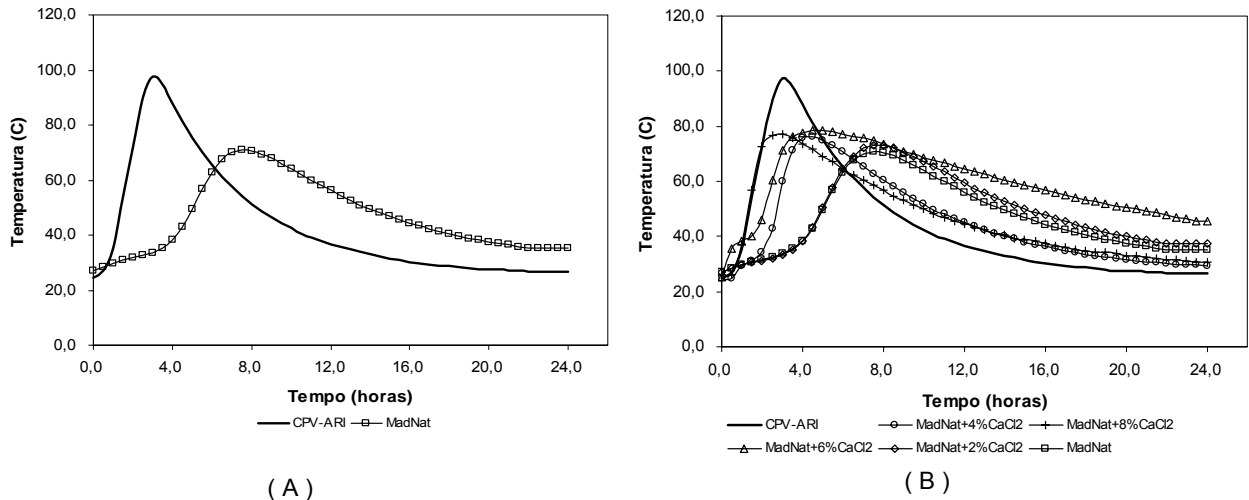


FIGURA 4.4 - CURVAS DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS

4.1.4 Determinação da Influência do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{m\acute{a}x}$ do Resíduo de *Pinus spp*, na Hidratação do Cimento Portland nas Características Físicas e Mecânicas do Compósito

Influência Sobre as Características Físicas

Nesta Fase do estudo, para determinação da amostra mínima que conferisse confiabilidade estatística aos resultados, foram moldados 30 corpos-de-prova do compósito, com o resíduo de *Pinus spp in natura* e com a maior $D_{m\acute{a}x}$ que o situasse

na faixa granulométrica relativa a agregados miúdos (4,8 mm). Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão com 7 dias de idade, resultando numa RC 7d média de 20,56 MPa, desvio padrão de 1,76 MPa e coeficiente de variação de 8,58%. Com esses valores, determinou-se que a amostra mínima poderia ser de até 3,0 CP, porém adotou-se, um valor mínimo de 4,0 CP.

Na Tabela 4.9 apresentam-se as características físicas dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp*, com granulometrias de $D_{máx} = 2,4$ mm e 4,8 mm. A apresentação procura comparar as características de cada compósito, em função do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizado.

TABELA 4.9 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE *PINUS spp* COM $D_{MÁX} = 2,4$ mm E 4,8 mm – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO

D Máx Partícula (mm) e Teor de CaCl_2 (%)	Massa Específica (kg/m^3)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
Mad 2,4 mm + 0,0% CaCl_2	1.437,53 ^B	0,45	38,56 ^A	1,15	26,82 ^A	1,36
Mad 4,8 mm + 0,0% CaCl_2	1.471,10 ^A	0,62	38,98 ^A	0,74	26,50 ^A	0,79
Mad 2,4 mm + 2,0% CaCl_2	1.488,17 ^B	1,09	35,57 ^A	3,47	23,91 ^A	2,86
Mad 4,8 mm + 2,0% CaCl_2	1.526,92 ^A	0,85	30,92 ^B	1,08	20,25 ^B	1,10
Mad 2,4 mm + 4,0% CaCl_2	1.491,19 ^B	0,68	38,38 ^A	0,94	25,74 ^A	1,49
Mad 4,8 mm + 4,0% CaCl_2	1.538,13 ^A	0,52	35,62 ^B	0,99	23,16 ^B	1,46
Mad 2,4 mm + 6,0% CaCl_2	1.560,68 ^A	1,00	34,88 ^A	2,24	22,35 ^A	1,60
Mad 4,8 mm + 6,0% CaCl_2	1.526,65 ^B	0,64	34,38 ^A	1,43	22,52 ^A	1,80
Mad 2,4 mm + 8,0% CaCl_2	1.564,15 ^A	0,16	35,76 ^B	3,23	22,86 ^B	3,25
Mad 4,8 mm + 8,0% CaCl_2	1.479,38 ^B	1,23	41,86 ^A	2,11	28,31 ^A	3,30

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CaCl_2 = Aditivo acelerador de pega (Cloro de Cálcio Bi-Hidratado)

Analisando os valores apresentados, verifica-se:

- As massas específicas dos compósitos produzidos com granulometrias diferentes, apresentam diferenças estatisticamente significativas a 95% de confiança, para todos os teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizados;
- Quanto ao índice de vazios (porosidade) e absorção de água, não verificaram diferenças significativas entre os compósitos produzidos sem

adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com adição de 6,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, apresentando diferenças significativas para os demais.

Na Figura 4.5, as características físicas dos compósitos, em função da granulometria do resíduo de *Pinus spp* e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizados, são apresentados em gráficos de barras.

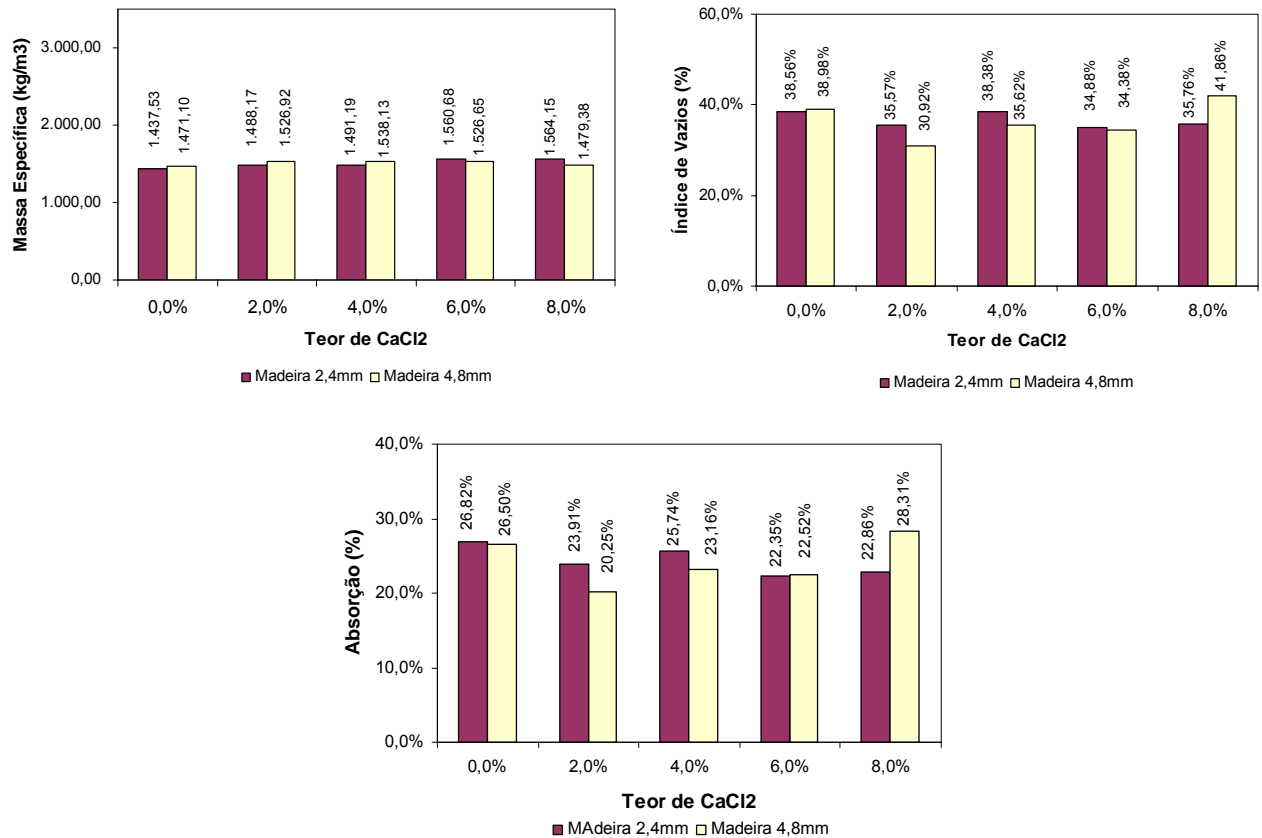


FIGURA 4.5 - INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE CaCl_2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPOSITO

Influência sobre as Características Mecânicas

Quanto às características mecânicas, apresentadas na Tabela 4.10, não se verificaram diferenças estatísticas significativas a 95% de confiança, entre os compósitos produzidos com as duas granulometrias do resíduo de *Pinus spp*, em função do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizados, apenas nas seguintes situações:

- Resistência à compressão aos 3 dias de idade, entre os compósitos produzidos com 2,0% e 4,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- Resistência à compressão aos 28 dias de idade, para os compósitos produzidos sem adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com 2,0%;
- Resistência à tração, determinada por compressão diametral, dos compósitos produzidos com adição de 2,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

Todos os demais compósitos, produzidos com o resíduo de *Pinus spp*, com $D_{\text{máx}} = 2,4$ mm e 4,8 mm, apresentaram diferenças estatísticas significativas ao nível de 95% de confiança, para as características mecânicas testadas.

TABELA 4.10 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ EM COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE *PINUS spp* COM $D_{\text{MÁX}} = 2,4$ mm E 4,8 mm – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO

D Máx Partícula (mm) e Teor de CaCl_2 (%)	Resistência à Compressão (MPa)				Resist. Tração (MPa)			
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
Mad 2,4 mm + 0,0% CaCl_2	20,10 ^A	3,50	21,82 ^A	3,70	25,53 ^A	2,99	2,05 ^A	1,14
Mad 4,8 mm + 0,0% CaCl_2	18,01 ^B	4,46	20,01 ^B	4,99	24,59 ^A	1,29	1,95 ^B	2,33
Mad 2,4 mm + 2,0% CaCl_2	23,16 ^A	3,40	30,90 ^A	2,12	34,52 ^A	2,92	2,79 ^A	1,27
Mad 4,8 mm + 2,0% CaCl_2	21,98 ^A	3,16	27,09 ^B	1,90	34,82 ^A	3,45	2,76 ^A	2,32
Mad 2,4 mm + 4,0% CaCl_2	23,94 ^A	5,70	27,34 ^B	2,31	35,47 ^B	3,58	2,40 ^B	1,67
Mad 4,8 mm + 4,0% CaCl_2	23,38 ^A	2,15	32,39 ^A	2,44	37,94 ^A	2,09	2,62 ^A	3,63
Mad 2,4 mm + 6,0% CaCl_2	24,72 ^A	1,79	27,63 ^B	3,45	30,72 ^B	1,93	2,39 ^B	1,31
Mad 4,8 mm + 6,0% CaCl_2	20,94 ^B	3,16	29,20 ^A	1,85	32,93 ^A	3,43	2,70 ^A	3,06
Mad 2,4 mm + 8,0% CaCl_2	16,11 ^B	2,63	21,38 ^B	2,42	27,13 ^B	2,91	2,14 ^B	5,30
Mad 4,8 mm + 8,0% CaCl_2	21,04 ^A	4,44	25,70 ^A	2,02	31,16 ^A	2,59	2,40 ^A	3,09

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração; CaCl_2 = Aditivo acelerador de pega (Cloro de Cálcio)

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm em função dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, podem ser verificados na Figura 4.6(A). Na Figura 4.6(B), apresenta-se a mesma evolução da resistência, para os compósitos produzidos com a serragem de *Pinus sp* com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm, também em função dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizados.

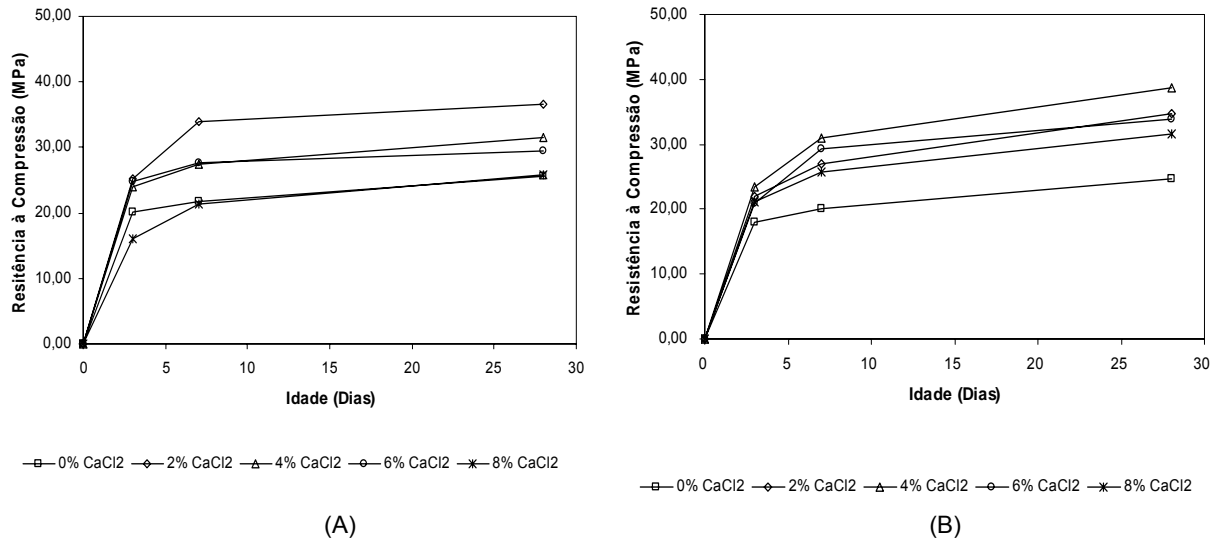


FIGURA 4.6 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE *PINUS spp* COM $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm (A) E 4,8 mm (B)

Os valores da resistência à tração aos 28 dias, determinados para os compósitos produzidos com as duas granulometrias do resíduo de *Pinus spp*, em função do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, são apresentados na Figura 4.7.

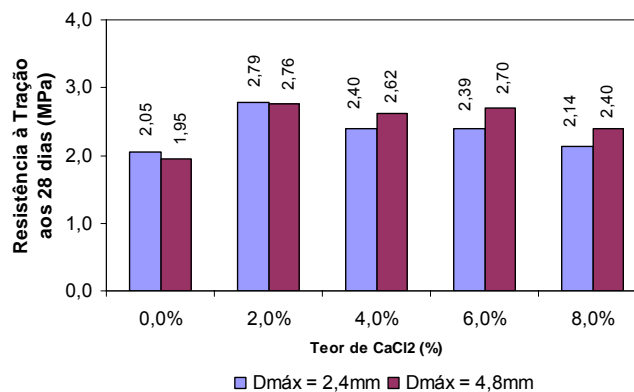


FIGURA 4.7 - INFLUÊNCIA DA $D_{m\acute{a}x}$ DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Ao se analisar, tanto os valores da Tabela 4.10, quanto à evolução das resistências, apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7, verificam-se nitidamente, que os valores de resistência dos compósitos, sejam eles produzidos com serragem com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm ou 4,8 mm, se apresentam mais baixos para teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 0% e 8,0%, tendendo a apresentar resistências mecânicas maiores para os valores centrais de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, entre 2,0% e 6,0%.

4.1.5 Otimização do Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e da $D_{m\acute{a}x}$ do resíduo de *Pinus spp*

Considerando 28 dias de idades como referência para a determinação da resistência à compressão, passou-se a analisar a variação da resistência à compressão em função do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilizado na produção dos compósitos com as duas granulometrias de serragem consideradas, que são apresentadas na Figura 4.8.

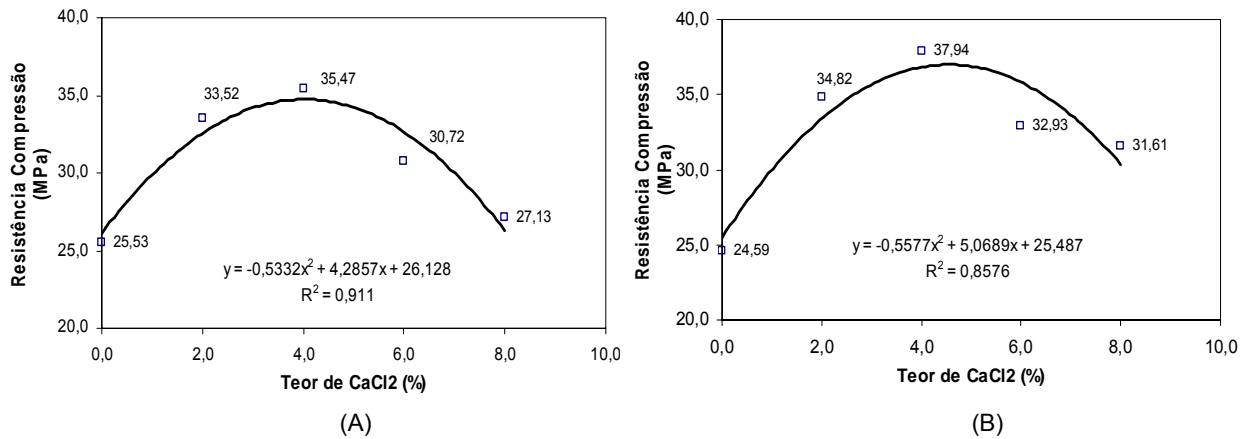


FIGURA 4.8 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE CaCl_2 (A) – RESÍDUO COM $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm E (B) – RESÍDUO COM $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm

Para otimização do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, procederam-se regressões, em função das curvas que melhor representam a variação de resistência à compressão aos 28 dias, para os compósitos produzidos com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm e 4,8 mm, conforme apresentado na Tabela 4.11.

TABELA 4.11 - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Característica : $D_{\text{máx}}$ e Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$				
Resíduo de <i>Pinus sp</i>	Equação	R ²	Teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	Expectativa de RC 28d (MPa)
$D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$	$y = - 0,5332x^2 + 4,2857x + 26,128$	0,9110	4,00%	34,7396 MPa
$D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$	$y = - 0,5577x^2 + 5,0689x + 25,487$	0,8576	4,50%	37,0036 MPa

Conforme apresentado na Tabela 4.11, o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp* de $D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$, apresentaria a maior resistência à compressão aos 28 dias (34,7396 MPa), para um teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 4,0%, enquanto o compósito, produzido com o resíduo de *Pinus spp*, de $D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$, apresentaria a resistência máxima de 37,0036 MPa, para um teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 4,5%.

Os traços otimizados foram então, produzidos e testados, apresentando as características físicas e mecânicas, comparadas com os valores de referência (argamassa padrão de cimento Portland) apresentadas nas Tabelas 4.12 e 4.13.

TABELA 4.12 - INFLUÊNCIA DA $D_{\text{MÁX}}$ DO RESÍDUO DE *PINUSspp* E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPOSITO

D Máx Partícula (mm) e Teor de CaCl_2 (%)	Massa Específica (kg/m^3)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
CPV ARI RS	2.145,93 ^A	0,72	15,02 ^C	1,73	7,00 ^C	1,59
Mad 2,4 mm + 4,0% CaCl_2	1.491,19 ^C	0,68	38,38 ^A	0,94	25,74 ^A	1,49
Mad 4,8mm + 4.5% CaCl_2	1.594,17 ^B	1,08	36,29 ^B	2,86	22,77 ^B	3,04

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CaCl_2 = Aditivo acelerador de pega (Cloroeto de Cálcio Bi-Hidratado)

Como pode ser verificado na Tabela 4.12 e na Figura 4.9, tanto a massa específica, quanto o índice de vazios e a absorção de água, para os três compósitos considerados, diferiram significativamente entre si, a um nível de 95% de confiança, o que confirma a hipótese de que a granulometria do resíduo de *Pinus spp* e o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, influenciam nas características finais dos compósitos.

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.12 fica evidente a relação inversamente proporcional entre a massa específica dos compósitos e sua porosidade e conseqüente absorção de água.

Quanto às características mecânicas, apresentadas na Tabela 4.13, os resultados apenas não diferem estatisticamente para os compósitos produzidos com as duas granulometrias e teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ otimizados, para a resistência à compressão aos 3 dias de idade. Para as outras idades (7 e 28 dias), os valores de resistência apresentam diferenças estatísticas significativas.

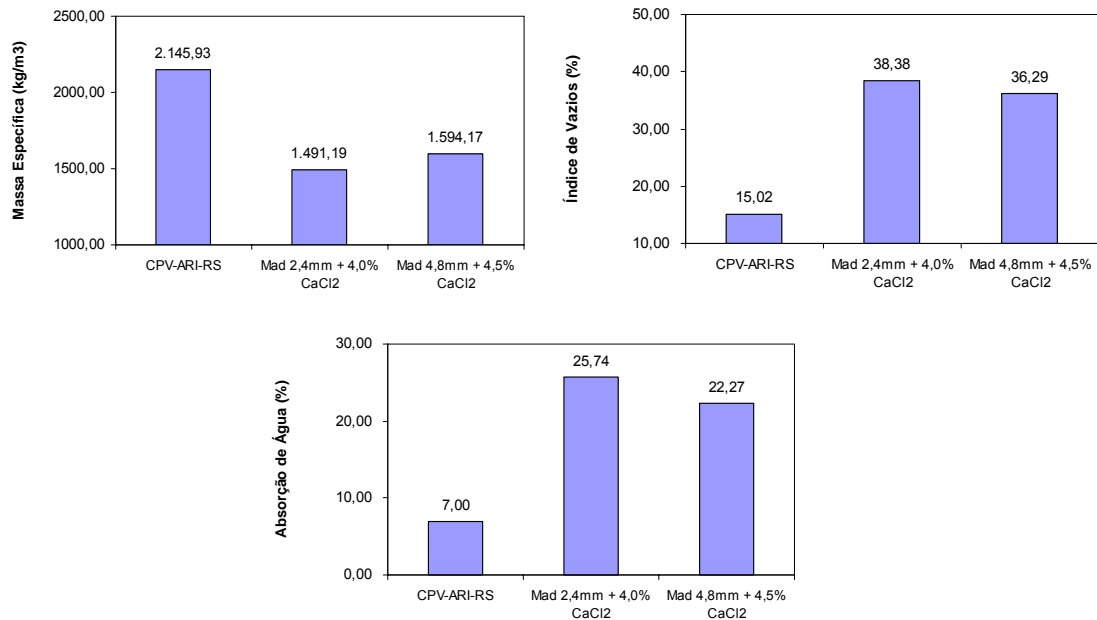


FIGURA 4.9 - INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – VALORES OTIMIZADOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Conforme pode ser verificado nas curvas que apresentam a evolução da resistência à compressão dos compósitos com a idade, apresentadas na Figura 4.10, nenhum dos dois compósitos alcançou a resistência da argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS, o que já era esperado, porém, em muito próximos à expectativa de valores determinada pela otimização das equações de regressão dos dois materiais, sendo que o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp* com $D_{\text{máx}} = 2,4$ mm e 4,0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, apresentou $\text{RC}_{28\text{d}} = 35,47\text{MPa}$ (2,10% acima da expectativa de 34,7396 MPa) e o compósito produzido com serragem com $D_{\text{máx}} = 4,8$ mm e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, apresentou $\text{RC}_{28\text{d}} = 38,64$ MPa (4,42% acima da expectativa de 37,0036 MPa).

TABELA 4.13 - INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE CaCl₂.2H₂O - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO

D Máx Partícula (mm) e Teor de CaCl ₂ (%)	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)	
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
CPV ARI RS	28,79 ^A	2,98	39,28 ^A	2,61	52,31 ^A	2,64	3,79 ^A	1,27
Mad 2,4 mm + 4,0% CaCl ₂	23,94 ^B	5,70	27,34 ^C	2,31	35,47 ^C	3,58	2,40 ^C	1,67
Mad 4,8mm + 4,5% CaCl ₂	25,39 ^B	3,14	32,57 ^B	1,90	38,64 ^B	3,60	2,57 ^B	2,63

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração; CaCl₂ = Aditivo acelerador de pega (Cloreto de Cálcio)

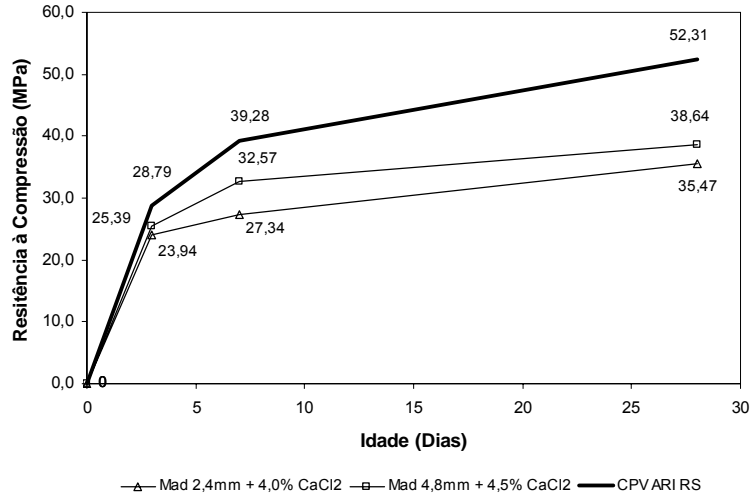


FIGURA 4.10 - INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE CaCl₂.2H₂O – VALORES OTIMIZADOS - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Quanto à resistência à tração, conforme apresentado na Figura 4.11, o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp* com D_{máx} = 4,8 mm e 4,5% de CaCl₂.2H₂O, apresentou valor (RT 28d = 2,57 MPa) significativamente maior que o compósito produzido com serragem com D_{máx} = 2,4 mm e 4,0% de CaCl₂.2H₂O (RT 28d = 2,40 MPa).

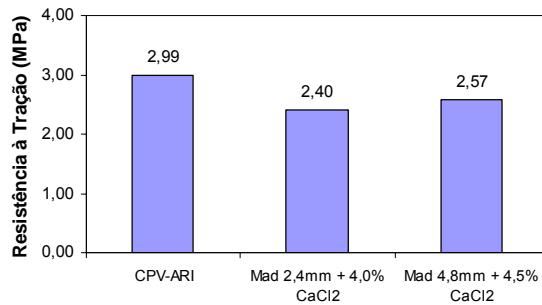


FIGURA 4.11 - INFLUÊNCIA DA DMÁX DO RESÍDUO DE *PINUS spp* E DO TEOR DE CaCl₂.2H₂O – VALORES OTIMIZADOS - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Diante dos resultados determinados, adotaram-se como referência para as demais Fases do estudo, além da argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS, o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp*, com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm e 4,5% de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$.

4.1.6 Resultados dos pré-tratamentos ao resíduo de *Pinus spp*

4.1.6.1 Análise Química

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados das análises químicas feitas com amostras do resíduo de *Pinus spp*. Estas análises serviram para comparar o teor de extrativos removidos do resíduo de *Pinus spp* em função dos 12 pré-tratamentos adotados, com os extrativos totais determinados com o resíduo sem tratamento, de acordo com a norma TAPPI T 204 cm.

TABELA 4.14 – EXTRATIVOS DETERMINADOS COM OS PR-E-TRATAMENTOS DO RESÍDUO DE *PINUS spp*

Pré-Tratamento	Extrativos (%)	CV (%)
Sem Pré-Tratamento	2,4219 ^C	2,21
AF-24H	0,8965 ^F	4,59
AF-48H	0,9892 ^E	1,93
AF-72H	1,0469 ^E	3,01
AQ-1H	0,2473 ^I	4,78
AQ-2H	0,3611 ^H	6,59
AQ-3H	0,7517 ^G	3,09
NaOH-1%	2,2149 ^D	1,40
NaOH-3%	2,5346 ^B	0,48
NaOH-5%	2,6359 ^A	1,21
Ca(OH) ₂ -5%	-1,4890 ^J	-4,82
Ca(OH) ₂ -7%	-2,1809 ^K	-3,67
Ca(OH) ₂ -10%	-2,7452 ^L	-1,20

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 medições; CV = Coeficiente de Variação

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.14, pode-se verificar:

- O teor de extrativos totais, determinado conforme norma TAPPI T 204 cm (1997), resultou em 2,4219%;
- Os valores de extrativos determinados com soluções de NaOH a 3% e 5%, resultaram em valores significativamente maiores aos determinados para os extrativos totais, isto se deve, muito provavelmente em função da degradação de parte das hemiceluloses da madeira de *Pinus spp.* Todos os demais resultaram em valores significativamente menores;
- Os únicos pré-tratamentos, que não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, foram os efetuados com AF-48H e AF-72H;
- Os sinais negativos apresentados pelos pré-tratamentos efetuados com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, determinam que houve incorporação de material nas paredes celulares das partículas do resíduo de *Pinus spp.*

Um fato que chama a atenção é o fato dos pré-tratamentos realizados com água quente resultarem em valores menores de extrativos que os realizados com água fria. Este fato pode ser explicado em função do tempo de permanência da serragem do resíduo de *Pinus spp* com a água fria, de 24, 48 e 72 horas, ter sido muito maior que o tempo de permanência na água quente, que foi de apenas 1, 2 e 3 horas.

As variações, também se devem ao fato das amostras do resíduo de *Pinus spp* terem sido ensaiadas da mesma forma como foram utilizadas na produção dos compósitos, ou seja, com a presença de casca da árvore, inclusive.

4.1.6.2 Determinação da Influência dos Pré-Tratamentos ao Resíduo de *Pinus spp* sobre a Hidratação do Cimento Portland

A fim de determinar a influência que os pré-tratamentos do resíduo de *Pinus spp* pudessem apresentar sobre as reações do cimento Portland, efetuou-se a análise termométricas de compósitos produzidos com cimento e com o resíduo de *Pinus spp*, com $D_{\text{máx}} = 4,8$ mm, após receber os 12 pré-tratamentos, com adição e sem adição de

4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Os resultados dessas determinações são apresentados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

TABELA 4.15 - COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADOS E SEM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Pré-Tratamento	T _{máx} (°C)	CV (%)	Tempo para T _{máx} (h)	CV (%)
CPV ARI RS	96,04 ^A	1,44	3,10 ^H	3,23
Mad in Natura	70,72 ^{BCD}	2,29	7,63 ^F	3,30
AF-24H	71,67 ^B	1,14	10,10 ^C	1,71
AF-48H	64,39 ^F	2,82	9,50 ^D	0,61
AF-72H	68,37 ^{EDC}	4,92	9,63 ^D	3,34
AQ-1H	67,76 ^{ED}	2,17	8,03 ^E	1,44
AQ-2H	65,67 ^{FE}	2,31	10,56 ^B	2,19
AQ-3H	70,51 ^{BCD}	1,67	8,03 ^E	1,44
NaOH-1%	70,95 ^{BC}	1,40	4,90 ^G	2,04
NaOH-3%	70,99 ^{BC}	0,43	5,06 ^G	1,14
NaOH-5%	71,23 ^{BC}	4,34	5,06 ^G	1,14
Ca(OH) ₂ -5%	70,66 ^{BCD}	2,36	9,96 ^C	4,05
Ca(OH) ₂ -7%	63,79 ^F	0,89	10,53 ^B	1,10
Ca(OH) ₂ -10%	69,60 ^{BCD}	3,83	10,90 ^A	1,83

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 3 medições; CV = Coeficiente de Variação;

Na Tabela 4.15 apresentam-se os efeitos dos pré-tratamentos sem a adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Como pode ser verificado:

- Nenhum compósito apresentou T_{máx} superior à verificada para a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS;
- Os compósitos produzidos com a serragem com os pré-tratamentos AF-24H, AQ-3H, 1%, 3% e 5% de NaOH e 5% e 10% de Ca(OH)₂, apresentaram T_{máx} sem diferenças estatísticas significativas em relação ao compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Os compósitos produzidos com a serragem com os demais pré-tratamentos (AF-48H, AF-72H, AQ-1H, AQ-2H e Ca(OH)₂ -7%)

apresentaram $T_{m\acute{a}x}$ inferiores e significativamente diferentes ao compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*.

Quanto ao tempo para atingir as $T_{m\acute{a}x}$, pode-se verificar:

- Todas as reações de hidratação apresentaram tempos superiores ao verificado para a argamassa padrão de cimento;
- Apenas os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com pré-tratamento com 3%, 5% e 7% de NaOH apresentaram tempos de hidratação inferiores ao compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Os demais compósitos produzidos com serragem com os pré-tratamentos com AF (24,48 e 72 horas), AQ (1,2 e 3 horas) e Ca(OH)_2 (5%, 7% e 10%), apresentaram tempos maiores para hidratação do compósito.

Na Tabela 4.16 apresentam-se os efeitos dos pré-tratamentos ao resíduo de *Pinus spp* com a adição de 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TABELA 4.16 - COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E TEMPO DE HIDRATAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADOS E COM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Pré-Tratamento com 4,5% de CaCl_2	Tmáx (°C)	CV (%)	Tempo para Tmáx (h)	CV (%)
CPV ARI RS	96,04 ^A	1,44	3,10 ^H	3,23
Mad in Natura	70,72 ^I	2,29	7,63 ^A	3,30
AF-24H	74,39 ^{EFGH}	1,34	4,30 ^D	2,33
AF-48H	75,19 ^{DEFG}	1,05	3,46 ^G	1,67
AF-72H	72,68 ^{GHI}	0,35	3,83 ^F	1,51
AQ-1H	74,77 ^{DEFG}	0,81	4,26 ^{DE}	2,71
AQ-2H	73,56 ^{FGH}	0,89	3,10 ^H	5,59
AQ-3H	78,82 ^{BC}	5,02	4,76 ^C	4,37
NaOH-1%	74,16 ^{EFGH}	0,20	4,03 ^{EF}	5,73
NaOH-3%	72,24 ^{HI}	0,48	4,10 ^{ED}	6,45
NaOH-5%	76,68 ^{CDE}	1,01	5,16 ^B	1,12
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ -5%	79,26 ^B	1,35	2,86 ^H	4,03
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ -7%	77,27 ^{BCD}	2,38	3,00 ^H	5,77
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ -10%	75,96 ^{DEF}	2,58	3,43 ^G	1,68

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 3 medições; CV = Coeficiente de Variação;

No que diz respeito às Tmáx atingidas pelos compósitos, pode-se verificar:

- Nenhum compósito apresentou Tmáx superior à verificada para a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS;
- Os valores mais baixos para Tmáx foram verificados para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* e para os compósitos produzidos com os pré-tratamentos AF-72H e NaOH-3%, inclusive sem diferenças significativas entre eles;
- As maiores Tmáx, sem considerar a argamassa padrão de cimento, foram determinadas para os compósitos produzidos com os pré-tratamentos AQ-3H e 5% e 7% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo que não se verificam diferenças estatísticas significativas entre eles.

Quanto ao tempo determinado para atingir as Tmáx, pode-se observar:

- O maior tempo de hidratação foi determinado para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os pré-tratamentos AQ-2H, 5% e 7% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, apresentaram tempos de hidratação iguais ou menores que a argamassa padrão de cimento Portland;
- Todos os demais compósitos apresentaram tempos de hidratação inferiores ao produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* e inferiores a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS.

Diante de tais constatações, verifica-se que a utilização do aditivo acelerador $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ é fundamental para melhorar o desempenho dos compósitos, com importância maior que os pré-tratamentos sem a utilização de aditivo acelerador de pega. Para tentar comprovar esta constatação preliminar, passou-se a efetuar uma comparação direta entre as $T_{\text{máx}}$ e tempos de hidratação dos compósitos produzidos com o resíduo com os pré-tratamentos, com e sem adição de 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Nas Figuras 4.12 a 4.15, pode-se observar a influência do aditivo acelerador na $T_{\text{máx}}$ e tempo de hidratação determinado para todos os pré-tratamentos analisados.

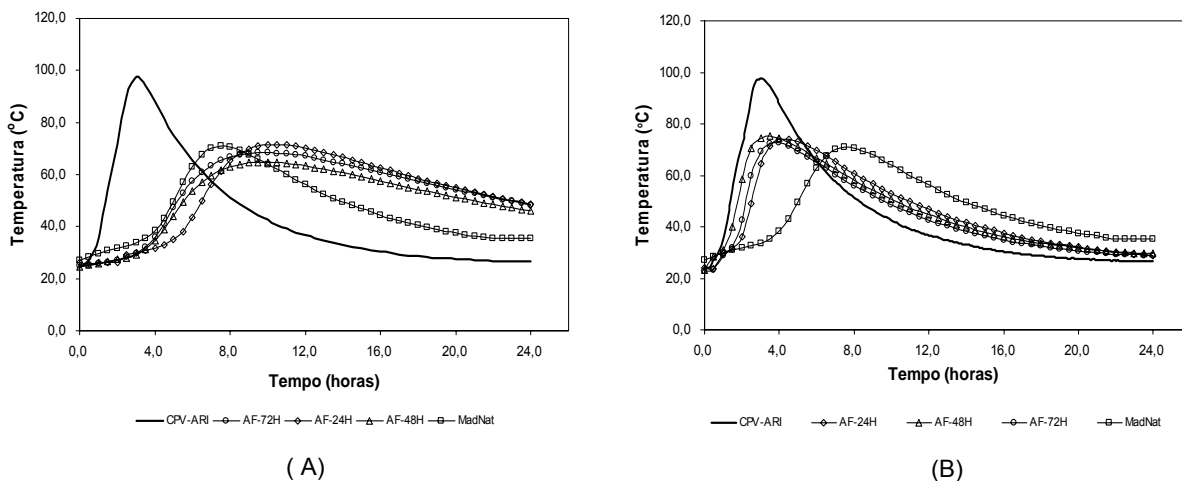


FIGURA 4.12 - CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADO COM ÁGUA FRIA. (A) SEM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (B) COM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

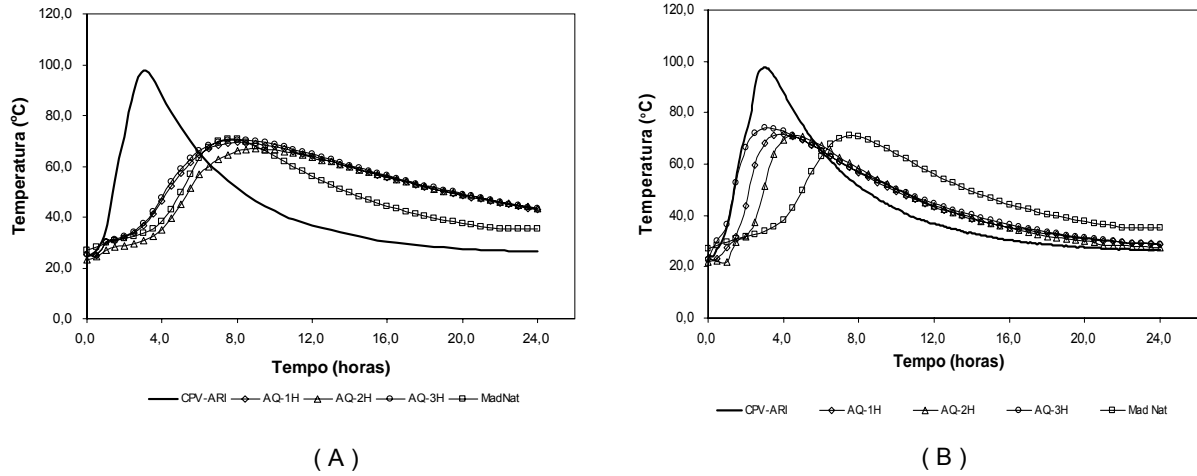


FIGURA 4.13 - CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADO COM ÁGUA QUENTE. (A) SEM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (B) COM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

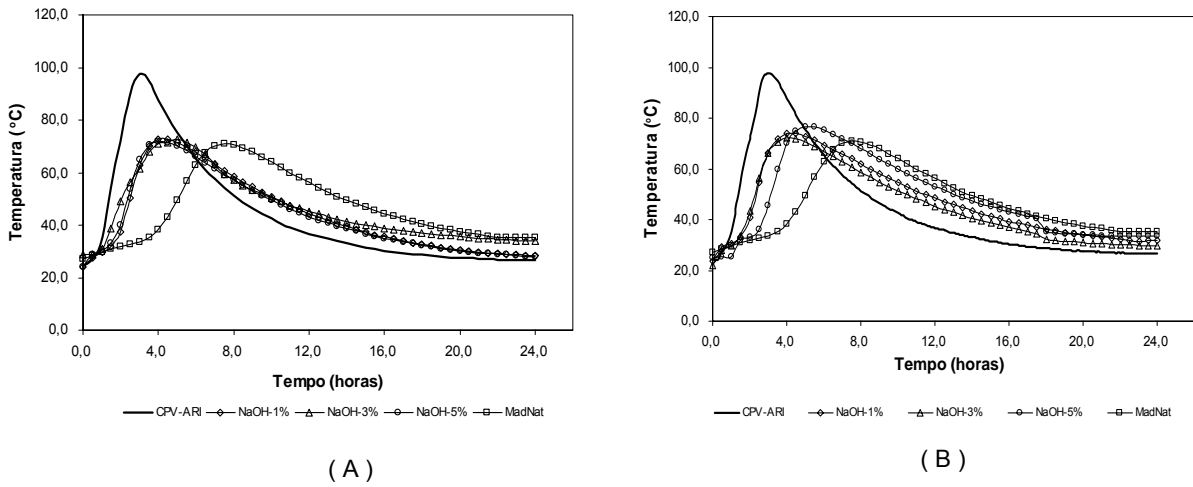


FIGURA 4.14 - CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADO COM NaOH. (A) SEM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (B) COM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

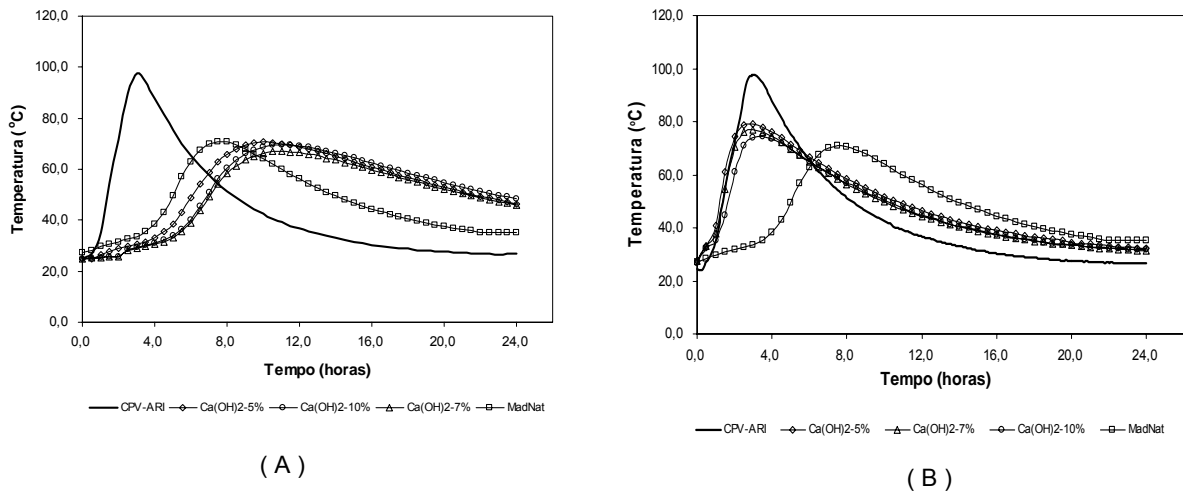


FIGURA 4.15 - CURVAS DE HIDRATAÇÃO DO COMPÓSITO COM RESÍDUO DE *PINUS spp* PRÉ-TRATADO COM Ca(OH)_2 . (A) SEM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (B) COM ADIÇÃO DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Em função do observado, para as 4 séries de pré-tratamentos, pode-se constatar:

- A utilização do resíduo de *Pinus spp* apenas com pré-tratamentos (sem $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apresentou pequena elevação da temperatura de hidratação dos compósitos, quando comparado ao compósito de referência, produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Da mesma forma, não se verificaram, de forma significativa, reduções nos tempos de hidratação dos compósitos, com exceção dos pré-tratamentos com base em soluções de NaOH, que apresentaram variações menores de tempos de hidratação, o que confere com a análise química do resíduo, que apresentou para os pré-tratamentos com NaOH 3% e 5%, percentuais de extrativos superiores ao teor de extrativos totais do resíduo de *Pinus spp*;
- Os demais pré-tratamentos, que também não apresentaram reduções significativas dos tempos de hidratação, apresentaram relação direta com a análise química;
- Analisando os valores de $T_{\text{máx}}$, dos tempos de hidratação e as curvas de hidratação dos compósitos produzidos com os 12 pré-tratamentos analisados, verifica-se a influência determinante da utilização do aditivo acelerador de pega $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

4.1.6.3 Influência dos Pré-Tratamentos a o Resíduo de *Pinus spp* sobre as Características Físicas do Compósito

Nesta etapa da pesquisa, foram analisadas as características físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp*, tratada com os 12 pré-tratamentos sob análise. Em todos os compósitos foi utilizado o teor de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, diante das conclusões obtidas da análise das curvas de hidratação dos compósitos.

Na Tabela 4.17, apresentam-se os valores determinados para as características físicas dos compósitos produzidos.

TABELA 4.17 - PRÉ-TRATAMENTOS DO RESÍDUO DE *PINUS spp* – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Teor de CaCl ₂ (%)	Massa Específica (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	2.145,93 ^A	0,72	15,02 ^J	1,73	7,00 ^F	1,59
Mad in Natura (Ref 2)	1.471,10 ^G	0,62	38,98 ^B	0,74	26,50 ^A	0,79
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	1.594,17 ^B	1,08	36,29 ^{DE}	2,86	22,77 ^{DE}	3,04
AF-24H	1.502,66 ^F	0,39	36,58 ^D	1,07	24,35 ^{BC}	1,07
AF-48H	1.503,79 ^F	0,88	35,77 ^{EFG}	0,81	23,79 ^C	1,61
AF-72H	1.509,11 ^{EF}	0,90	35,99 ^{DEF}	0,80	23,85 ^C	1,65
AQ-1H	1.543,66 ^C	0,62	35,12 ^H	0,26	22,75 ^{DE}	0,77
AQ-2H	1.547,02 ^C	0,44	34,99 ^H	0,97	22,62 ^{DE}	1,38
AQ-3H	1.544,27 ^C	0,35	38,13 ^C	1,39	24,69 ^B	1,55
NaOH-1%	1.497,71 ^F	0,93	39,78 ^A	0,74	26,57 ^A	1,64
NaOH-3%	1.501,95 ^F	0,99	36,31 ^{DE}	0,89	24,18 ^{BC}	1,87
NaOH-5%	1.524,21 ^{DE}	1,63	35,24 ^{GH}	1,26	23,13 ^D	2,94
Ca(OH) ₂ -5%	1.534,70 ^{CD}	0,60	35,10 ^H	0,79	22,87 ^D	1,29
Ca(OH) ₂ -7%	1.539,56 ^{CD}	0,48	34,22 ^I	1,51	22,23 ^E	1,69
Ca(OH) ₂ -10%	1.466,06 ^G	0,61	35,40 ^{FGH}	0,75	24,15 ^{BC}	1,29

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração; AF-24H, AF-48H e AF-72H = Extração em Água Fria por 24, 48 e 72 horas; AQ-1H, AQ-2H e AQ-3H = Extração em Água Quente por 1, 2 e 3 horas; NaOH-1%, NaOH-3% e NaOH-5% = Extração em Hidróxido de Sódio a 1%, 2% e 3%; Ca(OH)₂-5%, Ca(OH)₂-7% e Ca(OH)₂-10% = Tratamento por incorporação de Hidróxido de Cálcio a 5%, 7% e 10%

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.17, pode constatar que:

a- Quanto à massa específica dos compósitos:

- A massa específica da argamassa padrão de cimento Portland é significativamente maior que a dos compósitos que contém o resíduo de *Pinus spp*;
- A massa específica do compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*, é significativamente menor que a dos compósitos produzidos com resíduo pré-tratado, com exceção para o pré-tratamento com 10% de Ca(OH)₂, fato não esperado, pois este foi o resíduo que mais incorporou partículas minerais (Ca(OH)₂ incorporado = 2,7452%);
- Os compósitos produzidos com pré-tratamentos com Água Fria e NaOH, apresentaram massas específicas na faixa dos 1.500,00 kg/m³ e os

compósitos produzidos com pré-tratamentos com Água Quente e com soluções de 5% e 7% de Ca(OH)_2 , apresentaram massas específicas na faixa dos 1.540,00 kg/m^3 .

b- Quanto ao índice de vazios (porosidade) dos compósitos:

- A menor porosidade foi determinada para a argamassa padrão de cimento Portland, apresentando diferença estatísticas significativas para todos os demais;
- As maiores porosidades foram determinadas para o compósito produzido com serragem com pré-tratamento NaOH – 1% (IV = 39,78%), e para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* (IV = 38,98%) apresentando, diferenças estatísticas significativas entre si e para os demais;
- Os demais compósitos apresentaram porosidades semelhantes, na faixa dos 35%, com algumas diferenças significativas entre si.

c- Quanto à absorção de água apresentada pelos compósitos:

- A menor absorção foi determinada para a argamassa padrão de cimento, apresentando diferenças significativas para os demais;
- Os maiores valores de absorção, foram apresentados para os compósitos produzidos com serragem com pré-tratamento NaOH 1% (Abs = 26,57%) e para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* (Abs = 26,50%), apresentando diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Os demais compósitos apresentaram valores de absorção na faixa dos 23%, com pequenas diferenças entre si.

As características físicas da argamassa padrão de cimento Portland, dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp in natura* e com os 12 pré-tratamentos estudados, podem ser observados nos gráficos apresentados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

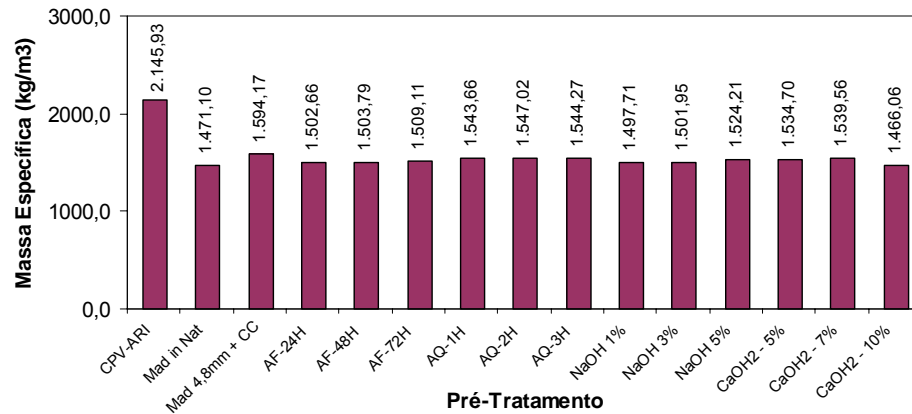


FIGURA 4.16 – RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTOS: MASSA ESPECÍFICA DO COMPÓSITO

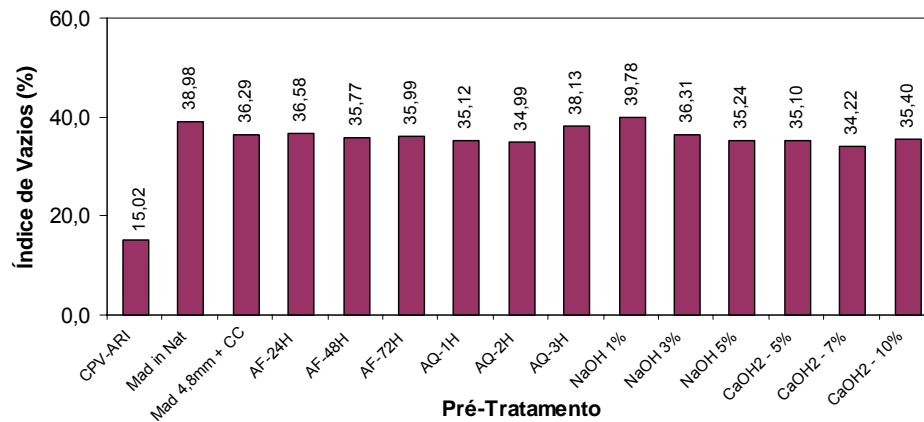


FIGURA 4.17 – RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTOS: ÍNDICE DE VAZIOS DO COMPÓSITO

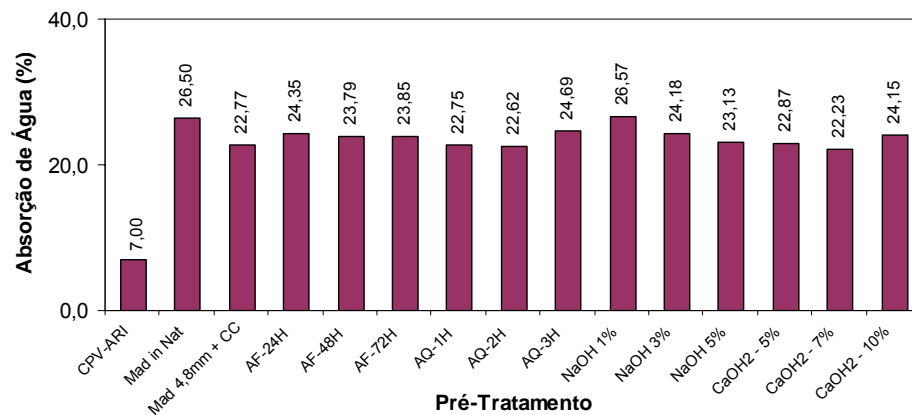


FIGURA 4.18 – RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTOS: ABSORÇÃO DE ÁGUA DO COMPÓSITO

Os valores das características mecânicas: resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias e resistência à tração, determinada por compressão diametral dos corpos-de-prova de $D_n = 50$ mm, produzidos com a argamassa padrão de cimento Portland CPV

ARI RS e com os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp in natura* e com os 12 pré-tratamentos analisados, são apresentadas na Tabela 4.18.

TABELA 4.18 - PRÉ-TRATAMENTOS AO RESÍDUO DE *PINUS spp* - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Pré-Tratamento	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)	
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	28,79 ^{DEF}	2,98	39,28 ^B	2,61	52,31 ^A	2,64	3,79 ^A	1,27
Mad in Natura (Ref 2)	18,01 ^J	4,46	20,01 ^G	4,99	24,59 ^I	1,29	1,95 ^K	2,33
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	25,39 ^I	3,14	32,57 ^F	1,90	38,64 ^F	3,60	2,57 ^{EFG}	2,63
AF-24H	27,68 ^{FG}	2,36	35,88 ^{DE}	2,88	42,16 ^D	2,98	2,90 ^B	2,04
AF-48H	26,71 ^{GH}	1,12	34,73 ^E	2,48	42,72 ^{BCD}	2,69	2,67 ^{DEF}	2,13
AF-72H	25,97 ^{HI}	1,84	35,86 ^{DE}	2,13	42,49 ^{CD}	2,77	2,69 ^{DE}	1,91
AQ-1H	35,59 ^A	2,31	41,56 ^A	3,43	44,36 ^B	3,58	2,64 ^{DEF}	3,39
AQ-2H	32,77 ^B	3,73	41,33 ^A	2,37	43,90 ^{BC}	3,38	2,39 ^H	2,98
AQ-3H	26,16 ^{HI}	3,94	38,90 ^B	3,90	43,20 ^{BCD}	3,46	2,15 ^J	5,23
NaOH-1%	29,82 ^{CD}	2,93	37,17 ^{CD}	2,13	39,69 ^{EF}	0,84	2,74 ^{CD}	3,07
NaOH-3%	28,24 ^{EF}	3,80	33,11 ^F	3,60	35,96 ^H	1,64	2,56 ^{FG}	4,18
NaOH-5%	29,22 ^{DE}	2,55	35,28 ^E	1,33	36,73 ^{GH}	3,93	2,86 ^{BC}	4,61
Ca(OH) ₂ -5%	30,90 ^C	3,77	36,81 ^{CD}	3,66	40,37 ^E	3,77	2,27 ^I	1,48
Ca(OH) ₂ -7%	32,65 ^B	1,56	38,04 ^{BC}	0,87	39,61 ^{EF}	1,83	2,42 ^H	4,86
Ca(OH) ₂ -10%	29,86 ^{CD}	3,15	36,07 ^{DE}	3,65	38,40 ^{FG}	2,96	2,47 ^{GH}	3,20

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração; AF-24H, AF-48H e AF-72H = Extração em Água Fria por 24, 48 e 72 horas; AQ-1H, AQ-2H e AQ-3H = Extração em Água Quente por 1, 2 e 3 horas; NaOH-1%, NaOH-3% e NaOH-5% = Extração em Hidróxido de Sódio a 1%, 2% e 3%; Ca(OH)₂-5%, Ca(OH)₂-7% e Ca(OH)₂-10% = Tratamento por incorporação de Hidróxido de Cálcio a 5%, 7% e 10%

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.18, pode-se constatar que:

a- Quanto à resistência à compressão dos compósitos, aos 3 dias de idade:

- Os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os pré-tratamentos AQ-1H, AQ-2H, Ca(OH)₂ 5% e Ca(OH)₂ 7%, apresentaram resistências à compressão superiores a argamassa padrão de cimento Portland, apresentando diferenças estatísticas significativas em relação a ela.
- Os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os pré-tratamentos AF-24H, NaOH 1%, NaOH 3% NaOH 5% e Ca(OH)₂ 10%, não

apresentaram diferenças estatísticas significativas da resistência apresentada pela argamassa padrão de cimento Portland.

- Os demais compósitos, produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com pré-tratamento AF-48H, AF-72H e AQ-3H, apresentaram valores de resistência inferiores à argamassa padrão de cimento.
- Os valores mais baixos de resistência foram determinados para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*.

b- Quanto à resistência à compressão dos compósitos, aos 7 dias de idade:

- Os maiores valores de resistência à compressão foram determinados para os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os pré-tratamentos AQ-1H e AQ-2H, apresentando diferenças estatísticas significativas em relação às demais;
- Os compósitos produzidos com a serragem com os pré-tratamentos AQ-3H e Ca(OH)_2 7%, não apresentaram diferenças estatísticas significativas da resistência apresentada pela argamassa padrão de cimento Portland.
- Os demais compósitos apresentaram valores de resistência inferiores à argamassa padrão de cimento e superiores a resistência do compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Os valores mais baixos de resistência foram determinados para os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp in natura* e resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

c- Quanto à resistência à compressão dos compósitos, aos 28 dias de idade:

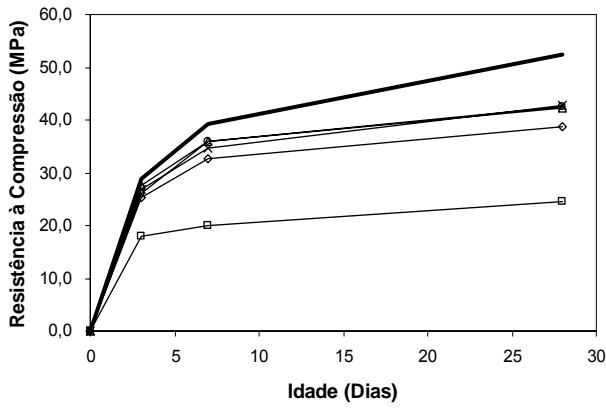
- Os maiores valores de resistência à compressão foram determinados para a argamassa padrão de cimento Portland, apresentando diferenças estatísticas significativas para os demais compósitos;
- Os compósitos produzidos com a serragem com os pré-tratamentos AF-48H, AQ-1H, AQ-2H e AQ-3H apresentaram resistências logo abaixo da argamassa padrão, não apresentando diferenças significativas entre si;

- Os valores mais baixos foram determinados para os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Os valores de resistência determinados para o compósito com o resíduo de *Pinus spp* e *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ não diferiu das resistências dos compósitos produzidos com a serragem com os pré-tratamentos NaOH 1%, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 7% e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 10%.

d- Quanto às resistências à tração aos 28 dias de idade:

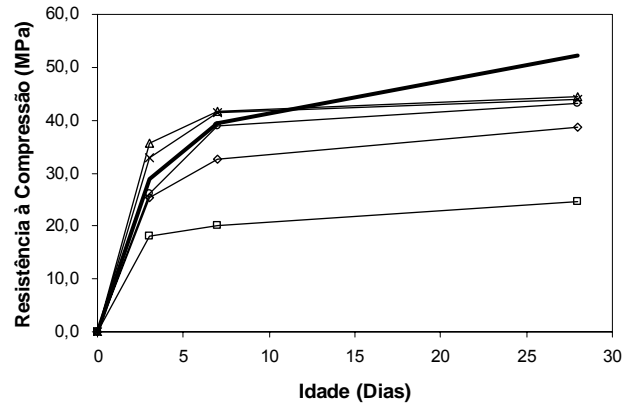
- O maior valor de resistência à tração foi determinado para a argamassa padrão de cimento Portland, apresentando diferenças estatísticas significativas para os demais compósitos;
- Os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com os pré-tratamentos AF-24H, NaOH 5% apresentaram resistências logo abaixo da argamassa padrão, não apresentando diferenças significativas entre si;
- Os valores mais baixos, foram determinados para os compósitos produzidos com serragem tratada com soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;

Na Figura 4.19 apresentam-se os gráficos de evolução das resistências à compressão dos compósitos produzidos com os serragem com pré-tratamentos em Água Fria (Figura 4.19A), em Água Quente (Figura 4.19B), com soluções de NaOH (Figura 4.19C) e com soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Figura 4.19D). Todos com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Nestes gráficos, são apresentados, também, os valores de resistências à compressão dos compósitos de referência (argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS, compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* e com o resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



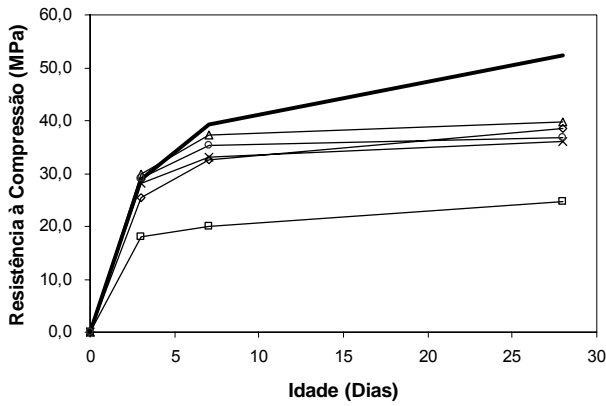
— CPV-ARI-RS — Mad in Nat — Mad 4,8mm + CC
 — AF-24H — AF-48H — AF-72H

(A)



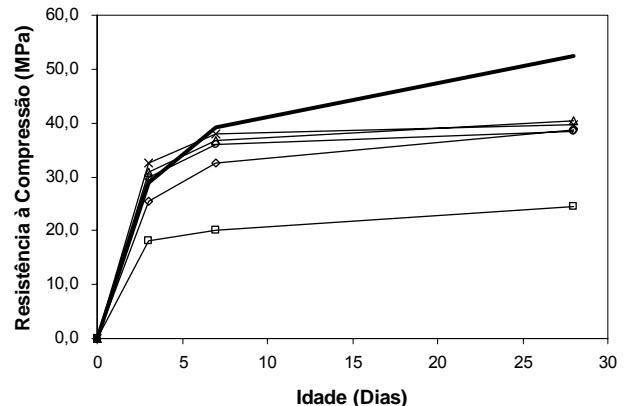
— CPV-ARI-RS — Mad in Nat — Mad 4,8mm + CC
 — AQ-1H — AQ-2H — AQ-3H

(B)



— CPV-ARI-RS — Mad in Nat — Mad 4,8mm + CC
 — NaOH 1% — NaOH 3% — NaOH 5%

(C)



— CPV-ARI-RS — Mad in Nat — Mad 4,8mm + CC
 — Ca(OH)2-5% — Ca(OH)2-7% — Ca(OH)2-10%

(D)

FIGURA 4.19 – RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE DO COMPÓSITO

No gráfico apresentado na Figura 4.20, apresentam-se as resistências à tração dos compósitos de referência e dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* pré-tratados.

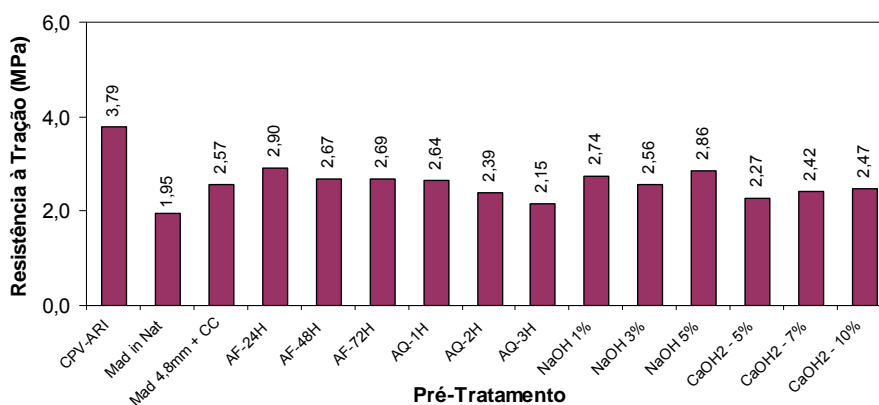


FIGURA 4.20 – RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTOS:: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS DE IDADE

4.1.7 Decisão quanto ao Pré-Tratamento ao Resíduo de *Pinus spp* à Adotar

Para tomada de decisão quanto ao pré-tratamento mais indicado, considerou-se a característica mecânica mais relevante para a finalidade que se deseja dar ao material a ser produzido com o compósito contendo o resíduo de *Pinus spp*, que no caso dos blocos vazados para alvenaria estrutural, é a resistência à compressão, neste caso, tomada na idade convencional de 28 dias. Outro aspecto fundamental para a tomada de decisão em relação ao novo material que se deseja produzir, diz respeito a seu custo.

Na Tabela 4.19 apresentam-se os pré-tratamentos que resultaram nas maiores RC 28d, e seus custos relativos.

TABELA 4.19 - CUSTO PARA PRÉ-TRATAMENTO DE 1 kg DE RESÍDUO DE *PINUS spp*

Pré-Tratamento	RC 28d (MPa)	Custo (R\$/kg)	Diferença (%)
AF 48H + 4,5% CaCl ₂	42,72	1,277	-
AQ 1H + 4,5% CaCl ₂	44,36	1,517*	+ 18,79%
		1,372**	+ 7,44%
NaOH 1% + 4,5% CaCl ₂	39,69	1,475	+15,51%
Ca(OH)2 5% + 4,5% CaCl ₂	40,37	1,422	+11,35%

* Aquecimento elétrico; ** Aquecimento à gás natural

Como pode ser notado, a maior RC 28d é verificada para o pré-tratamento AQ-1H (44,36 MPa), seguida pelo pré-tratamento AF-48H (42,72 MPa), ambos contendo 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Porém, como o custo do pré-tratamento com Água Quente é entre 7,44% a 18,79% mais alto que o custo do pré-tratamento com Água Fria (em função do tipo de aquecimento da água), e a diferença entre as resistências à compressão é pequena (3,84%), optou-se em adotar para o restante da pesquisa o pré-tratamento mais econômico.**

4.1.8 Adoção dos Traços de Referência para a Pesquisa

Para a continuidade da pesquisa, adotaram-se então quatro compósitos de referência, que são:

- **Referência 1** – Argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS;
- **Referência 2** – Compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- **Referência 3** – Compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- **Referência 4** – Compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp*, com pré-tratamento AF-48H e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Na Tabela 4.20 estão apresentadas às características físicas dos compósitos de referência.

TABELA 4.20 - REFERÊNCIAS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Referência	Massa Específica (kg/m^3)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
CPV ARI RS	2.145,93 ^A	0,72	15,02 ^D	1,73	7,00 ^D	1,59
Mad. 4,8 mm <i>in nat</i>	1.471,10 ^D	0,62	38,98 ^A	0,74	26,50 ^A	0,79
Mad 4,8 mm <i>in nat</i> + 4.5% CaCl_2	1.594,17 ^B	1,08	36,29 ^B	2,86	22,77 ^C	3,04
Mad. 4,8 mm AF-48H + 4,5% CaCl_2	1.503,79 ^C	0,88	35,77 ^C	0,81	23,79 ^B	1,61

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação

As diferenças entre as características físicas dos compósitos de referência podem ser melhores observadas nos gráficos apresentados na Figura 4.21.

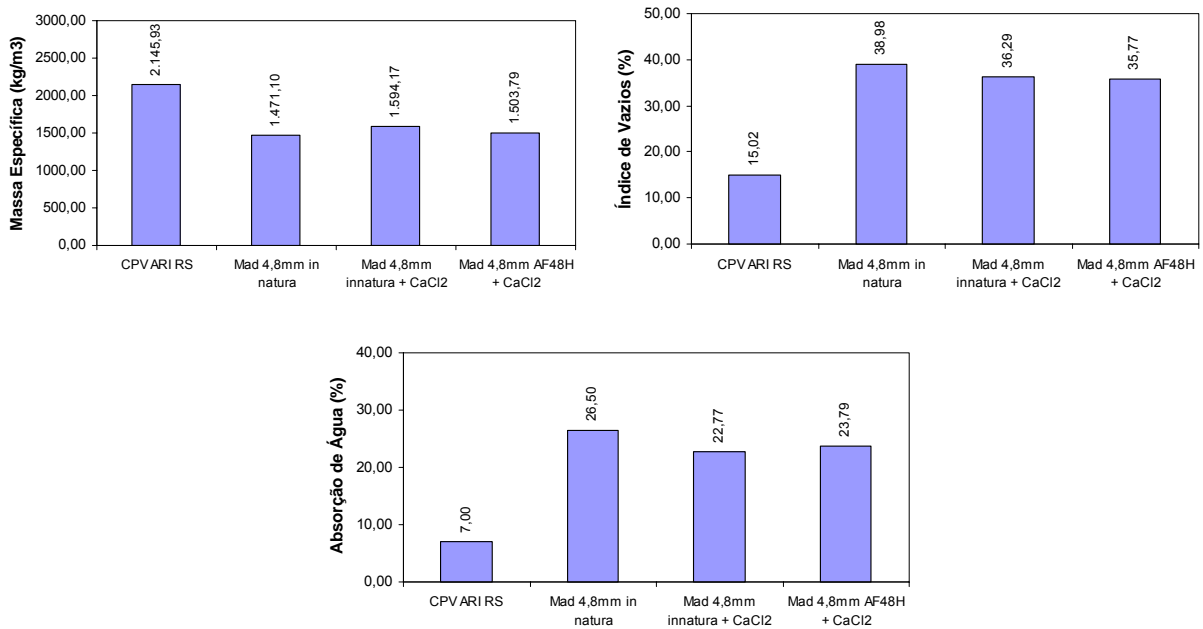


FIGURA 4.21 - COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Na Tabela 4.21 são apresentadas às características mecânicas dos compósitos de referência.

TABELA 4.21 - REFERÊNCIAS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Referência	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)			
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
CPV ARI RS	28,79 ^A	2,98	39,28 ^A	2,61	52,31 ^A	2,64	55,05 ^A	3,51	3,79 ^A	1,27
Mad. 4,8 mm <i>in nat</i>	18,01 ^D	4,46	20,01 ^D	4,99	24,59 ^D	1,29	28,97 ^D	5,68	1,95 ^D	2,33
Mad 4,8 mm <i>in nat</i> + 4,5% CaCl ₂	25,39 ^C	3,14	32,57 ^C	1,90	38,64 ^C	3,60	39,82 ^C	5,46	2,57 ^C	2,63
Mad. 4,8 mm AF-48H + 4,5% CaCl ₂	26,71 ^B	1,12	34,73 ^B	2,48	42,72 ^B	2,69	43,91 ^B	1,21	2,67 ^B	2,13

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração

Na Figura 4.22, apresentam-se as curvas de evolução das resistências à compressão dos compósitos de referência em função da idade.

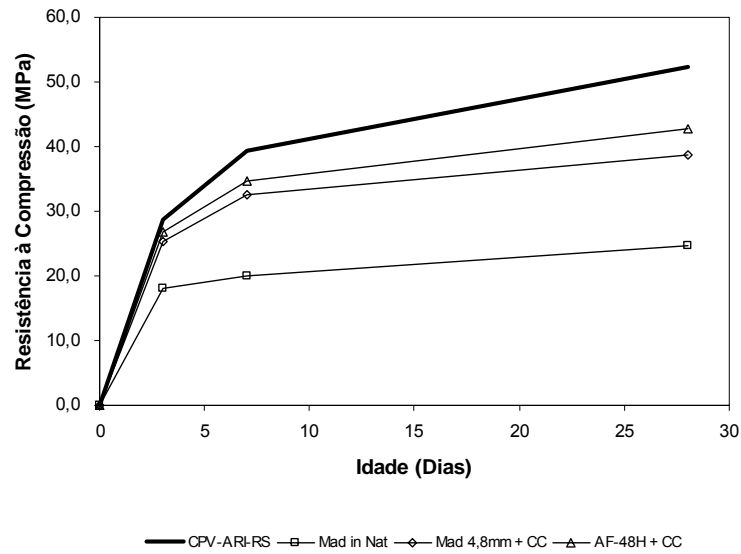


FIGURA 4.22 - COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE

Na Figura 4.23, apresentam-se os valores das resistências à tração dos compósitos de referência.

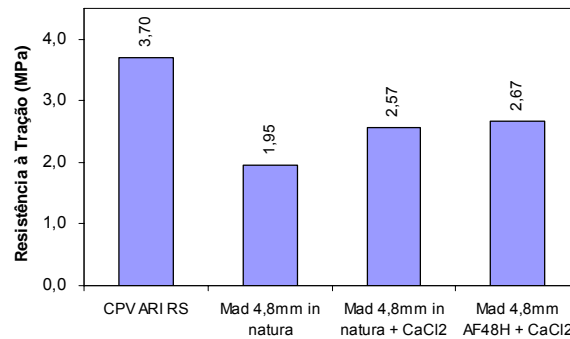


FIGURA 4.23 - COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 28 DIAS DE IDADE

4.2 RESULTADOS DA 2ª FASE DA PESQUISA – ANÁLISE DAS SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DO CIMENTO PORTLAND DO COMPÓSITO CIMENTO-MADEIRA POR MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALTERNATIVOS

4.2.1 Determinação da Consistência da Mistura no Estado Fresco

Nesta Fase do estudo, pesquisou-se a possibilidade de efetuar a substituição parcial do cimento Portland dos compósitos cimento-madeira

(resíduo de *Pinus spp*), por seis materiais cimentícios alternativos (sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto-forno, resíduo de cerâmica calcinada e cinza de casca de arroz).

Tal análise se baseou na produção e ensaios para determinação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias, de corpos-de-prova cilíndricos $D_n = 50\text{mm}$, produzidos com o compósito dentro de uma trabalhabilidade (consistência) constante, fixada em $250 \pm 10\text{ mm}$, determinada em função da medida da consistência na mesa cadente, conforme NBR 7.215 (1996).

A faixa de consistência foi fixada com base na média de consistências determinadas para os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp* com $D_{\text{máx}} = 4,8\text{ mm}$, com adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com os 12 pré-tratamentos com adição de cloreto de cálcio. Para definir os limites superior e inferior, adotaram-se os valores arredondados do resultado da soma e subtração do valor médio ($247,3077\text{ mm}$), o valor respectivo a dois desvios padrão ($S_d = 5,5884\text{ mm}$).

Como não houve alterações quanto aos procedimentos de moldagem e controle tecnológico dos compósitos, a amostra mínima permaneceu a mesma da 1ª Fase da pesquisa, ou seja, no mínimo 3 corpos-de-prova.

4.2.2 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Sílica Ativa

Na Tabela 4.22 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa.

Como pode ser verificado, para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos valores de 0%, 1%, 2% 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição de sílica ativa, houve a necessidade de utilizar aditivo superplastificante, nos teores de 0,20% a 4,40%, com base na massa de cimento Portland mais material cimentício alternativo.

Verificou-se, nos compósitos com teores de aditivo superplastificante acima de 4,0%, a presença de macro-poros devido à dificuldade de compactação do material fresco, estes defeitos podem ser verificados na Figura 4.24.



FIGURA 4.24 - MACROPOROS NO COMPÓSITO COM 20% DE SÍLICA ATIVA E 4,4% DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.22, pode-se constatar que:

- A argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS (Ref 1), apresentou os maiores valores de resistência à compressão tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, com diferenças estatisticamente significativas para os demais compósitos;
- Os maiores valores de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com SA 5% com adição de 3% e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,40% de aditivo superplastificante e SA 10% com adição de 1% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,80% de aditivo superplastificante;

TABELA 4.22 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (Sílica Ativa)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28** A	2,61	55,05** A	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01** M	4,99	28,97** K	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57** CD	1,90	39,82** FGH	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73** B	2,48	43,91** DE	1,21
5,0	0,00	0,20	254,00	26,37* K	0,41	38,59** GHI	5,81
	1,00	0,20	253,00	29,12* GHI	2,77	47,83** B	5,27
	2,00	0,30	251,00	30,64* EFG	5,89	48,06** B	5,60
	3,00	0,40	247,00	34,64* B	3,98	47,99** B	2,87
	4,00	0,40	245,00	33,43* BC	3,49	44,54** DE	4,33
10,0	0,00	0,60	245,00	31,23** DEF	2,88	43,60** DE	2,40
	1,00	0,80	257,00	34,10** B	3,45	48,83** B	5,08
	2,00	1,00	252,00	32,04* CDE	2,04	47,43** BC	1,41
	3,00	1,20	252,00	31,22** DEF	3,84	46,87** BC	3,04
	4,50	1,60	250,00	30,10** FG	4,39	44,26** DE	1,83
15,0	0,00	1,60	250,00	29,26** GHI	4,75	38,98* GHI	5,07
	1,00	1,80	245,00	30,21* FG	2,81	45,17* CD	1,17
	2,00	2,00	249,00	30,76* EFG	0,55	44,17* DE	2,25
	3,00	2,40	252,00	29,64** GH	4,34	42,28* EF	1,98
	4,50	3,00	245,00	27,21** JK	4,53	40,53* FG	3,00
20,0	0,00	3,00	245,00	27,72* IJK	4,90	38,09* GHI	3,06
	1,00	3,00	257,00	28,27* HIJ	2,74	38,55* GHI	1,08
	2,00	3,20	252,00	26,32* K	1,77	37,67* HIJ	3,53
	3,00	3,80	252,00	23,59* L	2,90	36,81* IJ	3,90
	4,50	4,40	250,00	22,97* L	2,96	35,39* J	3,46

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento

- Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos SA 5%, com adição de 1%, 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,20%, 0,30% e 0,40% de aditivo superplastificante, respectivamente, e SA 10% com adições de 1%, 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e teores de 0,80%, 1,00% e 1,20% de aditivo superplastificante, respectivamente.

Portanto, adotando nesta Fase do estudo a idade padrão para comparação de resistências à compressão de 91 dias (devido a menor velocidade de hidratação dos materiais cimentícios alternativos), fica evidente que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito com o resíduo de *Pinus spp*, por sílica ativa, deve se situar na faixa de 10%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por sílica ativa, e dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão é a variável dependente e os teores de sílica ativa, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC_{91d} \text{ (MPa)} = 1 / (3,1534 \times 10^{-4} + 1,7021 \times 10^{-2} \times \text{Exp}(-[\text{Teor Sílica (\%)}]) + 1,7640 \times 10^{-42} / [\text{Teor CaCl}_2 \text{ (\%)}]^{1/3} + 1,1209 \times 10^{-4} \times [\text{Teor Superplast (\%)}]^{1/2}) \dots\dots (19)$$

Na Tabela 4.23 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão

TABELA 4.23 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA

Parâmetros Estatísticos									
Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{crítico}	t _{calc}	Significância do Modelo
Sílica Ativa	Não Linear	2,744	115,20	0,9163	0,8397	0,8324	1,997	18,59	1,10x10 ⁻¹⁷

Como pode ser observado na Tabela 4.23, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam correlação fortíssima ($0,90 > R > 0,99$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.24.

TABELA 4.24 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC 91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor Sílica (%)	-0,2923	8,743	$1,2 \times 10^{-10}$	Sim
Teor CaCl ₂ (%)	0,3334	11,940	$3,7 \times 10^{-16}$	Sim
Teor Superplast (%)	0,6935	22,510	$-1,1 \times 10^{-17}$	Sim

A princípio acreditava-se que o uso do aditivo superplastificante serviria, tão somente, para manter as características reológicas do compósito no estado fresco, mantendo as condições de moldagem sem a necessidade de adicionar mais água ao traço e, por conseguinte, não promover perda de resistência do compósito em função da alteração da relação água/aglomerante.

Porém, analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.24, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta uma fraca correlação em relação ao teor de sílica ativa, uma média correlação parcial em relação ao CaCl₂.2H₂O e uma forte correlação parcial em relação ao teor de aditivo superplastificante. Portanto a influência do aditivo superplastificante é preponderante aos demais componentes da mistura. Como pode ser verificado os três regressores são importantes para a formação do modelo.

As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

Na Figura 4.25 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de substituição por sílica ativa e do teor de CaCl₂.2H₂O, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

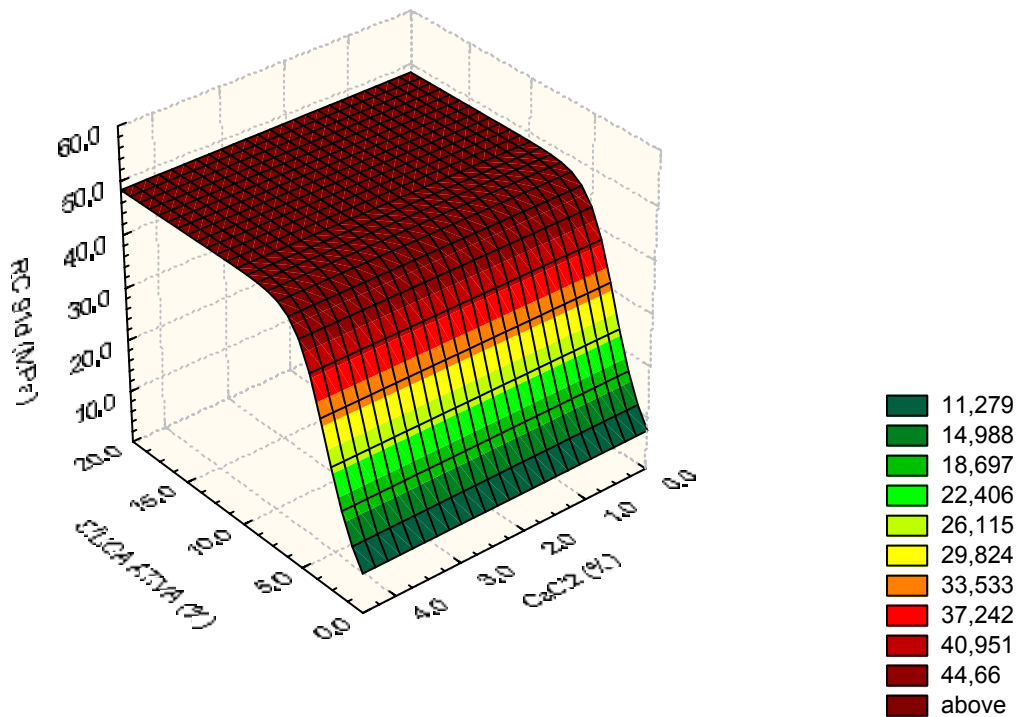


FIGURA 4.25 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Analisando a superfície de resposta, verifica-se haver pouca variação da RC 91d do compósito para teores de sílica entre 5% e 20%, e que a resistência à compressão praticamente independe do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o que é confirmado pela análise numérica da equação n° 19.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.25.

TABELA 4.25 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
Sílica Ativa	10,00%	0,00%	0,60%	49,6423

4.2.3 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Metacaulim

Na Tabela 4.26 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de metacaulim.

Para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos valores de 0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição de metacaulim, houve a necessidade de utilizar aditivo superplastificante, nos teores de 0,60% a 7,80%, com base na massa de cimento Portland mais material cimentício alternativo.

Verificou-se, também, a presença de macro-poros devido à dificuldade de compactação dos compósitos com teores de superplastificante acima de 4,0%, conforme evidenciado na Figura 4.26.



FIGURA 4.26 - MACROPOROS NOS COMPÓSITOS COM 40% DE METACALIM E TEORES DE SUPERPLASTIFICANTE ENTRE 5,8% E 7,8%

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.26, pode-se constatar que:

- A argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS (Ref 1), apresentou os maiores valores de resistência à compressão tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, com diferenças estatisticamente significativas para os demais compósitos;

TABELA 4.26 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (Metacaulim)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28** A	2,61	55,05** A	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01** Q	4,99	28,97** Y	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57** FGH	1,90	39,82** MNOP	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73** CD	2,48	43,91** EFG	1,21
5,0	0,00	0,60	250,00	27,87** LM	3,62	39,64** NOP	3,29
	1,00	0,60	250,00	34,51** CDE	4,31	41,46** IJKLMN	2,44
	2,00	0,60	246,00	37,11** B	4,31	41,74** IJKL	2,42
	3,00	0,60	250,00	34,19** CDEF	3,26	40,93** JKLMNO	3,01
	4,50	0,60	251,00	32,79** EFGH	3,64	39,40** OP	2,34
10,0	0,00	0,70	259,00	26,92** MN	4,89	41,78** IJKL	3,12
	1,00	0,70	250,00	30,35** IJ	3,56	49,57** B	2,50
	2,00	0,70	248,00	33,18** DEFG	3,48	47,74** BC	0,89
	3,00	0,70	250,00	32,19** GH	3,17	46,14** CD	1,64
15,0	4,50	0,70	251,00	30,87* HIJ	2,62	43,77** FG	3,86
	0,00	1,20	248,00	31,79* GHI	0,36	41,90** HIJK	5,18
	1,00	1,20	247,00	32,41* FGH	4,84	43,65** FGH	3,69
	2,00	1,20	245,00	35,64* BC	2,95	42,15* GHIJK	4,42
20,0	3,00	1,20	245,00	33,18* DEFG	3,02	41,70* HIJKLM	2,73
	4,50	1,20	245,00	33,31* GHI	3,68	38,79* PQ	3,86
	0,00	2,60	250,00	27,86** LM	1,81	40,11* KLMNOP	0,78
	1,00	2,60	245,00	29,89** IJK	4,18	42,14* GHIJK	1,04
30,0	2,00	2,60	245,00	29,93** IJK	1,73	45,81* CDE	0,71
	3,00	2,80	250,00	29,86** IJK	3,94	44,46* DEF	0,74
	4,50	2,80	250,00	28,31** KLM	4,54	43,04* FGHI	2,84
40,0	0,00	4,00	255,00	30,27** IJ	4,40	33,05** UV	1,41
	1,00	4,00	252,00	29,36** JKL	7,66	39,95** KLMNOP	5,19
	2,00	4,60	240,00	32,75** EFGH	5,85	42,57** FGHJI	2,39
	3,00	5,40	250,00	30,26** IJ	6,77	39,17** OP	2,39
40,0	4,50	5,70	252,00	24,84** OP	2,79	31,22** X	5,72
	0,00	5,80	256,00	23,37** P	7,48	32,72** UV	2,31
	1,00	6,80	250,00	27,10** MN	2,94	33,82** ST	5,83
	2,00	7,20	240,00	27,21** MN	5,38	37,03** QR	0,54
	3,00	7,80	245,00	25,66** NO	5,86	35,56** RS	3,88
4,50	7,80	243,00	23,96** OP	7,39	33,31** T	1,91	

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento

- Os maiores valores de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com MC 5% com adição de 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de aditivo superplastificante e MC 15% com adição de 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,20% de aditivo superplastificante;
- Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos MC 10%, com adição de 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,70 % de aditivo superplastificante.

Portanto, adotando nesta Fase do estudo a idade padrão para comparação de resistências à compressão de 91 dias (devido a menor velocidade de hidratação dos materiais cimentícios alternativos), fica evidente que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito com o resíduo de *Pinus spp*, por metacaulim, deve se situar na faixa de 10%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por metacaulim e dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão é a variável dependente e os teores de metacaulim, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC_{91d} \text{ (MPa)} = 1 / (1,2481 \times 10^{-5} + 4,9794 \times 10^{-23} \times \text{Exp}([\text{Teor Metacaulim} (\%)]) + 2,6446 \times 10^{-44} / [\text{Teor CaCl}_2 (\%)]^{1/3} + 1,6530 \times 10^{-7} / \text{Ln}([\text{Teor Superplast} (\%)])^{1/3} \dots\dots (20)$$

Na Tabela 4.27 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão.

TABELA 4.27 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM

Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Parâmetros Estatísticos							Significância do Modelo
		Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{critico}	t _{calc}	
Metacaulim	Não Linear	2,708	100,10	0,8794	0,7734	0,7656	1,987	17,33	1,10x10 ⁻¹⁷

Como pode ser observado na Tabela 4.27, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam forte correlação ($0,60 > R > 0,90$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.28.

TABELA 4.28 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor Metacaulim (%)	0,8543	16,790	1,1x10 ⁻¹⁷	Sim
Teor CaCl ₂ (%)	0,1841	3,717	0,04	Sim
Teor Superplast (%)	0,1301	1,650	10,00	Não

Analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.28, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta uma forte correlação em relação ao teor de metacaulim, uma fraca correlação parcial em relação ao CaCl₂.2H₂O e uma fraca correlação parcial em relação ao teor de aditivo superplastificante. Portanto a influência do teor de substituição do cimento por metacaulim é preponderante aos demais componentes da mistura. Como pode ser verificado o teor de aditivo superplastificante não é importante para a formação do modelo.

As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

Na Figura 4.27 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d, do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS, em função do teor de substituição por metacaulim e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

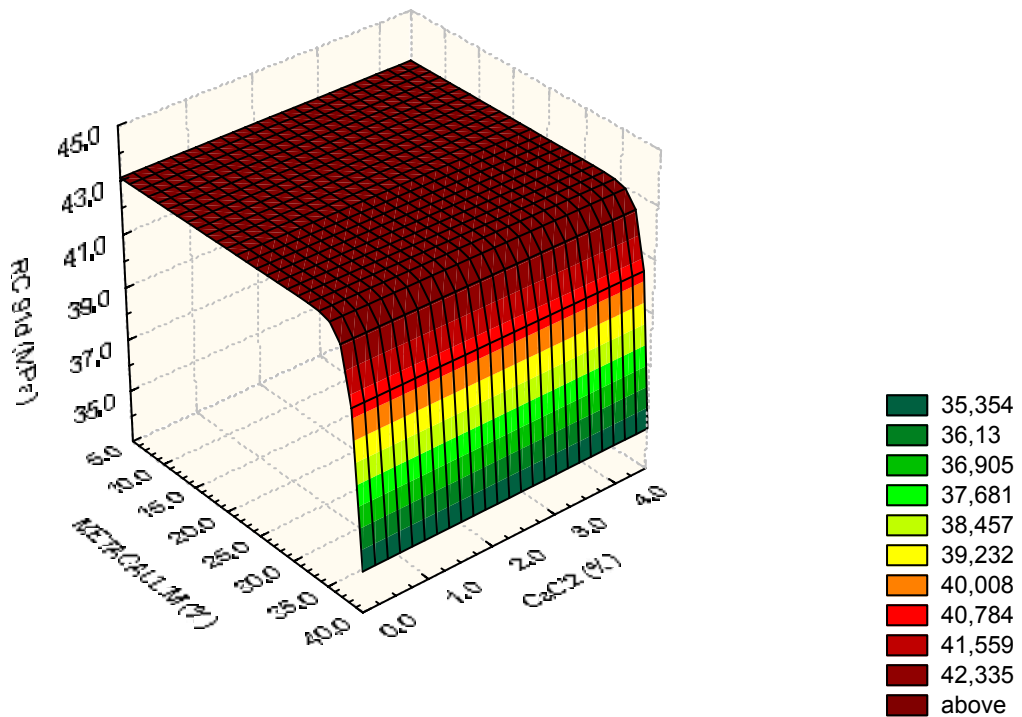


FIGURA 4.27 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACALIM E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

A superfície de resposta demonstra que há pouca variação da RC 91d do compósito para substituição do cimento Portland por teores entre 5% e 35% de metacaulim, sendo que acima desses teores de substituição, verifica-se uma queda acentuada da RC 91d. Verifica-se, também, que a RC 91d, praticamente independe do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o que é confirmado pela de análise numérica da equação n° 20.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.29.

TABELA 4.29 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR METACAU LIM – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl ₂ (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
Metacaulim	10,00%	0,00%	1,10%	45,0848

4.2.4 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza Volante

Na Tabela 4.30 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de cinza volante.

Para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de CaCl₂.2H₂O nos valores de 0%, 1%, 2% 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do efeito *microfíler* apresentado pela cinza volante, não houve a necessidade de utilizar aditivo superplastificante.

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.30, pode-se constatar que:

- A argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS (Ref 1), apresentou os maiores valores de resistência à compressão tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, com diferenças estatisticamente significativas para os demais compósitos;
- Os maiores valores de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com CV 10% com adição de 1%, 2% e 3% de CaCl₂.2H₂O e CV 15% com adição de 2% de CaCl₂.2H₂O;
- Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos CV 5%, com adição de 1%, 2%, 3% e 4,5% de CaCl₂.2H₂O.

TABELA 4.30 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (Cinza Volante)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28** A	2,61	55,05** A	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01** Q	4,99	28,97** LM	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57** GHI	1,90	39,82** DEF	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73** BCDE	2,48	43,91** C	1,21
5,0	0,00	0,00	255,00	29,57** JKL	5,93	42,07** CD	2,30
	1,00	0,00	257,00	31,11** IJ	7,46	48,25** B	2,10
	2,00	0,00	256,00	34,00** CDEFG	5,14	50,16** B	1,93
	3,00	0,00	258,00	32,78** FGHI	4,60	49,65** B	2,87
	4,50	0,00	244,00	31,78** HI	3,18	49,35** B	2,35
10,0	0,00	0,00	275,00	32,23** GHI	1,73	32,03** JK	5,31
	1,00	0,00	259,00	34,63** BCDE	3,26	37,71** FG	1,75
	2,00	0,00	257,00	35,69** BC	1,88	37,69** FG	3,47
	3,00	0,00	265,00	34,94** BCD	2,03	43,42** C	3,24
	4,50	0,00	248,00	33,71** DEFG	1,95	40,45** DE	4,66
15,0	0,00	0,00	255,00	27,81** LM	3,34	35,76** GH	3,99
	1,00	0,00	263,00	33,03** EFGH	2,75	38,73** EF	7,08
	2,00	0,00	265,00	36,09** B	3,51	40,86** DE	5,51
	3,00	0,00	255,00	34,40** BCDEF	3,53	39,26** EF	3,52
	4,50	0,00	247,00	31,76** HI	5,61	39,67** EF	7,02
20,0	0,00	0,00	265,00	28,05** KLM	4,78	32,68** IJK	4,90
	1,00	0,00	272,00	33,25** DEFGH	4,41	40,45** DE	2,21
	2,00	0,00	275,00	33,59** DEFG	1,29	39,08** EF	5,30
	3,00	0,00	270,00	29,81** JK	4,78	37,94** FG	6,85
	4,50	0,00	253,00	28,11** KLM	5,14	34,85** HI	6,09
30,0	0,00	0,00	265,00	23,19** O	5,24	26,95** M	7,65
	1,00	0,00	272,00	26,74** MN	7,81	34,68** HI	6,17
	2,00	0,00	270,00	25,73** N	2,83	35,73** GH	2,03
	3,00	0,00	275,00	27,23** MN	5,18	33,46** HIJ	3,98
	4,50	0,00	275,00	23,47** O	5,63	31,56** JK	6,39
40,0	0,00	0,00	264,00	16,95** R	4,57	26,83** M	6,44
	1,00	0,00	262,00	20,02** Q	5,95	28,37** LM	5,38
	2,00	0,00	270,00	23,61** O	5,49	34,58** HI	3,00
	3,00	0,00	260,00	22,47** OP	6,65	31,87** JK	5,40
	4,50	0,00	253,00	21,16** PQ	5,04	30,55** KL	1,32

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento

Portanto, adotando nesta Fase do estudo a idade padrão para comparação de resistências à compressão de 91 dias (devido a menor velocidade de hidratação dos materiais cimentícios alternativos), fica evidente que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito com o resíduo de *Pinus spp*, por cinza volante, deve se situar na faixa de 5%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por cinza volante e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão aos 91 dias de idade é a variável dependente e os teores de cinza volante e de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC\ 91d\ (MPa) = (-23273 + 221099 / \ln([\text{Teor Cinza Volante } (\%)] - 2,4348 \times 10^{-34} / [\text{Teor CaCl}_2\ (\%)]^{1/3})^{1/3} \dots\dots\dots(21)$$

Na Tabela 4.31 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão.

TABELA 4.31 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE

Parâmetros Estatísticos									
Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{critico}	t _{calc}	Significância do Modelo
Cinza Volante	Não Linear	3,074	318,90	0,9192	0,8450	0,8424	1,980	25,26	4,3x10 ⁻⁴⁶

Como pode ser observado na Tabela 4.31, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam fortíssima correlação ($0,90 > R > 0,99$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.32.

TABELA 4.32 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC 91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor Cinza Volante(%)	0,8604	23,640	$5,4 \times 10^{-18}$	Sim
Teor CaCl_2 (%)	-0,3235	-8,888	$9,0 \times 10^{-13}$	Sim

Analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.32, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta uma forte correlação em relação ao teor de cinza volante e uma média correlação parcial em relação ao $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Portanto a influência do teor de substituição ao cimento é preponderante aos demais componentes da mistura. Como pode ser verificado os dois regressores são importantes para a formação do modelo.

As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

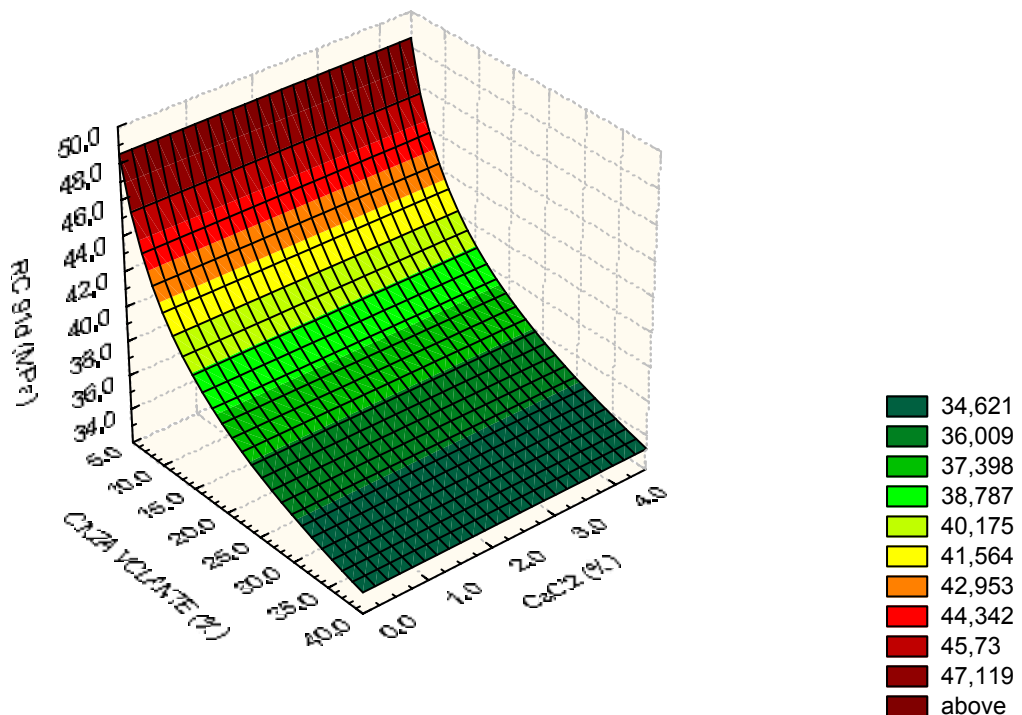


FIGURA 4.28 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Na Figura 4.28 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de substituição por cinza volante e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que a RC 91d do compósito decresce acentuadamente para teores acima de 5%. Verifica-se, também, que a RC 91d, praticamente independe do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o que é confirmado através da análise numérica da equação n° 21.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.33.

TABELA 4.33 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE – COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
Cinza Volante	5,00%	0,00%	0,00%	48,5027

4.2.5 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Escória de Alto-Forno

Na Tabela 4.34 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 25%, 30%, 35%, 40%, 50% e 60% de escória de alto-forno (EAF).

Para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos valores de 0%, 1%, 2% 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do efeito microfíler verificado não houve necessidade da utilização de aditivo superplastificante.

TABELA 4.34 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO FORNO E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (Escória de Alto Forno)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28	2,61	55,05	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01	4,99	28,97	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57	1,90	39,82	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73	2,48	43,91	1,21
25,0%	0,00	0,00	270,00	32,21	3,24	42,09	2,88
	1,00	0,00	270,00	37,85	2,81	45,32	2,82
	2,00	0,00	270,00	38,01	4,79	44,28	1,92
	3,00	0,00	270,00	40,88	3,84	48,83	1,92
	4,50	0,00	270,00	39,78	4,17	46,87	2,82
30,0%	0,00	0,00	275,00	27,61	6,00	39,46	5,92
	1,00	0,00	270,00	33,79	6,06	40,58	2,56
	2,00	0,00	270,00	38,19	3,13	45,24	3,54
	3,00	0,00	270,00	36,87	3,53	45,54	3,51
	4,50	0,00	267,00	40,52	2,66	42,70	5,62
35,0%	0,00	0,00	270,00	26,42	5,28	41,84	2,29
	1,00	0,00	267,00	29,21	6,43	46,40	1,12
	2,00	0,00	266,50	34,27	5,72	47,76	1,90
	3,00	0,00	266,00	35,33	7,30	49,52	1,44
	4,50	0,00	265,00	35,86	3,55	46,67	3,08
40,0%	0,00	0,00	274,00	24,75	5,51	42,28	4,03
	1,00	0,00	273,00	33,26	2,90	45,12	1,72
	2,00	0,00	269,00	34,44	1,58	48,07	3,10
	3,00	0,00	276,00	34,06	3,54	47,14	3,06
	4,50	0,00	276,00	35,17	5,09	46,19	2,02
50,0%	0,00	0,00	260,00	21,48	5,15	36,12	6,78
	1,00	0,00	265,00	23,62	3,92	40,27	5,40
	2,00	0,00	265,00	28,02	2,69	41,97	5,47
	3,00	0,00	270,00	32,00	2,58	40,57	7,70
	4,50	0,00	268,00	33,01	3,68	38,53	4,83
60,0%	0,00	0,00	282,00	20,59	2,61	31,02	5,59
	1,00	0,00	280,00	23,41	2,77	33,19	4,97
	2,00	0,00	282,00	27,60	3,87	35,07	3,05
	3,00	0,00	280,00	29,13	5,56	34,86	7,39
	4,50	0,00	278,00	30,82	3,47	32,79	4,99

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.34, pode-se constatar que:

- Os maiores valores de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com EAF 25% com adição de 3% e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e EAF 30% com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, sendo que os valores apresentados por estes compósitos não apresentaram diferenças estatísticas a 95% de confiança, dos valores determinados com a argamassa padrão de cimento Portland;
- Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para a argamassa padrão de cimento Portland. Os compósitos EAF 25% com adição de 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, EAF 35% com 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e EAF 40% com 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, apresentaram resistências um pouco inferiores, porém, estatisticamente diferentes da argamassa padrão.

Portanto, adotando nesta Fase do estudo a idade padrão para comparação de resistências à compressão de 91 dias (devido a menor velocidade de hidratação dos materiais cimentícios alternativos), fica evidente que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito com o resíduo de *Pinus spp*, por escória de alto-forno, deve se situar na faixa de entre 25% e 40%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por metacaulim e dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão aos 91 dias de idade é a variável dependente e os teores de escória de alto-forno e de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC_{91d} \text{ (MPa)} = 1 / (1,9954 \times 10^{-2} + 4,0104 \times 10^{-8} \times [\text{Teor EAF (\%)}]^3 + 2,8593 \times 10^{-3} \times \text{Exp}(-[\text{Teor CaCl}_2 \text{ (\%)}])) \dots\dots\dots(22)$$

Na Tabela 4.35 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão.

TABELA 4.35 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Parâmetros Estatísticos									
Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{critico}	t _{calc}	Significância do Modelo
EAF	Não Linear	3,074	185,80	0,8721	0,7605	0,7564	1,980	19,28	4,8x10 ⁻³⁵

Como pode ser observado na Tabela 4.35, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam forte correlação ($0,60 > R > 0,90$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.36.

TABELA 4.36 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR EAF

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor EAF (%)	0,8168	18,060	-1,1x10 ⁻¹⁷	Sim
Teor CaCl ₂ (%)	0,3055	6,752	5,9x10 ⁻⁸	Sim

Analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.36, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta uma forte correlação em relação ao teor de escória de alto-forno e uma média correlação parcial em relação ao CaCl₂.2H₂O. Portanto a influência da substituição parcial ao cimento é preponderante aos demais componentes da mistura. Como pode ser verificado os dois regressores são importantes para a formação do modelo.

As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

Na Figura 4.29 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de

substituição por escória de alto-forno e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

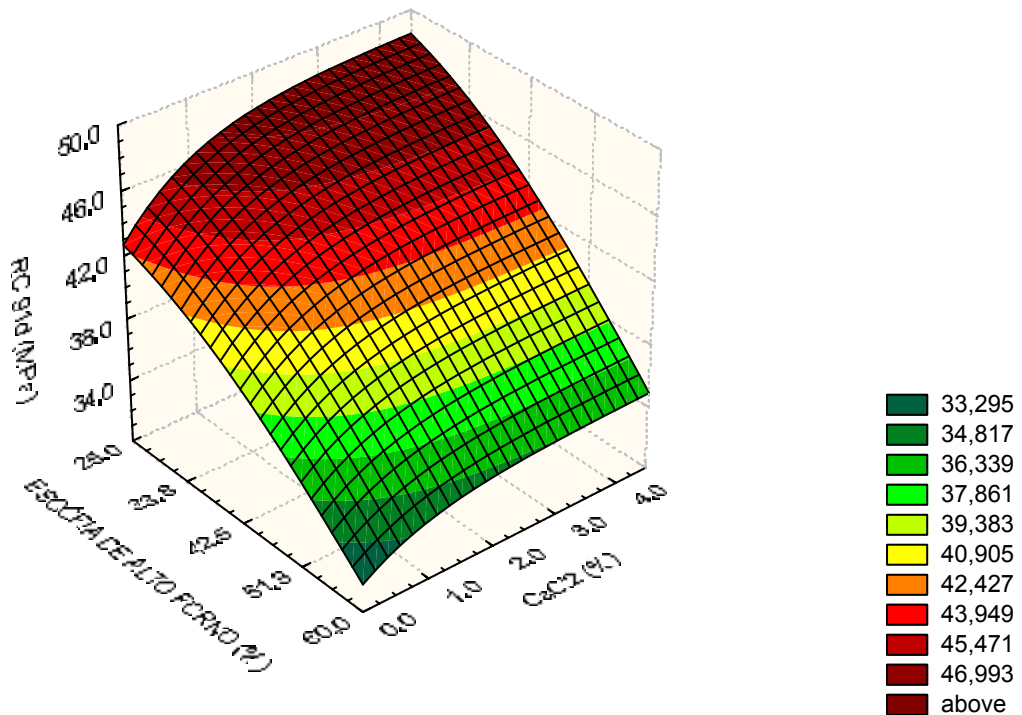


FIGURA 4.29 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

A superfície de resposta demonstra que há decréscimos importantes da RC 91d do compósito para teores de escória de alto-forno acima de 25%. Verifica-se, também, que a RC 91d, depende de maneira significativa, do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, como pode ser verificado através da análise numérica da equação n°22.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.37.

TABELA 4.37 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
EAF	25,00%	4,50%	0,00%	48,5145

4.2.6 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Calcinada

Na Tabela 4.38 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de resíduo de cerâmica calcinada (RCC).

Para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos valores de 0%, 1%, 2% 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição do resíduo de cerâmica, houve a necessidade de utilizar aditivo superplastificante, nos teores de 0,60% a 2,60%, com base na massa de cimento Portland mais material cimentício alternativo.

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.38, pode-se constatar que:

- Aos 7 dias de idade, o compósito RCC 5% com adição de 3% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,70% de aditivo superplastificante apresentou a maior resistência, sendo superior e significativamente diferente, inclusive que a resistência da argamassa padrão de cimento Portland, nesta mesma idade;
- Os compósitos RCC 5% com 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de aditivo superplastificante (ambos) e RCC 10%, com 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de superplastificante, apresentaram resistências aos 7 dias, equiparáveis (sem diferenças estatísticas significativas) a resistência da argamassa padrão de cimento Portland;
- Aos 91 dias de idade, a maior resistência à compressão verificada foi apresentada pela argamassa padrão de cimento Portland, logo após, apresentam-se as resistências determinadas para os compósitos RCC 5%, com 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% e 0,7%, respectivamente, de aditivo superplastificante.

TABELA 4.38 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (RCC)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28** BC	2,61	55,05** A	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01** Q	4,99	28,97** P	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57** IJ	1,90	39,82** HI	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73** GH	2,48	43,91** DEF	1,21
5,0	0,00	0,60	255,00	31,08* JK	7,09	39,88* GHI	3,15
	1,00	0,60	255,00	37,79* BCDE	1,44	44,57* CDE	1,17
	2,00	0,60	250,00	39,65* B	5,50	47,86* B	1,13
	3,00	0,70	250,00	42,19* A	3,50	47,15* BC	5,31
	4,50	0,80	255,00	37,16* CDEF	2,86	43,11* DEF	2,35
10,0	0,00	0,60	255,00	29,57* KL	5,92	35,50* KL	3,58
	1,00	0,60	253,00	33,06* HIJ	2,70	43,13* DEF	2,55
	2,00	0,60	248,00	38,35* BCD	3,08	44,91* CD	2,00
	3,00	0,70	255,00	36,44* DEFG	4,69	42,59* DEF	1,21
	4,50	0,70	254,00	33,24* HIJ	7,06	42,69* DEF	4,02
15,0	0,00	0,60	251,00	32,30* IJ	3,33	37,06* JK	5,31
	1,00	0,60	250,00	35,04* FGH	5,78	41,61* FGHI	5,99
	2,00	0,60	255,00	36,41* DEFG	1,57	42,44* DEFG	1,38
	3,00	0,60	251,00	37,25* CDEF	4,18	43,64* DEF	2,92
	4,50	0,60	250,00	35,64* EFG	8,30	42,80* DEF	4,97
20,0	0,00	0,50	247,00	29,31* KL	7,99	37,01* JK	3,62
	1,00	0,50	245,00	32,85* HIJ	7,10	39,40* IJ	3,39
	2,00	0,60	256,00	35,78* EFG	1,98	42,17* EFGH	5,81
	3,00	0,60	253,00	35,04* FGH	5,11	42,75* DEF	3,00
	4,50	0,60	252,00	34,42* GHI	1,20	42,44* DEFG	2,46
30,0	0,00	1,20	254,00	23,19** OP	6,63	30,13** OP	7,84
	1,00	1,20	254,00	27,51** LM	6,19	32,26** NO	5,25
	2,00	1,20	255,00	28,76** L	7,15	35,74** KL	6,45
	3,00	1,20	255,00	27,78** L	5,51	36,29** KL	3,00
	4,50	1,20	256,00	28,11** L	1,08	35,01** KLM	2,46
40,0	0,00	2,60	260,00	23,54** NOP	6,19	29,65** P	5,10
	1,00	2,60	264,00	24,91** NO	3,74	32,98** MN	6,88
	2,00	2,60	260,00	25,52** MN	2,89	34,57** LM	4,02
	3,00	2,60	250,00	24,05** NOP	4,07	35,56** KL	3,78
	4,50	2,60	260,00	22,72** P	3,93	34,08** LMN	2,66

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento; RCC = Resíduo de Cerâmica Calcínada

Portanto, adotando nesta Fase do estudo a idade padrão para comparação de resistências à compressão de 91 dias (devido a menor velocidade de hidratação dos materiais cimentícios alternativos), fica evidente que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito com o resíduo de *Pinus spp*, por resíduo de cerâmica calcinada, deve se situar na faixa de 5%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por RCC e dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão é a variável dependente e os teores de RCC, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC_{91d} = 27,425 + 25,092 / [RCC]^{1/3} - 7,0138 \times \text{Exp}(-[CaCl2]) + 1,9691 / [Superplast]^2 \dots (23)$$

Na Tabela 4.39 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão.

TABELA 4.39 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACALIM

Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Parâmetros Estatísticos							Significância do Modelo
		Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{crítico}	t _{calc}	
RCC	Não Linear	2,698	216,40	0,9327	0,8700	0,8660	1,985	25,48	1,10x10 ⁻¹⁷

Como pode ser observado na Tabela 4.39, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam fortíssima correlação ($0,90 > R > 0,99$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.40.

TABELA 4.40 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RCC

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC 91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor RCC (%)	0,7368	12,730	$-1,1 \times 10^{-17}$	Sim
Teor CaCl ₂ (%)	-0,4371	-13,440	$5,4 \times 10^{-18}$	Sim
Teor Superplast (%)	0,6757	12,600	$5,4 \times 10^{-18}$	Sim

Analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.40, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta uma forte correlação em relação ao teor de serragem de cerâmica calcinada, uma média correlação parcial em relação ao CaCl₂.2H₂O e uma forte correlação parcial em relação ao teor de aditivo superplastificante. Portanto a influência do teor de substituição do cimento e do aditivo superplastificante são preponderantes. Como pode ser verificado, os três regressores são importantes para a formação do modelo. As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

Na Figura 4.30 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de substituição por sílica ativa e do teor de CaCl₂.2H₂O, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que a RC 91d do compósito decresce significativamente para teores de RCC acima de 5% e aumenta em função do acréscimo dos teores de CaCl₂.2H₂O e do aditivo superplastificante, conforme análise numérica da equação n° 23.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.41.

TABELA 4.41 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RCC: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl ₂ (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
RCC	5,00%	4,50%	0,50%	49,8974

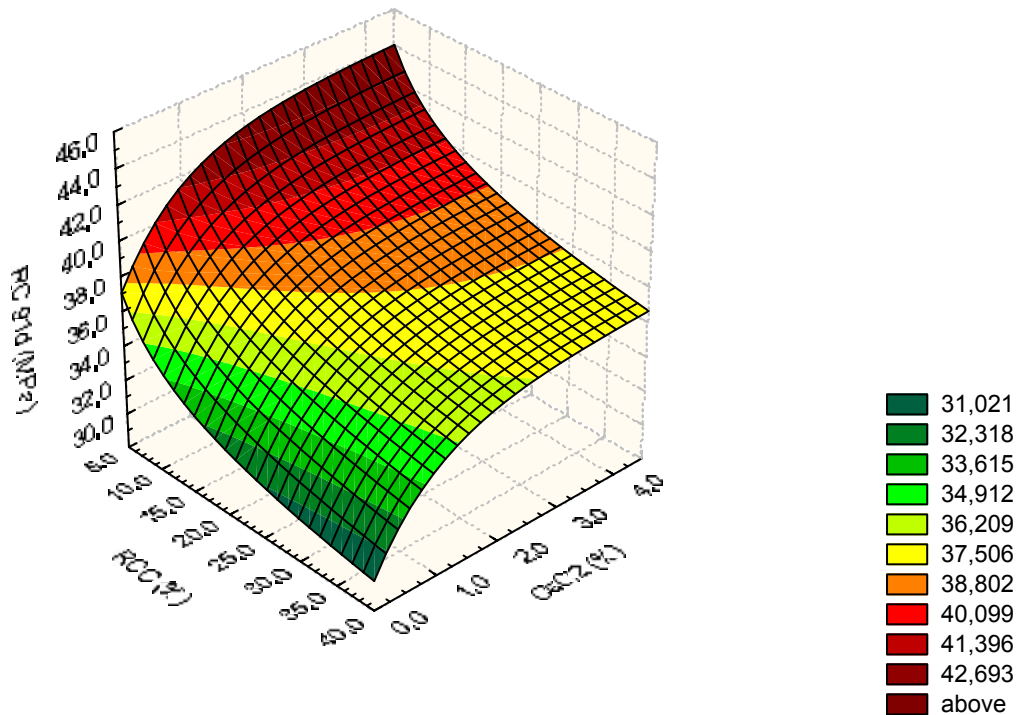


FIGURA 4.30 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO DE CERÂMICA CALCINADA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

4.2.7 Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza de Casca de Arroz

Na Tabela 4.42 apresentam-se os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de cinza de casca de arroz (CCA).

Para cada teor de substituição, foram realizadas análises variando o teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos valores de 0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%, calculados sobre a massa de cimento Portland do compósito. Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição da CCA, houve a necessidade de utilizar aditivo superplastificante, nos teores de 0,60% a 4,20%, com base na massa de cimento Portland mais material cimentício alternativo.

TABELA 4.42 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 E 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE CASCA DE ARROZ E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teor de Substituição (CCA)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	Consistência (mm)	Resistência à Compressão - Valores Médios (MPa)			
				RC 7 dias	CV (%)	RC 91 dias	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	0,00	0,00	157,60	39,28** ^A	2,61	55,05** ^A	3,51
Mad in Natura (Ref 2)	0,00	0,00	283,00	20,01** ^P	4,99	28,97** ^O	5,68
Mad in Natura + CaCl_2 (Ref 3)	4,50	0,00	257,00	32,57** ^{FGH}	1,90	39,82** ^{IJK}	5,46
Mad AF48H + CaCl_2 (Ref 4)	4,50	0,00	248,00	34,73** ^{CDE}	2,48	43,91** ^{EFG}	1,21
5,0	0,00	0,60	270,00	26,54* ^{NO}	5,22	37,40* ^{LM}	4,26
	1,00	0,60	265,00	33,41* ^{DEFG}	2,56	43,36* ^{FGH}	4,47
	2,00	0,60	255,00	36,48* ^{BC}	4,50	43,47* ^{FGH}	1,69
	3,00	0,60	250,00	38,75* ^{AB}	1,44	46,25* ^{BCDE}	2,40
	4,50	1,00	259,00	36,28* ^C	5,20	42,64* ^{FGH}	1,10
10,0	0,00	1,40	258,00	31,15* ^{GHIJ}	5,72	43,84* ^{EFG}	0,99
	1,00	1,40	257,00	34,18* ^{CDEF}	2,77	44,01* ^{EFG}	2,78
	2,00	1,40	256,00	35,28* ^{CDE}	3,00	44,88* ^{DEF}	2,45
	3,00	1,40	256,00	33,60* ^{DEF}	0,53	44,34* ^{DEFG}	2,61
	4,50	1,40	252,00	33,06* ^{EFGH}	1,96	41,16* ^{HIJ}	5,67
15,0	0,00	1,60	254,00	26,97* ^{MNO}	7,34	44,66* ^{DEFG}	2,26
	1,00	1,60	253,00	30,16* ^{IJK}	6,76	47,83* ^B	1,15
	2,00	1,60	251,00	35,27* ^{CDE}	3,35	46,59* ^{BCD}	2,36
	3,00	1,80	252,00	35,67* ^{CD}	4,13	45,18* ^{CDEF}	2,59
	4,50	2,00	258,00	28,86* ^{JKLM}	5,88	36,25* ^M	3,91
20,0	0,00	2,20	255,00	31,05* ^{HIJ}	3,63	42,22* ^{GHI}	3,06
	1,00	2,40	253,00	35,64* ^{CD}	4,65	46,30* ^{BCDE}	1,54
	2,00	2,40	250,00	32,30* ^{FGHI}	3,28	46,20* ^{BCDE}	0,90
	3,00	2,40	260,00	30,13* ^{IJK}	6,94	42,63* ^{FGH}	4,98
	4,50	2,60	252,00	25,66* ^O	8,33	38,96* ^{JKL}	1,49
30,0	0,00	2,80	240,00	26,56** ^{NO}	8,57	39,38* ^{JKL}	2,82
	1,00	2,80	242,00	29,36** ^{JKL}	3,46	44,04** ^{EFG}	5,52
	2,00	3,00	265,00	30,24** ^{IJK}	7,85	47,57** ^{BC}	3,83
	3,00	3,20	258,00	28,35** ^{KLMN}	4,26	44,07** ^{EFG}	1,76
	4,50	3,20	253,00	27,15** ^{MNO}	1,99	32,41** ^N	3,46
40,0	0,00	3,40	245,00	25,84** ^O	5,11	39,33** ^{JKL}	2,16
	1,00	3,60	251,00	26,22** ^O	6,38	40,03** ^{IJK}	7,78
	2,00	4,00	256,00	27,55** ^{LMNO}	4,64	41,21 ^{HIJ}	5,08
	3,00	4,20	240,00	27,49** ^{LMNO}	3,66	43,10* ^{FGH}	3,52
	4,50	4,20	240,00	26,09** ^O	6,37	37,91** ^{KLM}	6,69

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias obtidas de 3 repetições; ** Médias obtidas de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CPV ARI = Compósito produzido com 100% cimento Portland; Mad AF48H = Compósito com 100% cimento Portland e Madeira D.Máx = 4,8 mm tratada; Mad 4,8 mm in Natura = Compósito produzido com 100% cimento Portland e madeira sem pré-tratamento; CCA = Cinza de Casca de Arroz

Analisando os valores das resistências à compressão apresentadas na Tabela 4.42, pode-se constatar que:

- A argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS (Ref 1), apresentou os maiores valores de resistência à compressão tanto aos 7 dias quanto aos 91 dias, com diferenças estatisticamente significativas para os demais compósitos;
- O maior valor de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com CCA 5% com adição de 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6%, sendo que este compósito não apresentou diferença estatística significativa para a argamassa padrão de cimento Portland. Logo abaixo deste, apresenta-se o compósito CCA 5%, com 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de superplastificante;
- Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos CCA 5% com 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de superplastificante, CCA 15% com 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,6% de superplastificante (ambos), CCA 20% com 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 2,4% de superplastificante e CCA 30%, com 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 3% de superplastificante, sendo que entre estes, não se verificaram diferenças estatísticas significantes a 95% de nível de confiança.

Adotando 91 dias como idade padrão para comparação de resistências à compressão, verifica-se que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito, fica na faixa entre 5% a 30%.

Para caracterização de uma função que expresse a dependência da resistência à compressão do compósito, aos 91 dias de idade, em função dos teores de substituição do cimento Portland por CCA e dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante, procedeu-se uma análise multivariada, baseada em uma regressão múltipla, onde a resistência à compressão é a variável dependente e os teores de CCA, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante, são as variáveis independentes.

Utilizando o *software Infer*[®] 3, determinou-se o seguinte modelo para a variável dependente:

$$RC\ 91d\ (MPa) = 83,084 - 10,540 \times \ln([Teor\ CCA\ (\%)]) - 0,06525 \times \exp([Teor\ CaCl_2\ (\%)]) - 17,084 / [Teor\ Superplast\ (\%)] \dots(24)$$

Na Tabela 4.43 são apresentados os parâmetros estatísticos do modelo de regressão.

TABELA 4.43 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE REGRESSÃO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA

Parâmetros Estatísticos									
Substituição ao Cimento Portland	Modelo	Ft	Fc	R	R ²	R ² _{Ajust}	t _{critico}	t _{calc}	Significância do Modelo
CCA	Não Linear	2,773	49,09	0,8533	0,7281	0,7132	2,004	12,13	1,4x10 ⁻¹³

Como pode ser observado na Tabela 4.43, os parâmetros estatísticos do modelo determinado pela análise multivariada apresentam forte correlação ($0,60 > R > 0,90$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância, é superior a 99,99%.

As correlações parciais entre os regressores do modelo, são apresentadas na Tabela 4.44.

TABELA 4.44 - CORRELAÇÕES PARCIAIS DO MODELO PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA

Variável	Correlação Parcial	t Calculado	Significância (%)	Importância para o Modelo
RC91d (MPa)	1,0000	-	-	-
Teor CCA (%)	-0,4278	-22,800	0,000	Sim
Teor CaCl ₂ (%)	-0,4534	-8,456	1,6x10 ⁻⁹	Sim
Teor Superplast (%)	0,1706	-18,950	0,000	Sim

Analisando as correlações parciais, apresentadas na Tabela 4.44, verifica-se que a RC 91d, do compósito, apresenta média correlação parcial em relação aos teores de cinza de casca de arroz e de CaCl₂.2H₂O e uma fraca correlação parcial em relação ao teor de aditivo superplastificante. Portanto a influência do teor de substituição do cimento e do CaCl₂.2H₂O são preponderantes. Como pode ser verificado os três regressores são importantes para a formação do modelo.

As correlações parciais foram determinadas e testadas a um nível de significância de 5% e 95% de confiança.

Na Figura 4.31 apresenta-se a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de substituição por CCA e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que a RC 91d do compósito decresce significativamente para teores de CCA acima de 5% e decresce significativamente, também, para teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ acima de 3%. A resistência do compósito aumenta significativamente com o aumento do teor de aditivo superplastificante, como pode ser verificado mediante análise numérica da equação n°24.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta a composição e a expectativa de resistência à compressão aos 91 dias de idade apresentados na Tabela 4.45.

TABELA 4.45 - SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR CCA: COMPOSIÇÃO OTIMIZADA E EXPECTATIVA DE RC 91D

Otimização do Modelo				
Substituição ao Cimento Portland	Teor de Substituição (%)	Teor de CaCl_2 (%)	Teor de Superplast. (%)	RC 91d (Expectativa) (MPa)
CCA 1	5,00%	0,00%	1,00%	48,9713
CCA 2	30,00%	0,00%	3,20%	41,8314

Conforme apresentado na Tabela 4.45, optou-se, no caso de substituição do cimento Portland por CCA, estabelecer, além da composição determinada pela otimização do modelo obtido pela análise de regressão, que indica o teor otimizado de 5% de CCA e faz a previsão de uma RC 91d de 48,9713 MPa, a adoção de uma composição com 30% de substituição do cimento por CCA, que de acordo com o modelo matemático desenvolvido, deve resultar numa RC 91d de 41,8314 MP. ***Tal opção se deve ao fato de tentar incorporar ao compósito, a maior quantidade possível do resíduo (CCA), reforçando o enfoque ecológico desta pesquisa.***

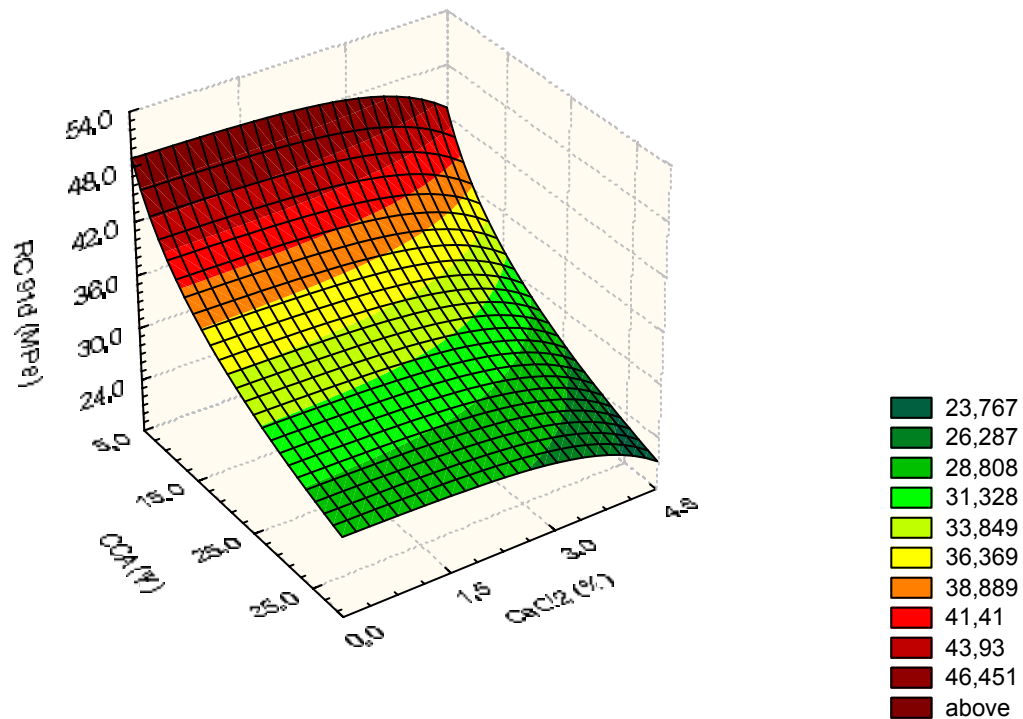


FIGURA 4.31 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DEMONSTRANDO A VARIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 91 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CCA E DO TEOR DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

4.2.8 Análise dos Compósitos com Substituições Parciais do Cimento Portland Otimizadas

A fim de comprovar as expectativas de RC 91d e de determinar as demais características físicas e mecânicas dos compósitos cimento-madeira, produzidos com o resíduo de *Pinus spp* e com as substituições parciais do cimento Portland, procedeu-se a produção e teste dos compósitos.

Na Tabela 4.46 apresentam-se as características físicas dos compósitos produzidos com as substituições parciais do cimento Portland e dos compósitos de referência.

Com relação à massa específica apresentada pelos materiais, observa-se:

- A argamassa padrão de cimento Portland apresentou a maior massa específica média ($2.145,93 \text{ kg/m}^3$), com diferenças estatísticas significativas para os demais;

- O compósito CCA 2 Máx (com 30% de substituição do cimento por CCA) apresentou a menor massa específica ($1.343,30 \text{ kg/m}^3$), com diferenças estatísticas significativas para os demais.
- Os outros compósitos apresentaram massas específicas variando entre $1.594,17 \text{ kg/m}^3$ (compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a $1.437,04 \text{ kg/m}^3$ (compósito com substituição de 10% de cimento por sílica ativa);

TABELA 4.46 - SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS COMPÓSITOS

Compósito	Massa Específica (kg/m^3)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	2.145,93* ^A	0,72	15,02* ^G	1,73	7,00* ^F	1,59
Mad in Natura (Ref 2)	1471,10* ^{DE}	0,45	38,98* ^A	0,74	26,49* ^B	0,79
Mad in Natura + 4.5% CaCl_2 (Ref 3)	1594,17* ^B	0,62	36,29* ^{DE}	1,15	22,77* ^E	3,04
Mad AF-48H + 4.5% CaCl_2 (Ref 4)	1.503,79* ^C	0,88	35,77* ^E	0,81	23,79* ^D	1,61
SA Máx (10% Silica Ativa)	1.437,04** ^F	0,78	37,10** ^{CD}	2,96	25,82** ^{BC}	3,64
MC Máx (10 % Metacaulim)	1.492,64* ^{CD}	0,54	34,47* ^F	0,71	23,10* ^{DE}	1,15
CV Máx (5% Cinza Volante)	1.474,26* ^{DE}	0,75	37,78* ^{BC}	2,92	25,63* ^C	3,48
EAF Máx (25% EAF)	1.503,79* ^C	0,27	34,71* ^F	2,04	23,09* ^{DE}	2,57
CCA 1 Máx (5% CCA)	1.466,58** ^E	0,86	34,55** ^F	1,09	23,56** ^{DE}	1,61
CCA 2 Máx (30% CCA)	1.343,30* ^G	2,60	38,64* ^{AB}	2,19	28,80* ^A	2,21
RCC Máx (5% RCC)	1.469,95* ^{DE}	0,95	39,09* ^A	1,62	26,60* ^B	2,38

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias de 4 repetições; ** Médias de 5 repetições; CV = Coeficiente de Variação; CaCl_2 = Aditivo acelerador de pega (Cloreto de Cálcio Bi-Hidratado) SA = Silica Ativa; MC = Metacaulim; CV = Cinza Volante; EAF = Escória de Alto Forno; CCA = Cinza de Casca de Arroz; RCC = Resíduo de Cerâmica Calcinada

Quanto ao índice de vazios, que expressa a porosidade dos compósitos, verifica-se:

- A argamassa padrão de cimento, como esperado, apresentou o menor valor (15,02%), com diferenças estatísticas significativas a 95 de confiança de todos os demais;
- As maiores porosidades foram determinadas para os compósitos produzidos com substituição do cimento por 5% de RCC (39,09%), com o

resíduo de *Pinus spp in natura* (38,98%) e com 30% de CCA (38,64%), sem diferenças estatísticas entre eles, porém com diferenças significativas para os demais;

- Os menores valores para porosidade foram determinados para os compósitos com substituição de 10% MC (34,47%), 5% CCA (34,55%) e 25% EAF (34,71%), sem diferenças estatísticas entre si;

Quanto à absorção de água, constatou-se:

- Como esperado, a menor absorção foi determinada para a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS (7,00%), apresentando diferenças estatísticas significativas para todos os demais compósitos;
- Os maiores valores para absorção de água, foram determinados para o compósito 30% CCA (28,80%), com diferenças significativas para os demais;
- Os menores valores foram determinados para os compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (22,77%), 25% EAF (23,09%), 10% MC (23,10%) e 5% CCA (23,56%), sem se notar diferenças estatísticas, a 95% de confiança, entre si.

Nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34, apresentam-se os gráficos relativos às características físicas dos compósitos de referência e dos otimizados, em relação à substituição parcial do cimento Portland pelos seis materiais cimentícios alternativos.

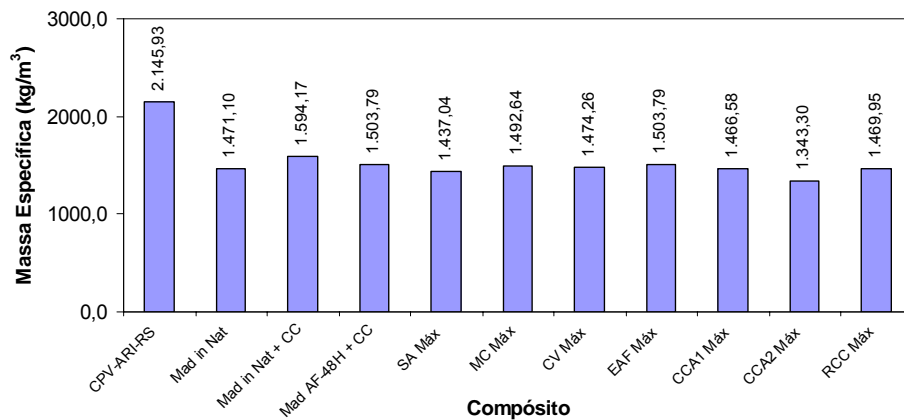


FIGURA 4.32 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: MASSA ESPECÍFICA DO COMPÓSITO

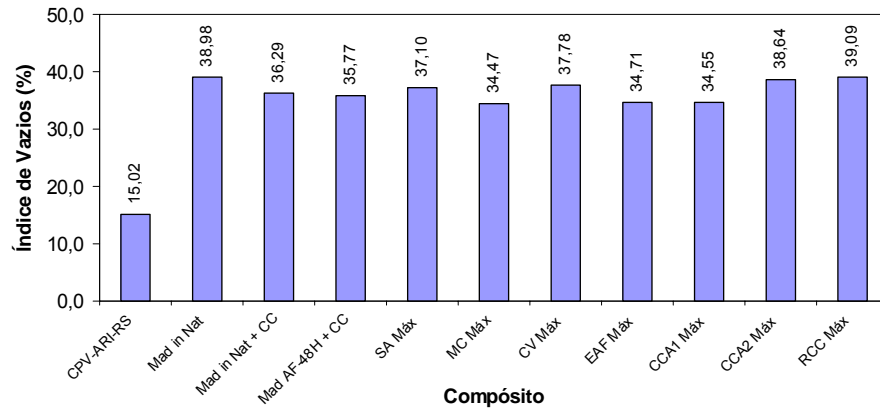


FIGURA 4.33 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE) DO COMPÓSITO

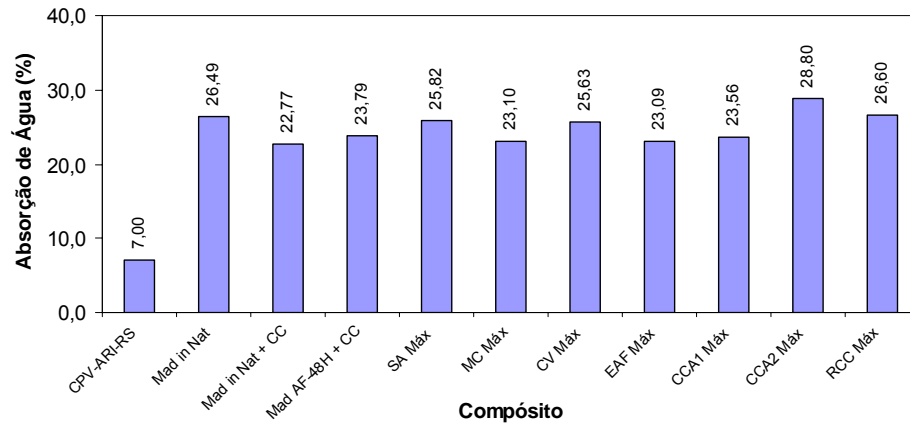


FIGURA 4.34 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: ABSORÇÃO DE ÁGUA DO COMPÓSITO

As características mecânicas dos compósitos de referência e dos produzidos com os traços com substituições parciais do cimento Portland CPV ARI RS pelos seis materiais alternativos, são apresentadas na Tabela 4.47.

Conforme os resultados determinados quanto às resistências à compressão aos 7 dias de idade, verificam-se:

- O maior valor médio foi determinado para a argamassa padrão de cimento Portland (39,28 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Os maiores valores médios entre os compósitos com o resíduo de *Pinus spp*, foram determinados para os materiais produzidos com 10% SA

(34,82 MPa) e para a Ref. 4 (resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com 100% de cimento Portland (34,73 MPa);

- A menor resistência à compressão foi determinada para o compósito Ref. 1 (resíduo de *Pinus spp in natura*), com 100% de cimento Portland (20,01 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais.

TABELA 4.47 - SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

Compósito	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)	
	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
CPV ARI (Ref 1)	39,28* ^A	2,61	52,31* ^A	2,64	55,05* ^A	3,51	3,79* ^{CD}	1,27
Mad in Natura (Ref 2)	20,01* ^E	4,99	24,59* ^E	1,29	28,97* ^G	5,68	1,95* ^G	2,33
Mad in Natura + 4.5% CaCl_2 (Ref 3)	32,57* ^C	1,90	38,64* ^C	3,60	39,82* ^F	5,46	2,57* ^F	2,63
Mad AF-48H + 4.5% CaCl_2 (Ref 4)	34,73* ^B	2,48	42,72* ^B	2,69	43,91* ^{DE}	1,21	2,67* ^F	2,13
SA Máx (10% Silica Ativa)	34,82* ^B	2,27	42,75* ^B	5,09	46,30* ^{BC}	1,56	4,21** ^A	4,49
MC Máx (10 % Metacaulim)	32,86** ^C	5,04	39,02** ^C	4,23	45,34** ^{CD}	1,80	3,93** ^{BC}	5,27
CV Máx (5% Cinza Volante)	29,72** ^D	4,94	37,96** ^{CD}	2,59	47,52** ^B	3,29	3,84** ^{CD}	4,08
EAF Máx (25% EAF)	32,18** ^C	4,40	38,29** ^C	4,95	43,03** ^E	3,04	3,65* ^D	5,38
CCA 1 Máx (5% CCA)	29,18** ^D	5,39	38,35* ^C	4,74	45,30* ^{CD}	4,53	3,39** ^E	4,60
CCA 2 Máx (30% CCA)	29,25** ^D	2,13	36,28** ^D	1,71	44,03** ^{DE}	3,73	3,74** ^{CD}	4,72
RCC Máx (5% RCC)	31,52** ^C	4,66	37,45** ^{CD}	2,99	43,93* ^{DE}	2,73	4,06** ^{AB}	3,86

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias de 4 repetições; ** Médias de 5 repetições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração; CaCl_2 = Aditivo acelerador de pega (Cloreto de Cálcio Bi-Hidratado) SA = Silica Ativa; MC = Metacaulim; CV = Cinza Volante; EAF = Escória de Alto Forno; CCA = Cinza de Casca de Arroz; RCC = Resíduo de Cerâmica Calcificada; Máx = Indicação de traço otimizado

Quanto às resistências à compressão aos 28 dias de idade, verificou-se:

- O maior valor médio foi determinado para a argamassa padrão de cimento Portland (52,31 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Os maiores valores médios entre os compósitos foram determinados para os materiais produzidos com 10% SA (42,75 MPa) e para a Ref. 4 (resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com 100% de cimento Portland (42,72 MPa), sem diferenças estatísticas entre si;
- A menor resistência à compressão foi determinada para o compósito Ref. 1 (resíduo de *Pinus spp in natura*), com 100% de cimento Portland (20,01 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais.

Quanto às resistências à compressão aos 91 dias de idade:

- O maior valor médio foi determinado para a argamassa padrão de cimento Portland (55,05 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Os maiores valores médios entre os compósitos com o resíduo de *Pinus spp*, foram determinados para os materiais produzidos com 5% CV (47,52MPa) e 10% SA (46,30 MPa), sem diferenças estatísticas entre si;
- A menor resistência à compressão foi determinada para o compósito Ref. 1 (resíduo de *Pinus spp in natura*), com 100% de cimento Portland (28,97 MPa), com diferenças estatísticas significativas para os demais.

Quanto à resistência à tração, determinada por compressão diametral aos 28 dias de idade, verifica-se:

- A maior resistência à tração foi apresentada pelos compósitos com 10% SA (4,21 MPa) e 5% RCC (4,06 MPa);
- Logo abaixo, se apresenta o compósito com 10% MC (3,93 MPa), 5% CV (3,84 MPa), Ref.1 (argamassa padrão de CPV ARI RS) com 3,79 MPa e com 30% CCA (3,74 MPa);
- O menor valor verificado para resistência à tração, foi verificado para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura* (Ref. 2), com 1,95 MPa.

A evolução das resistências à compressão dos compósitos com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS pelos teores otimizados de sílica ativa (10%), metacaulim (10%) e cinza volante (5%), em comparação aos valores determinados para os quatro compósitos de referência, podem ser verificadas na Figura 4.35.

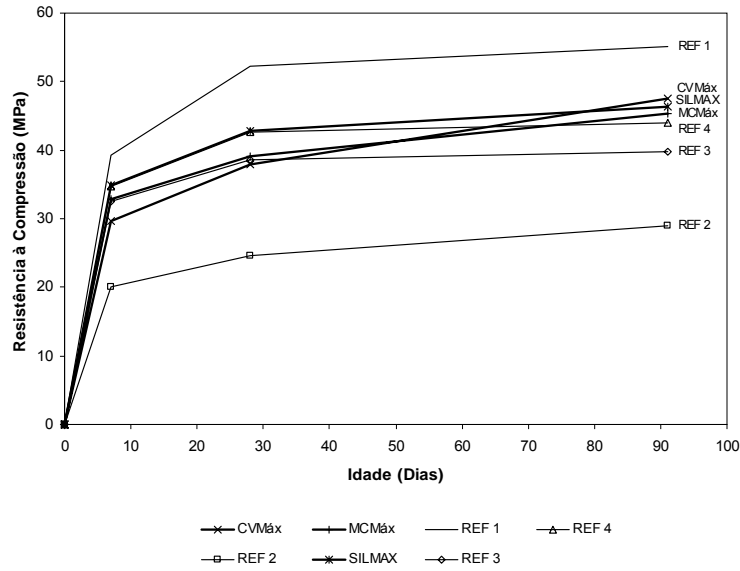


FIGURA 4.35 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE

Na Figura 4.36, apresenta-se a evolução das resistências à compressão dos compósitos produzidos com as substituições otimizadas de escória de alto-forno (25%), resíduo de cerâmica calcinada (5%) e cinza de casca de arroz (CCA1, com 5% de substituição e CCA 2, com 30% de substituição).

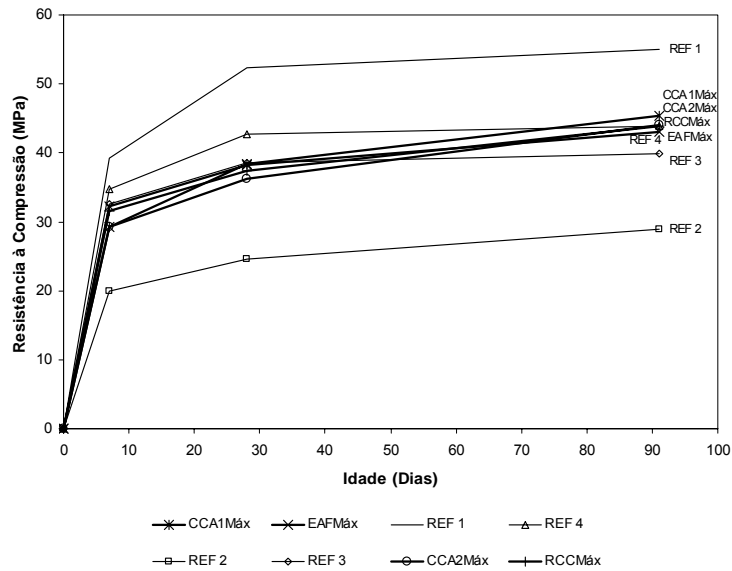


FIGURA 4.36 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE

Na Figura 4.37, apresenta-se a comparação entre os valores determinados para a resistência à tração, determinada por compressão diametral dos corpos-de-prova, na idade de 28 dias.

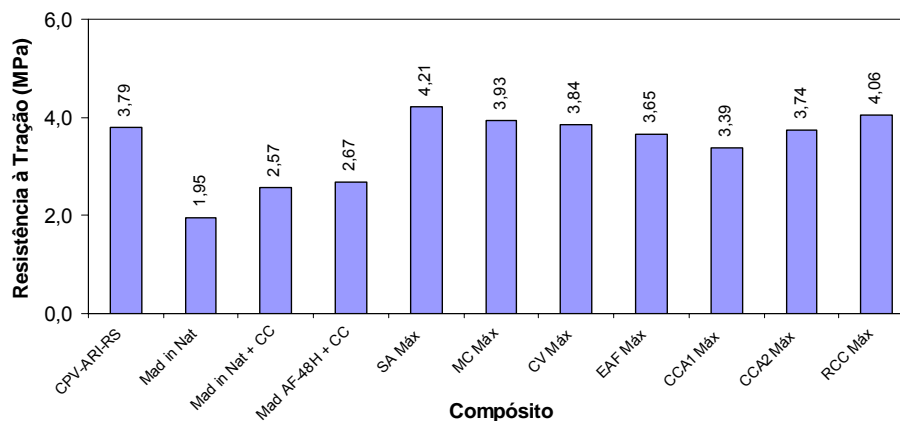


FIGURA 4.37 - SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 28 DIAS DE IDADE

A fim de analisar a precisão dos valores de resistência à compressão aos 91 dias de idade, previstos pelos modelos determinados pela análise multivariada, apresenta-se, na Tabela 4.48, um resumo de cada traço otimizado, bem como as expectativas de RC 91d e os valores determinados através de ensaios com os compostos.

TABELA 4.48 - VARIAÇÃO APRESENTADA ENTRE AS EXPECTATIVAS E AS RESISTÊNCIAS MÉDIAS OBTIDAS AOS 91 DIAS

Substituição ao Cimento Portland	RC 91d (Expectativa) (MPa)	RC 91d (Obtidos) (MPa)	Variação (%)	Variação Admitida pelo Modelo (%)
10% Sílica Ativa	49,6423	46,30	-6,73%	± 16,76%
10% Metacaulim	45,0848	45,34	0,57%	± 23,44%
5% Cinza Volante	48,5027	47,52	-2,03%	± 15,76%
25% EAF	48,5145	43,03	-11,30%	± 24,36%
5% RCC	49,8974	43,93	-11,96%	± 13,40%
5% CCA	48,9713	45,30	-7,50%	± 28,68%
30% CCA	41,8314	44,03	5,26%	± 28,68%

Conforme apresentado na Tabela 4.48, os resultados determinados através de ensaios de determinação da resistência à compressão aos 91 dias de idade, demonstraram que:

- Os compósitos com o resíduo de *Pinus spp* produzidos com 30% MC e 30% CCA, apresentaram resultados superiores aos previstos pelo modelo de regressão, com variação percentual de + 0,57% e + 5,26%, respectivamente;
- Os compósitos produzidos com substituições parciais do cimento Portland por 10% SA, 5% CV, 25% EAF, 5% RCC e 5% CCA, apresentaram valores de resistência à compressão aos 91 dias de idade, inferiores aos determinados pela análise de regressão, com diferenças percentuais de – 6,73%, - 2,03%, -11,30%, -11,96% e -7,50%, respectivamente;
- Os compósitos com 25% EAF e 30% CCA, apesar dos altos teores de substituição, apresentaram resistências mecânicas altas, comprovando a eficiência desses materiais alternativos quanto a reação com o Ca(OH)_2 do cimento na formação do CSH (responsável pelas características mecânicas do cimento hidratado).
- Todas as diferenças percentuais estão dentro dos limites apresentados pelos modelos de regressão, que em função dos coeficientes de determinação ajustados (R^2_{Ajust}), ficam entre $\pm 13,40\%$ (menor valor para substituições parciais do cimento por RCC) e $\pm 28,68\%$ (maior valor, para substituições do cimento por CCA).

4.2.9 Análise de Substituições Parciais do Cimento Portland – Curvas de Hidratação dos Traços Otimizados

Efetuuou-se a monitoração com Redes de Bragg em fibras óticas, a fim de determinar as influências que as substituições parciais ao cimento Portland e também dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante exerceriam sobre a hidratação dos compósitos, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.49.

TABELA 4.49 - SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – TRAÇOS OTIMIZADOS: TEMPERATURAS E TEMPOS DE HIDRATAÇÃO

Compósito	T _{máx} (°C)	CV (%)	Tempo para T _{máx} (h)	CV (%)
CPV ARI RS (Ref 1)	96,04 ^A	1,44	3,10 ^H	3,23
Mad in Natura (Ref 2)	70,72 ^D	2,29	7,63 ^A	3,30
Mad in Natura + 4,5% CaCl ₂ (Ref 3)	76,34 ^C	2,08	4,85 ^D	5,19
AF-48H + 4,5% CaCl ₂ (Ref 4)	75,19 ^C	1,05	3,46 ^G	1,67
SA Máx (10% Silica Ativa)	78,46 ^B	2,05	5,10 ^{CD}	6,79
MC Máx (10 % Metacaulim)	78,54 ^B	0,24	5,20 ^C	3,33
CV Máx (5% Cinza Volante)	75,43 ^C	1,83	4,43 ^E	2,60
EAF Máx (25% EAF)	53,28 ^G	1,53	5,83 ^B	1,98
CCA 1 Máx (5% CCA)	66,85 ^E	2,36	3,83 ^F	3,98
CCA 2 Máx (30% CCA)	57,02 ^F	1,41	5,86 ^B	2,60
RCC Máx (5% RCC)	71,57 ^D	0,17	3,56 ^{FG}	1,62

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 3 medições; CV = Coeficiente de Variação;

Em relação às temperaturas máximas atingidas durante a hidratação dos compósitos, verifica-se:

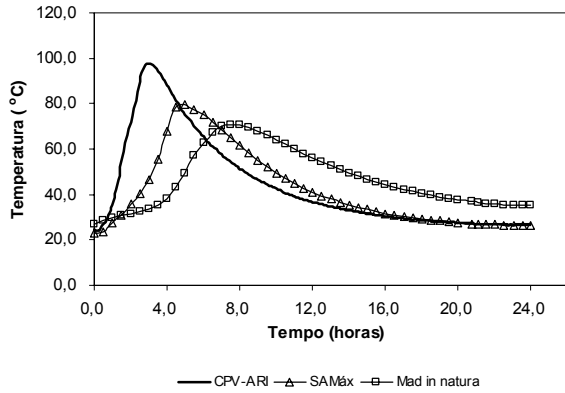
- A argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS apresentou a maior T_{máx}, com diferenças estatísticas significativas às demais;
- Os compósitos que apresentaram menores T_{máx}, 53,28°C e 57,02°C foram, conforme esperado, os produzidos com os maiores teores de substituição, 25% EAF e 30% CCA, respectivamente, pois a temperatura depende exclusivamente da hidratação do cimento Portland.
- O efeito do CaCl₂.2H₂O presente nos compósitos com 25% EAF e 5% RCC, não se mostrou tão eficaz, pois os valores de T_{máx}, ficaram abaixo do compósito Ref. 4 (produzido com o mesmo tipo de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e mesmo teor de 4,5% de CaCl₂.2H₂O);
- O tipo de substituição ao cimento Portland, ao que tudo indica, é de fundamental importância em relação às T_{máx} desenvolvidas, pois para

alguns tipos, tais como a sílica ativa e o metacaulim, mesmo com teores de 10% de substituição ao cimento, apresentaram $T_{m\acute{a}x}$ superiores aos compósitos de referência produzidos com 100% de cimento e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

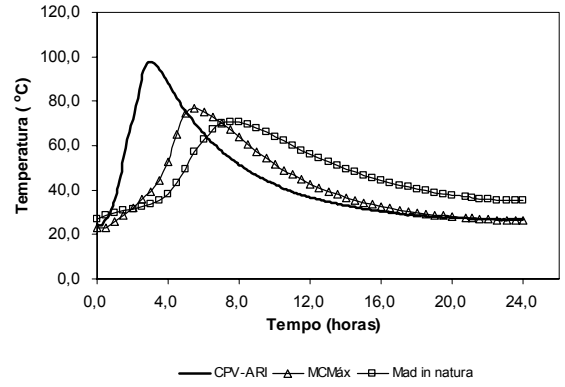
Em relação aos tempos determinados para atingir às temperaturas máximas, verifica-se:

- O menor tempo para $T_{m\acute{a}x}$ foi determinado para a argamassa padrão de cimento Portland CPV ARI RS, conforme esperado;
- O maior tempo para $T_{m\acute{a}x}$, foi determinado para o compósito produzido com o resíduo de *Pinus spp in natura*;
- Dentre os compósitos produzidos com substituições parciais do cimento Portland, aqueles com maiores teores de material cimentício alternativo (25% EAF e 30% CCA), foram os que apresentaram reações de hidratação mais lentas;
- No compósito 25% EAF a adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ não foi suficiente para acelerar a hidratação, apresentando tempo para $T_{m\acute{a}x}$, significativamente superior aos compósitos de referência, com 100% de cimento e mesmos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- No compósito 5% RCC, a adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ produziu o efeito de acelerar a hidratação do compósito, igualando, estatisticamente, o tempo para atingir a $T_{m\acute{a}x}$ de hidratação ao mesmo tempo do compósito de referência produzido com mesmo tipo de tratamento do resíduo de *Pinus spp* e com 100% de cimento Portland (Ref 4).

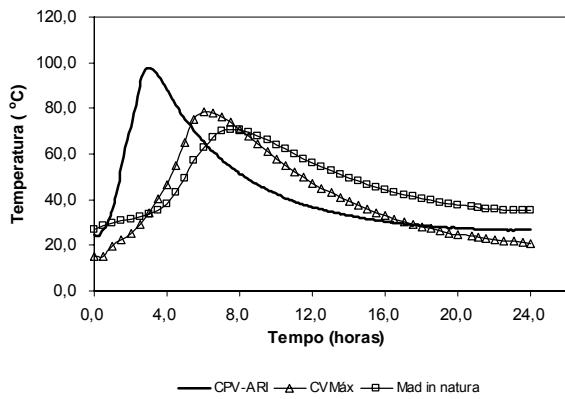
Na Figura 4.38 são apresentadas às curvas de hidratação dos compósitos produzidos com as substituições otimizadas do cimento Portland CPV ARI RS, pelos materiais cimentícios utilizados.



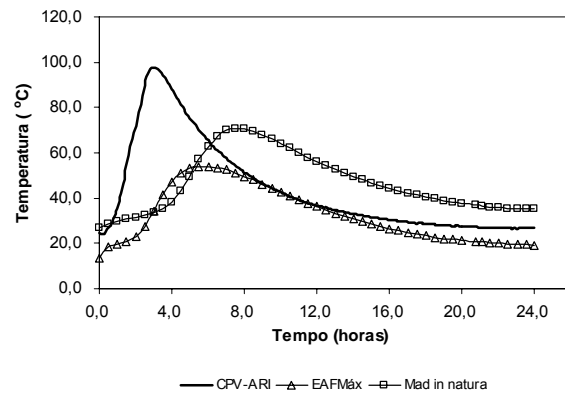
(A) – Sílica Ativa



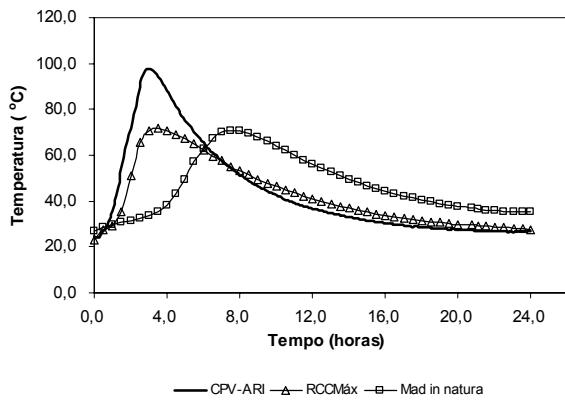
(B) – Metacaulim



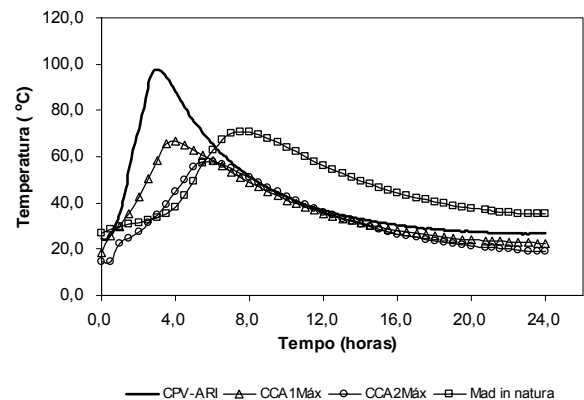
(C) – Cinza Volante



(D) – Escória de Alto-Forno



(E) - Resíduo de Cerâmica Calcificada



(F) – Cinza de Casca de Arroz

FIGURA 4.38 - SUBSTITUIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND – CURVAS DE HIDRATAÇÃO DOS TRAÇOS OTIMIZADOS

4.3 RESULTADOS DA 3ª. FASE DA PESQUISA – PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE REFERÊNCIA

4.3.1 Definição dos Parâmetros de Produção

Proporcionamento do Agregado Total

O proporcionamento do agregado foi realizado através da determinação da composição entre agregados (miúdo e graúdo) que resulte no menor índice de vazios possível, ou maior massa unitária compactada, conforme método de dosagem da ABCP.

Os valores das massas unitárias compactadas, determinadas conforme NBR NM 45 (2006), para os diversos proporcionamentos dos agregados minerais utilizados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 4.50.

TABELA 4.50 - MASSAS UNITÁRIAS PARA COMBINAÇÕES DE AGREGADOS CONFORME NBR NM 45 (2006)

Agregado Graúdo (%)	Agregado Miúdo (%)	Massa Unit. Compactada * (kg/m³)
80,0	20,0	1.820,00
70,0	30,0	1.846,00
60,0	40,0	1.882,00
50,0	50,0	1.892,00
40,0	60,0	1.874,00
30,0	70,0	1.823,00
20,0	80,0	1.800,00

* Valores médios de 3 medições

Os valores das massas unitárias compactadas foram dispostas em um gráfico de dispersão (Figura 4.39), através do qual se pode determinar o melhor ajuste, conforme apresentado na Tabela 4.51.

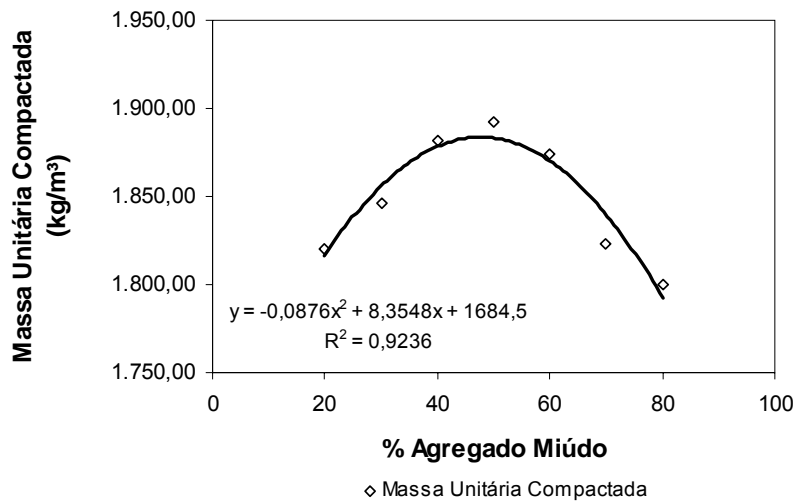


FIGURA 4.39 - DISPERSÃO DAS MASSAS UNITÁRIAS COMPACTADAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE AGREGADO MIÚDO

TABELA 4.51 - PESQUISA DA PROPORÇÃO ÓTIMA DE AGREGADO MIÚDO

Característica : Proporcionamento do Agregado Total			
Equação	R ²	Proporção de Agregado Miúdo (%)	Massa Unitária Compactada (kg/m ³)
$y = -0,0876x^2 + 8,3548x + 1684,5$	0,9236	48,00%	1883,71

De acordo com o modelo que melhor se ajusta a dispersão dos valores de massa unitária compactada (Tabela 4.51), a melhor proporção de agregado miúdo mineral do traço para produção dos blocos de concreto, seria de 48% de agregado miúdo e 52% de agregado graúdo. **Por uma questão de prática adotou-se a proporção de 50% de cada agregado, em volume.**

Os traços em massa, determinados com base nas características dos agregados disponíveis e do proporcionamento adotado, são apresentados na Tabela 4.52.

TABELA 4.52 - TRAÇOS PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE REFERÊNCIA

Materiais	Traços em Volume		
	1 : 6	1 : 8	1 : 10
Cimento CPV ARI RS (kg)	335,00	265,00	220,00
Areia (kg)	1.019,63	1.052,53	1.073,31
Brita 0 (kg)	993,49	1.025,54	1.045,79
Água (UM = 6,0%)(kg)	140,89	140,58	140,35

Tipo de Equipamento Empregado

Conforme indicado no Capítulo 3, os blocos foram produzidos numa vibroprensa marca Trillor Montana, tipo MBX 200.

Umidade de Moldagem

Em função das características de trabalho da máquina vibroprensa, determinou-se na prática, após uma série de tentativas, que as umidades de moldagem que resultaram os melhores blocos foram:

- Traço 1:6 e 1:8: Umidade de moldagem igual a 6,5%;
- Traço 1:10: Umidade de moldagem igual a 6,0%.

Tempos de Moldagem

Da mesma forma, determinou-se que os blocos puderam ser produzidos de forma satisfatória com os seguintes tempos:

- Tempos de Alimentação:..... Variável – processo manual;
- Tempo de pré-vibração: 2 a 3 segundos;
- Tempo de vibro-compactação:.. 6 segundos;
- Tempo de desforma:..... 2 segundos;
- Tempo de ciclo: 10 a 12 segundos.

4.3.2 Características Físicas dos Blocos de Referência

Nesta Fase do estudo determinou-se a amostra mínima em função das características de produção da fábrica de blocos de concreto. Em função do desvio padrão de 1,94 MPa e do coeficiente de variação de 9,81%, determinados em função do ensaio à compressão de 30 blocos de concreto com 7 dias de idade, determinou-se qual a amostra mínima deveria ser de 4 corpos-de-prova.

Na Tabela 4.53 são apresentadas as características físicas dos blocos de referência e onde podem ser notadas muitas semelhanças entre os 3 traços estabelecidos como padrão.

TABELA 4.53 - BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Série	ME Fresco (kg/m ³)	CV (%)	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
BL 1 : 6	2.423,73 ^A	0,53	2.328,31 ^A	0,49	12,17 ^A	2,87	5,23 ^A	3,00
BL 1 : 8	2.398,31 ^A	0,92	2.289,06 ^B	0,52	11,94 ^A	4,13	5,22 ^A	4,45
BL 1 : 10	2.356,95 ^B	1,16	2.242,36 ^C	0,85	12,12 ^A	1,88	5,40 ^A	2,71

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; ME = Massa Específica; BL = Bloco; 1:6, 1:8 e 1:10 = traços de concreto nas proporções em volume de 1 (cimento) para "n" (agregados secos) CV = Coeficiente de variação

A comparação entre as características físicas dos blocos produzidos com os três traços de referência são apresentados nos gráficos à Figura 4.40.

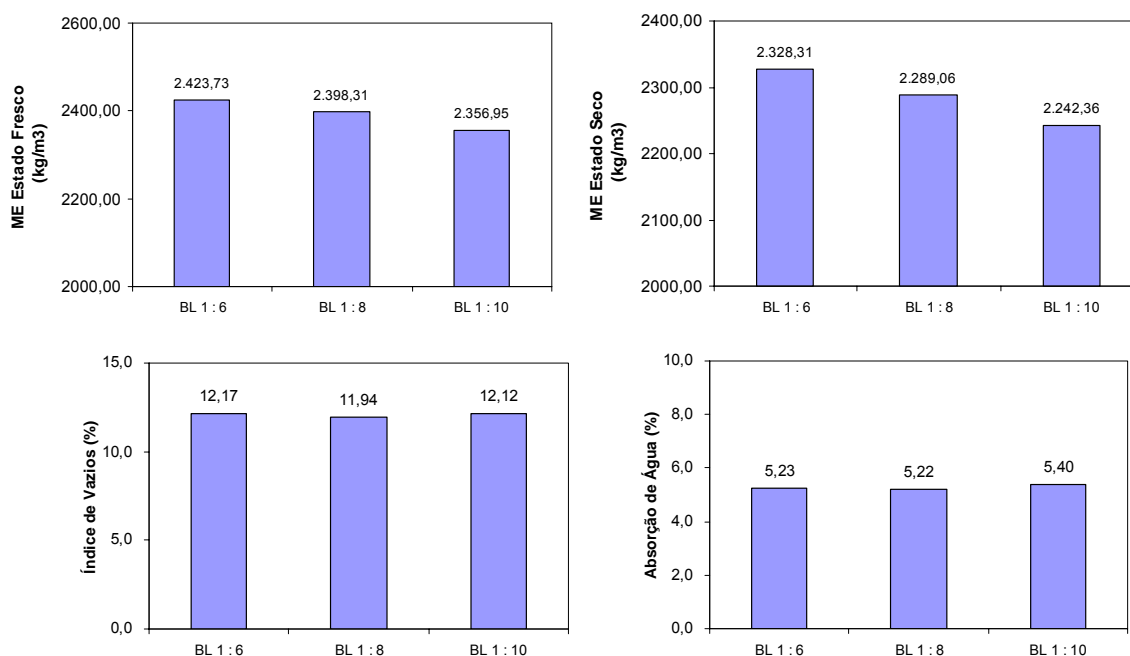


FIGURA 4.40 - BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Quanto às características físicas determinadas pelos blocos de referência, verificam-se:

- Como pode ser verificado, não houve diferenças estatísticas significativas a 95% de confiança, para as massas específicas dos blocos no estado

fresco, produzidos com os traços 1:6 e 1:8, sendo ambos diferentes dos blocos produzidos com o traço 1:10;

- Quanto à massa específica no estado seco, os blocos produzidos com os 3 traços apresentaram diferenças significativas entre si;
- As demais características físicas (índice de vazios e absorção de água) dos blocos produzidos com os 3 traços de referência não apresentaram diferenças estatísticas significativas a 95% de confiança, conforme evidenciado pelas mesmas letras indicadas ao lado dos valores expressos na tabela;
- Os blocos produzidos com os três traços de referência, apresentaram absorção de água, inferiores a máxima recomendada pela norma NBR 6.136 (2008), que é de 10% para blocos produzidos com agregados normais e 13% para blocos produzidos com agregados leves.

4.3.3 Características Mecânicas dos Blocos de Referência

Na Tabela 4.54 são apresentados os valores das resistências à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade, dos blocos produzidos com os traços 1:6, 1:8 e 1:10.

TABELA 4.54 - BLOCOS DE REFERÊNCIA: CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Série	Resistência à Compressão (MPa)							
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)
BL 1 : 6	13,31 ^A	4,84	14,69 ^A	3,95	18,66 ^A	4,77	19,12 ^A	5,74
BL 1 : 8	11,19 ^B	1,74	13,08 ^B	1,67	14,65 ^B	0,30	15,13 ^B	2,56
BL 1 : 10	5,99 ^C	6,98	10,83 ^C	2,6	13,06 ^C	3,86	13,85 ^C	1,41

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 4 repetições; ME = Massa Específica; BL = Bloco; 1:6, 1:8 e 1:10 = traços de concreto nas proporções em volume de 1 (cimento) para "n" (agregados secos) CV = Coeficiente de variação; RC = Resistência à Compressão

Como podem ser verificado, as resistências determinadas para os blocos produzidos com cada um dos três traços estabelecidos, apresentaram diferenças estatísticas significativas para os demais, em todas as idades consideradas, sendo:

- Os maiores valores foram determinados para os blocos produzidos com o traço 1:6 e as menores, para os blocos produzidos com o traço 1:10, conforme esperado;
- Pelos valores determinados, qualquer um dos três traços pode ser utilizado para a produção de blocos de concreto estrutural classes A, B ou C, pois aos 28 dias de idade, os blocos produzidos com os três traços estabelecidos foram superiores a 3,0 MPa, 4,0 MPa e 6,0 MPa, respectivamente.

Na Figura 4.41 apresenta-se a comparação da resistência apresentada nas quatro idades pelos blocos produzidos com os traços 1:6, 1:8 e 1:10.

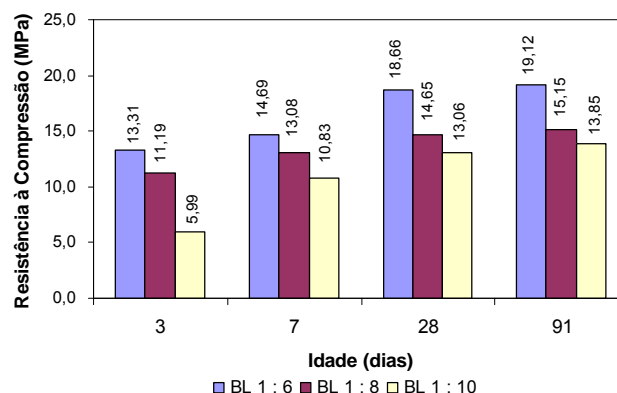


FIGURA 4.41 - BLOCOS DE REFERÊNCIA: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 3, 7, 28 E 91 DIAS DE IDADE

No gráfico apresentado na Figura 4.42, pode-se acompanhar a evolução das resistências à compressão dos blocos produzidos com os três traços de referência, em função da idade, bem como efetuar uma comparação com a resistência mínima, determinada pela NBR 6.136 (2008).

Diante dos resultados determinados, adotou-se para a continuidade da pesquisa, o traço 1:10 como referência, por aliar a economia (em função do menor consumo de cimento Portland), com as características físicas e resistências à compressão em todas as idades, acima da dos valores mínimos recomendados pela norma NBR 6.136 (2008) para blocos para utilização em alvenaria estrutural.

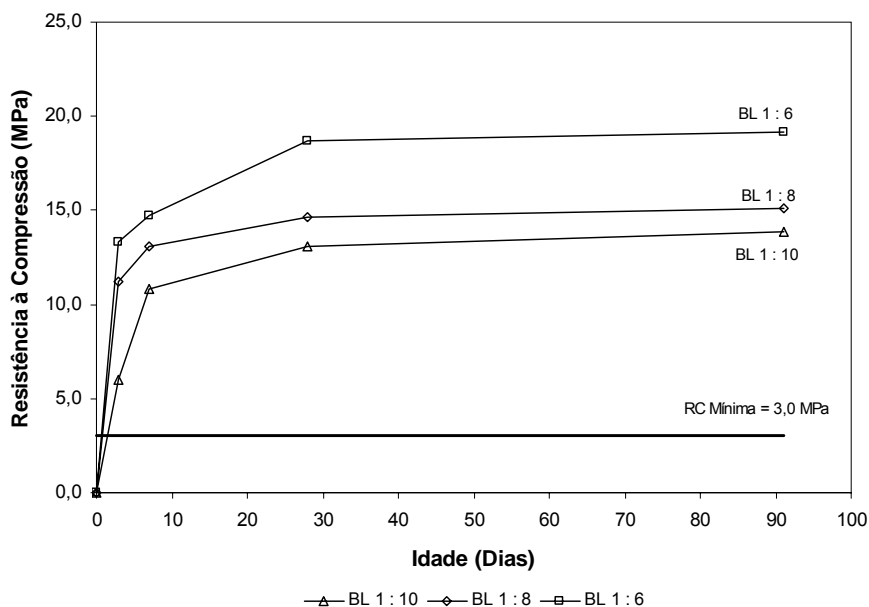


FIGURA 4.42 - BLOCOS DE REFERÊNCIA: EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM A IDADE

4.4 RESULTADOS DA 4ª FASE DA PESQUISA - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM POR VIBRO-COMPRESSÃO

A máquina produtora de blocos, de acordo com informações do fabricante, imprime durante a fabricação de 3 blocos, que apresentam área líquida do topo igual a $937,50 \text{ cm}^2$, de cada vez, uma carga de $1.010,00 \text{ kgf}$, por um período de tempo de $6,0$ segundos, perfazendo uma solicitação unitária por área de $1,07 \text{ kg/cm}^2$. Como o corpo-de-prova cilíndrico $D_n = 50 \text{ mm}$, apresenta área de $19,635 \text{ cm}^2$, a carga sobre ele, para reproduzir o efeito da máquina produtora de blocos deveria ser de $21,153 \text{ kgf}$. Para facilitar a operação do sistema alternativo, que é operado manualmente, optou-se por adotar, para produção de cada corpo-de-prova cilíndrico, uma carga de $10,5 \text{ kgf}$ (aproximadamente a metade da carga transferida pela máquina produtora de blocos). Portanto, para conseguir-se o mesmo índice de compactação da vibro-prensa, provavelmente seria necessário um tempo bem maior de compactação com o sistema alternativo.

Para a pesquisa do tempo de vibro-compactação para produzir-se um concreto com as mesmas características da máquina produtora de blocos, prepararam-se misturas de materiais com as mesmas proporções (traço) utilizados na produção dos blocos de concreto traço 1:10, inclusive com a mesma umidade de moldagem de 6,5%.

A partir daí, passou-se a produzir corpos-de-prova cilíndricos $D_n = 50$ mm, com tempos de moldagem de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 e 60 segundos, sendo que para cada tempo de moldagem considerada, foi determinada a massa específica do concreto no estado fresco. O Tempo Equivalente de Moldagem, seria, então, o tempo de moldagem com o sistema alternativo, que produzisse um concreto com a mesma massa específica no estado fresco, e conseqüentemente, as mesmas características físicas e mecânicas, que os blocos produzidos na máquina vibro-prensa, com o mesmo concreto traço 1:10.

A amostra mínima, determinada com base na produção com o sistema alternativo de vibro-compactação de 30 corpos-de-prova, ensaiados à compressão aos 7 dias de idade, resultou em 4 corpos-de-prova ($RC\ 7d_{Méd} = 4,00$ MPa, $sd = 0,38$ MPa e $CV = 9,48\%$).

Na Tabela 4.55 apresentam-se as massas específicas no estado fresco e a resistência à compressão aos 7 dias de idade, dos corpos-de-prova cilíndricos produzidos com o sistema alternativo nos diferentes tempos de moldagem.

Como pode ser verificado na Tabela 4.55, as massas específicas no estado fresco do concreto traço 1:10 produzido com o sistema alternativo variaram muito pouco, não apresentando diferenças estatísticas significativas ao nível de confiança de 95%, entre os concretos produzidos com 5, 10 e 15 segundos de moldagem ou entre os corpos-de-prova produzidos com 20, 25, 30, 35, 40 e 50 segundos de vibro-compactação.

Por outro lado, as resistências à compressão aos 7 dias de idade apresentaram uma diversificação maior, porém os corpos-de-prova produzidos com 15, 20, 25, 30 e 35 segundos, não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si.

TABELA 4.55 - SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Tempo de Moldagem (s)	ME Fresco (kg/m ³)	CV (%)	RC 7 dias (MPa)	CV (%)
5,0	2.310,01* E	0,74	9,67* F	4,98
10,0	2.329,05* DE	0,74	11,66* E	1,51
15,0	2.348,42* CDE	0,50	12,38* DE	2,28
20,0	2.370,71* BCD	1,15	12,56* D	4,42
25,0	2.380,14* BC	1,47	12,62* D	5,31
30,0	2.394,03* B	0,43	12,29* DE	2,15
35,0	2.382,59** BC	1,14	12,40** D	5,40
40,0	2.396,99** B	1,63	13,44** C	3,68
50,0	2.412,55** B	1,71	14,38** B	2,61
60,0	2.466,44** A	0,26	15,80** A	2,54

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança;
 * Médias de 3 repetições; ** Médias de 4 repetições; CV = Coeficiente de Variação; ME = Massa Específica

Na Figura 4.43, apresenta-se a dispersão dos valores de massa específica no estado fresco do concreto produzido com o sistema alternativo em função do tempo de moldagem.

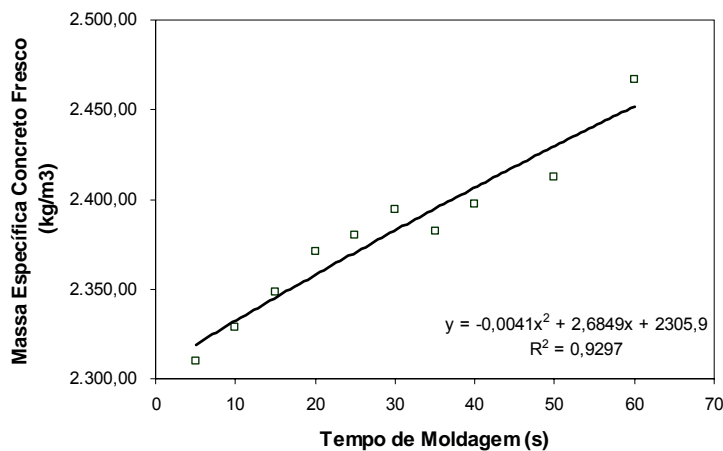


FIGURA 4.43 - SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A função que proporciona o melhor ajuste dos valores, bem como o tempo equivalente de moldagem para produção de um concreto traço 1:10 com massa

específica igual a dos blocos produzidos na máquina vibro-prensa (MEF = 2.356,95 kg/m³), é apresentada na Tabela 4.56.

TABELA 4.56 - DETERMINAÇÃO DO TEMPO EQUIVALENTE DE MOLDAGEM

Característica : Tempo Equivalente de Moldagem			
Modelo	R ²	Massa Específica no Estado Fresco (kg/m ³)	Tempo de Moldagem (s)
$y = - 0,0041x^2 + 2,6849x + 2305,9$	0,9297	2.356,95	27,1145

Na Figura 4.44 apresenta-se a variação da Resistência à compressão aos 7 dias de idade em função dos diversos tempos de moldagem com o sistema alternativo.

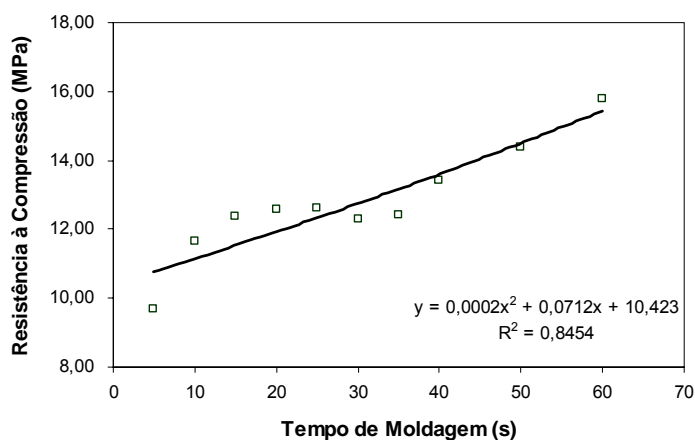


FIGURA 4.44 - SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE MOLDAGEM EQUIVALENTE

O modelo que melhor representa o ajuste dos pontos dispersos e a expectativa de resistência à compressão aos 7 dias de idade, determinada através da inferência deste modelo ao tempo de moldagem equivalente de 27,1145 segundos, pode ser verificado na Tabela 4.57.

TABELA 4.57 - EXPECTATIVA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS

Característica : Resistência à Compressão aos 7 dias			
Modelo	R ²	Tempo de Moldagem Equivalente (s)	Expectativa de RC 7d (MPa)
$y = 0,0002x^2 + 0,0712x + 10,423$	0,8454	27,1145	12,50

Para confirmar o tempo de moldagem equivalente e a expectativa de RC 7d, produziu-se a moldagem de uma série de corpos-de-prova com o sistema alternativo de

moldagem e efetuou-se a comparação com as características físicas (Tabela 4.58) e mecânicas (Tabela 4.59) dos blocos de concreto produzidos em fábrica.

TABELA 4.58 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS COM O SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

Material	ME Fresco (kg/m ³)	CV (%)	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
BL 1 : 10	2356,95* A	1,16	2242,36* B	0,85	12,12* B	1,88	5,40* B	2,71
CP 50 mm T 1 : 10	2368,31** A	2,53	2323,03** A	2,50	14,92** A	3,98	6,43** A	6,15

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; *Médias de 4 medições; ** Médias obtidas de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; BL 1:10 = Bloco de concreto produzido com traço 1 : 10 em volume; CP 50 mm T 1 : 10 = Corpo de Prova Cilindrico com Diâmetro Nominal de 50 mm, produzido com concreto traço 1 : 10 em volume; ME = Massa Específica

Na Tabela 4.58, pode-se verificar que:

- Não há diferenças estatísticas significativas entre as massas específicas dos blocos e dos corpos-de-prova, no estado fresco, como era esperado;
- Quanto às massas específicas no estado seco, os materiais produzidos com os dois sistemas de produção apresentaram diferenças significativas, o mesmo ocorrendo para os índices de vazios dos dois materiais;
- A absorção de água dos dois materiais, apesar de estarem abaixo do limite determinado pela norma NBR 6.136 (2008), apresentam diferenças significativas entre si.

Na Figura 4.45 apresenta-se a comparação das características físicas dos blocos e dos corpos-de-prova, determinados para os blocos de concreto produzidos em fábrica e para os corpos-de-prova, produzidos com o mesmo concreto traço 1:10, através do sistema alternativo de moldagem em laboratório.

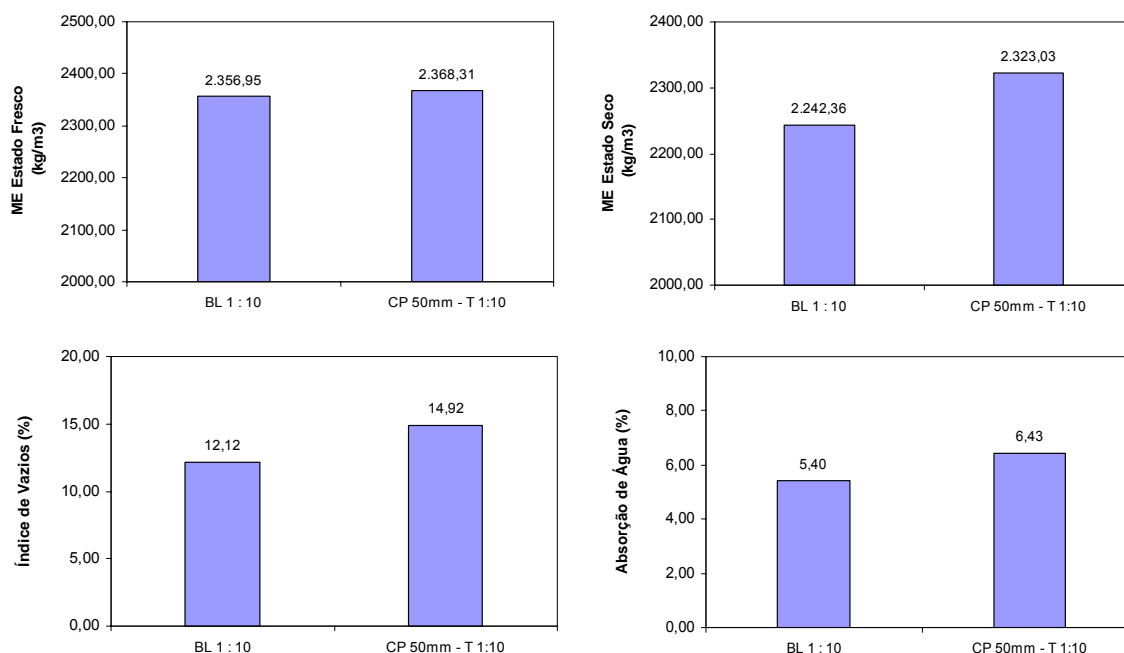


FIGURA 4.45 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

Na Tabela 4.59, compara-se as resistências à compressão, determinadas aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade, dos blocos de concreto traço 1:10 e dos corpos-de-prova produzidos com o sistema alternativo de moldagem.

TABELA 4.59 - COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS COM O SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

Material	Resistência à Compressão (MPa)							
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)
BL 1 : 10	5,99* ^A	6,98	10,83* ^A	2,6	13,06* ^A	3,86	13,85* ^A	1,41
CP 50 mm T 1 : 10	5,57** ^A	5,53	10,26** ^A	6,25	12,38** ^A	3,06	13,46** ^A	5,54

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; *Médias de 4 medições; ** Médias obtidas de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; BL 1:10 = Bloco de concreto produzido com traço 1 : 10; CP 50 mm T 1 : 10 = Corpo de Prova Cilindrico com Diâmetro Nominal de 50 mm, produzido com concreto traço 1 : 10; RC = Resistência à Compressão

Como pode ser percebido, não se verificaram diferenças estatísticas significativas a 95% de confiança para as resistências à compressão, entre blocos de concreto traço 1:10 e corpos-de-prova cilíndricos, produzidos com o sistema alternativo de moldagem, para as quatro idades do material.

A RC 7d dos corpos-de-prova cilíndricos resultou 17,92% à menor que a expectativa de resistência determinada na Tabela 4.57.

Na Figura 4.46, apresenta-se a representação gráfica da comparação destas resistências à compressão.

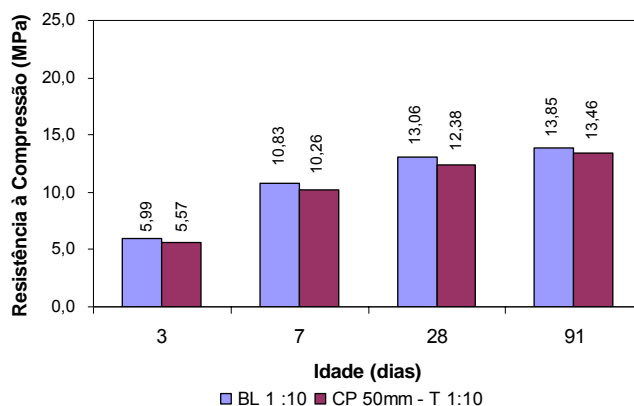


FIGURA 4.46 - COMPARAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

No gráfico apresentado na Figura 4.47, pode-se verificar o desenvolvimento da compressão com a idade, apresentada pelos blocos de concreto traço 1:10 e dos corpos-de-prova cilíndricos, produzidos com o mesmo concreto, no sistema alternativo de moldagem.

Com base nos resultados verificados para as resistências à compressão determinadas para os CP cilíndricos produzidos com o sistema alternativo de moldagem e dos blocos, produzidos na máquina produtora de blocos, considera-se validado o sistema alternativo de moldagem de vibro-compressão, bem como o tempo equivalente de moldagem de 27,1145 segundos, para a produção e pesquisas envolvendo o concreto para a produção de blocos, traço 1:10, em laboratório.

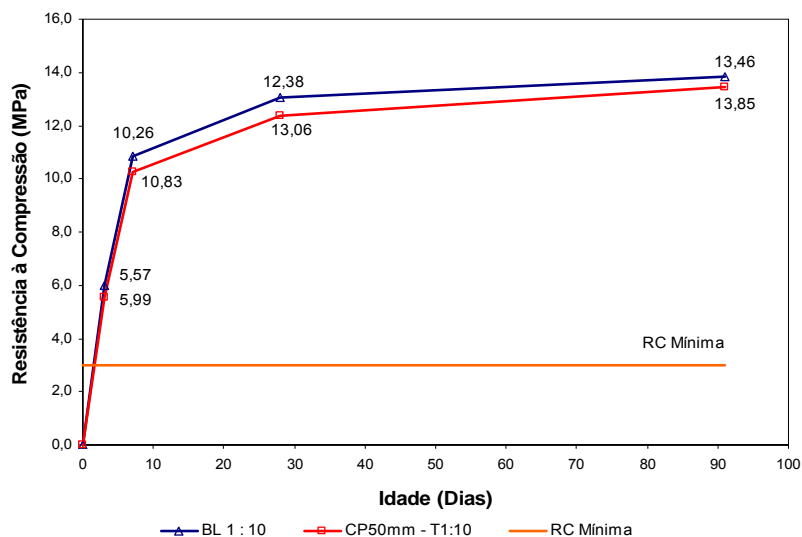


FIGURA 4.47 - COMPARAÇÃO ENTRE A EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO TRAÇO 1:10 E DOS CORPOS DE PROVA CILINDRICOS (DN = 50 mm) TRAÇO 1:10 PRODUZIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

4.5 RESULTADOS DA 5ª FASE DA PESQUISA – ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO MINERAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp*, NO TRAÇO PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS

Nesta Fase do estudo, efetuou-se uma pesquisa para verificar o maior percentual possível de substituição do agregado miúdo mineral (areia) do concreto para blocos traço 1:10, pelo resíduo de *Pinus spp*, de forma a manter a resistência à compressão acima do limite imposto pela norma NBR 6.136 (2008), para blocos para alvenaria estrutural.

Desta forma, procedeu-se a produção de corpos-de-prova cilíndricos, com Dn = 50 mm, com o concreto para blocos traço 1:10, moldados com o sistema alternativo de moldagem por vibro-compressão, com o tempo equivalente de moldagem de 27,1145 segundos e com substituições do agregado miúdo mineral por 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de seu volume pelo resíduo de *Pinus spp in natura* (Tabela 4.60), *in natura* e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Tabela 4.61), e com o resíduo de *Pinus spp* com pré-tratamento AF-48H e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Tabela 4.62).

Os concretos assim produzidos foram ensaiados para determinação das características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e da resistência à compressão aos 7 dias de idade (RC 7d). A idade de 7 dias foi escolhida por permitir a tomada de decisão e continuidade da pesquisa em menor tempo, além de prever, no caso de produção em escala industrial, um período de tempo mais curto de cura, expedição e utilização do produto.

A amostra mínima permaneceu 4 corpos-de-prova, conforme determinado na Fase anterior da pesquisa.

TABELA 4.60 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp IN NATURA* NO CONCRETO TRAÇO 1 : 10 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)

Substituição em Volume (%) (Mad in Natura)	RC 7 dias (MPa)	CV (%)	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
0,0	10,26 ^A	6,25	2.323,03 ^A	2,50	14,92 ^F	3,98	6,43 ^F	6,15
20,0	6,60 ^B	5,83	2.115,67 ^B	0,87	15,82 ^E	3,19	7,48 ^E	3,48
40,0	4,60 ^C	6,48	2.033,71 ^C	1,03	18,99 ^D	4,32	9,34 ^D	5,23
60,0	3,10 ^D	6,40	1.893,89 ^D	2,18	22,14 ^C	6,95	11,69 ^C	3,93
80,0	2,95 ^E	2,95	1.733,71 ^E	1,09	25,04 ^B	3,86	14,45 ^B	4,69
100,0	1,49 ^F	6,25	1.648,78 ^F	1,99	28,95 ^A	6,52	17,55 ^A	4,93

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; ME = Massa Específica

TABELA 4.61 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp IN NATURA* E ADIÇÃO DE 4,5% DE CaCl₂ .2H₂O NO CONCRETO TRAÇO 1 : 10 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50 mm)

Substituição em Volume (%) (Mad in Natura + 4,5% CaCl ₂)	RC 7 dias (MPa)	CV (%)	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
0,0	10,26 ^A	6,25	2.323,03 ^A	2,50	14,92 ^F	3,98	6,43 ^F	6,15
20,0	7,48 ^B	6,25	2.022,81 ^B	1,77	16,48 ^E	5,01	8,15 ^E	5,61
40,0	5,11 ^C	4,25	1.947,30 ^C	0,87	19,60 ^D	4,49	10,07 ^D	5,22
60,0	3,68 ^D	6,36	1.827,99 ^D	0,69	21,78 ^C	1,09	11,91 ^C	0,82
80,0	2,69 ^E	4,54	1.699,44 ^E	1,31	26,55 ^B	3,62	15,63 ^B	4,86
100,0	1,73 ^F	7,06	1.633,64 ^F	3,21	27,93 ^A	4,51	17,12 ^A	6,86

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; ME = Massa Específica

TABELA 4.62 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp* COM PRÉ-TRATAMENTO AF-48H E ADIÇÃO DE 4,5% DE $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NO CONCRETO TRAÇO 1 : 10 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)

Substituição em Volume (%) (Mad AF-48H + 4,5% CaCl_2)	RC 7 dias (MPa)	CV (%)	ME Seco (kg/m^3)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
0,0	10,26 ^A	6,25	2.323,03 ^A	2,50	14,92 ^F	3,98	6,43 ^F	6,15
20,0	8,37 ^B	3,38	2.085,76 ^B	3,04	15,91 ^E	4,82	7,54 ^E	5,33
40,0	6,00 ^C	5,77	1.991,72 ^C	3,75	18,59 ^D	7,19	9,36 ^D	6,33
60,0	3,86 ^D	4,79	1.843,43 ^D	1,85	23,13 ^C	7,88	12,57 ^C	9,99
80,0	3,24 ^E	5,41	1.700,97 ^E	3,04	25,48 ^B	7,50	15,01 ^B	8,21
100,0	1,74 ^F	5,90	1.649,49 ^F	3,28	28,81 ^A	2,44	17,48 ^A	2,93

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; ME = Massa Específica

Analisando os valores apresentados nas Tabelas 4.60, 4.61 e 4.62, pode-se constatar que:

- A RC 7d apresenta diferenças significativas entre cada teor de substituição do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* (*in natura*, *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com o pré-tratamento AF48H e com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sendo que a queda de resistência, para teores de substituição de 100% do agregado miúdo mineral, chega a 85,48% para o resíduo de *Pinus spp in natura*, 83,14% para o resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, e 83,04% para o resíduo com pré-tratamento AF48H e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- A massa específica do concreto também apresenta diferenças estatísticas significativas para teor de substituição analisado, para qualquer dos 3 tipos de resíduo de *Pinus spp* utilizados, sendo que a maior diferença determinada foi de 29,37% de redução (100% de substituição por resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- A porosidade do material, expressa pelo seu índice de vazios, também apresentou diferenças significativas entre todos os proporcionamentos de agregado miúdo mineral e resíduo de *Pinus spp*, sendo que o maior valor determinado foi para 100% de substituição de *Pinus spp in natura* (aumento de 105,46%);

- A absorção de água, como esperado, também apresentou diferenças significativas para todos os teores de substituição pelos 3 tipos de serragem de *Pinus sp* testados, sendo que o maior incremento de absorção de água foi verificado para 100% de substituição de *Pinus spp in natura* (188,18%).

Na Figura 4.48, apresentam-se as dispersões dos valores da resistência à compressão aos 7 dias de idade, determinada para as substituições do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp in natura*, *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e com pré-tratamento AF48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, bem como os modelos que proporcionam o melhor ajuste destas resistências à compressão em função dos teores de substituição.

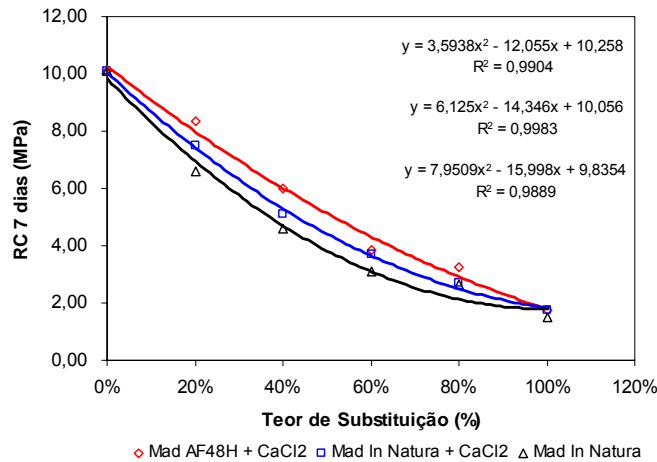


FIGURA 4.48 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp*: ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DE IDADE

Na Tabela 4.63, apresentam-se previsões de RC 7d, para cada tipo de resíduo de *Pinus spp* utilizado, em função dos modelos de regressão simples determinados na Figura 4.48.

TABELA 4.63 - PREVISÕES DE RC 7d COM BASE NOS MODELOS DE REGRESSÃO PARA CADA TIPO DE RESÍDUO DE *PINUS spp*

Resistência Requerida (MPa)	Teor de Substituição AM/Mad (%)		
	Mad AF48H + CaCl2	Mad in natura + CaCl2	Mad in natura
6,00	39,96%	30,46%	23,33%
5,00	51,98%	42,96%	35,60%
4,00	65,14%	57,54%	50,51%
3,00	79,44%	74,20%	68,06%
2,00	94,88%	92,94%	88,25%
1,50	100,00%	100,00%	99,34%

Como pode ser observado na Tabela 4.63 para alcançar a resistência mínima à compressão de 3,0 MPa, (para utilização do material em alvenaria estrutural, conforme norma NBR 6.136 (2008)), poder-se-ia utilizar substituições do agregado miúdo mineral por:

- 68,06% do volume de resíduo de *Pinus spp in natura*;
- 74,20% do volume de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- 79,44% do volume de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Porém, considerando os desvios relativos aos materiais, mão-de-obra, equipamento de produção e outras características inerentes ao processo de fabricação em escala industrial e objetivando atingir resistência à compressão de 5,0 MPa, aos 7 dias de idade, resolveu-se adotar 50% de substituição.

Na Tabela 4.64, apresentam-se as expectativas de RC 7d, inferindo 50% de substituição do volume do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* nos modelos de regressão apresentados na Figura 4.48.

TABELA 4.64 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp*: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS

Característica : Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade			
Resíduo de <i>Pinus sp</i>	Equação	R ²	Expectativa para 50% de Substituição
<i>In natura</i>	$y = 7,9509x^2 - 15,998x + 9,8354$	0,9904	3,82 MPa
<i>In natura</i> + 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$y = 6,1250x^2 - 14,346x + 10,056$	0,9983	4,41 MPa
AF48H + 4,5% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$y = 3,5938x^2 - 12,055x + 10,258$	0,9889	5,13 MPa

Da mesma forma como efetuado para a RC 7d, lançou-se os valores determinados para as massas específicas, índices de vazios e absorção de água, dos concretos produzidos com as substituições parciais do agregado miúdo mineral pelos três tipos de resíduo de *Pinus spp*. A dispersão destes valores, bem como os modelos de regressão que possibilitaram os melhores ajustes, para cada característica física, são apresentados na Figura 4.49.

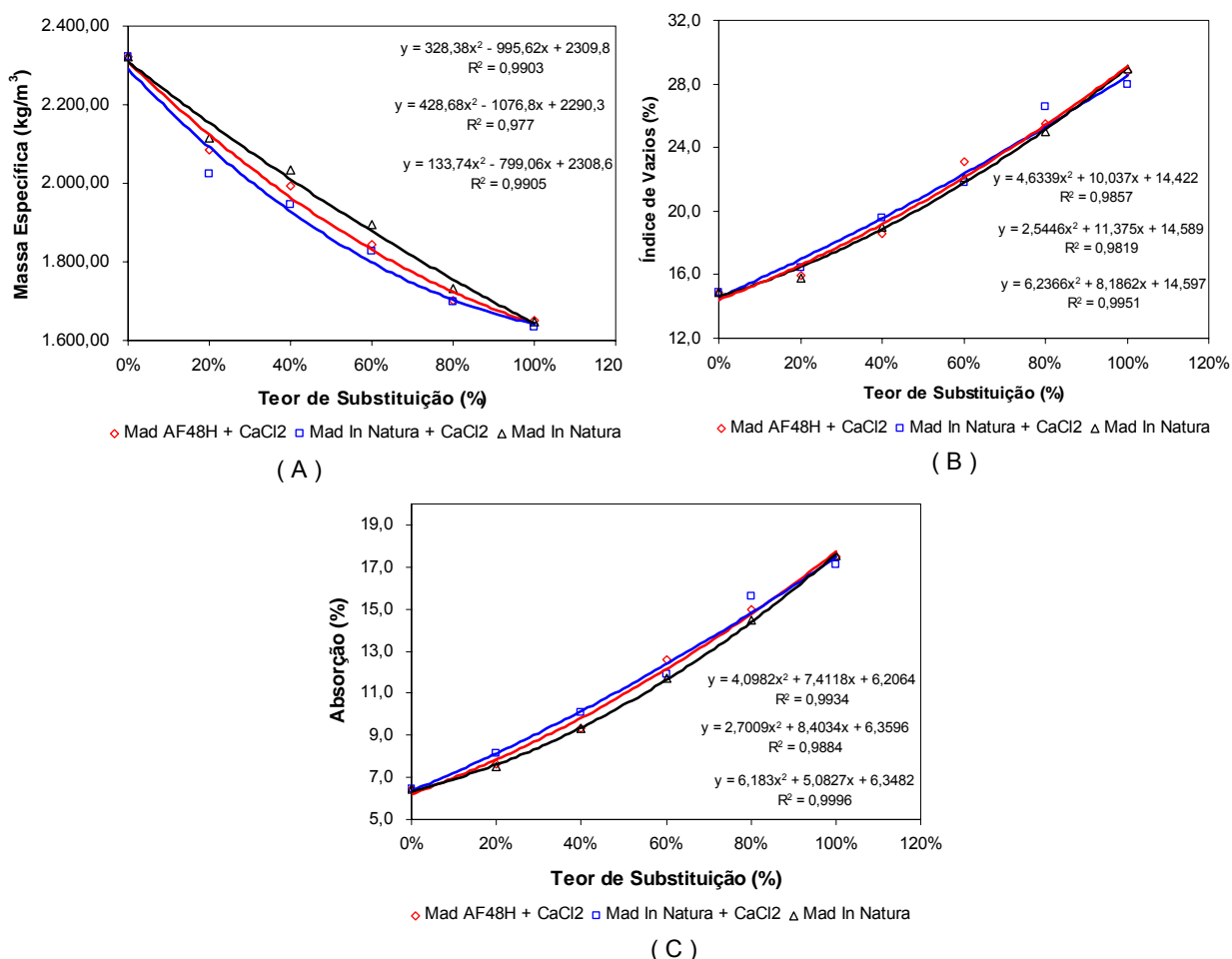


FIGURA 4.49 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp*: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Na Tabela 4.65 apresentam-se as expectativas de valores das massas específicas do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do volume de agregado miúdo mineral pela serragem de *Pinus sp*, conforme modelos de regressão apresentados na Figura 4.49(A).

TABELA 4.65 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp*: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE MASSA ESPECÍFICA

Característica : Massa Específica no Estado Seco			
Resíduo de <i>Pinus sp</i>	Equação	R ²	Expectativa para 50% de Substituição
<i>In natura</i>	$y = 133,74x^2 - 799,06x + 2308,6$	0,9905	1.942,51 kg/m ³
<i>In natura</i> + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 428,68x^2 - 1076,8x + 2290,3$	0,9770	1.859,07 kg/m ³
<i>AF48H</i> + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 328,38x^2 - 995,62x + 2309,8$	0,9903	1.894,09 kg/m ³

Na Tabela 4.66, apresentam-se as expectativas de valores da porosidade do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do volume de agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, conforme os modelos de regressão apresentados na Figura 4.49(B).

TABELA 4.66 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp*: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE ÍNDICE DE VAZIOS

Característica : Índice de Vazios (Porosidade)			
Resíduo de <i>Pinus sp</i>	Equação	R ²	Expectativa para 50% de Substituição
<i>In natura</i>	$y = 6,2366x^2 + 8,1862x + 14,597$	0,9951	20,25%
<i>In natura</i> + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 2,5446x^2 + 11,375x + 14,589$	0,9819	20,91%
AF48H + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 4,6339x^2 + 10,037x + 14,422$	0,9857	20,60%

Na Tabela 4.67, apresentam-se as expectativas de valores de absorção de água do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do volume de agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, conforme os modelos de regressão apresentados na Figura 4.49(C).

TABELA 4.67 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp*: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E EXPECTATIVA DE VALOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Característica : Absorção de Agua			
Resíduo de <i>Pinus sp</i>	Equação	R ²	Expectativa para 50% de Substituição
<i>In natura</i>	$y = 6,183x^2 + 5,0827x + 6,3482$	0,9996	10,44%
<i>In natura</i> + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 2,7009x^2 + 8,4034x + 6,3596$	0,9884	11,24%
AF48H + 4,5% CaCl ₂ .2H ₂ O	$y = 4,0982x^2 + 7,4118x + 6,2064$	0,9934	10,94%

Para confirmar os valores previstos pelos modelos de regressão, produziram-se três séries de corpos-de-prova cilíndricos de Dn = 50 mm, com o sistema alternativo de moldagem, sendo cada série com um tipo de resíduo de *Pinus spp* (*in natura*, *in natura* com adição de 4,5% de CaCl₂.2H₂O e com pré-tratamento AF48H com adição de 4,5% de CaCl₂.2H₂O). As séries foram ensaiadas para determinação das características físicas e mecânicas e seus resultados comparados com o traço 1:10, com 100% de

agregado miúdo mineral e com os valores esperados, determinados pelos modelos de regressão.

Na Tabela 4.68, apresentam-se os valores determinados para as características físicas do concreto para blocos traço 1:10, com substituição parcial do agregado miúdo mineral pelos três tipos de resíduo de *Pinus spp.*

TABELA 4.68 - TRAÇO 1:10 COM SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp* – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS (ANÁLISE EM CP 50mm)

Substituição Ag Miúdo	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
Traço 1 : 10	2.323,03** A	2,50	14,92** C	3,98	6,43** C	6,15
50% Mad in Natura	1.963,42* B	0,80	20,49* B	4,58	10,44* B	5,03
50% Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂	1.993,17* B	0,64	21,50 AB	1,29	11,78 A	1,59
50% Mad AF-48H + 4.5% CaCl ₂	1.939,41** B	2,22	22,02** A	4,64	11,36** A	5,70

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança;
* Médias de 4 medições; ** Médias de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; ME = Massa Específica

Analisando os valores das massas específicas determinadas, constata-se que:

- Os valores da massa específica do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, apresentaram reduções significativas quando comparadas com o concreto com 100% de agregado mineral, da ordem de 15,48% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), 14,20% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com 4,5% de CaCl₂.2H₂O) e 16,51% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp* AF48H com adição de 4,5% de CaCl₂.2H₂O);
- Não se verificaram diferenças estatísticas significativas entre as massas específicas dos três concretos produzidos com substituição do agregado por 50% de resíduo de *Pinus spp*;
- Em comparação com as expectativas de valores, determinados conforme apresentado na Tabela 4.65, as massas apresentaram variações de + 1,08% (substituição por 50% de *Pinus spp in natura*), + 7,21% (substituição por 50% de de *Pinus spp in natura* com 4,5% de CaCl₂.2H₂O) e + 2,39%

(substituição por 50% de *Pinus spp* AF48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

Com relação à porosidade do concreto, podemos verificar:

- Os valores do índice de vazios do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do agregado miúdo mineral por resíduo de *Pinus spp*, apresentaram aumentos significativos quando comparadas com o concreto com 100% de agregado mineral, da ordem de 37,33% (substituição por 50% de *Pinus spp in natura*), 44,10% (substituição por 50% de serragem de *Pinus spp in natura* com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e 47,59% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp* AF48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Verificaram-se diferenças estatísticas significativas entre os índices de vazios dos três concretos produzidos com substituição do agregado por 50% de resíduo de *Pinus spp*;
- Em comparação com as expectativas de valores, determinados conforme apresentado na Tabela 4.66, os índices de vazios apresentaram variações de + 1,19% (substituição por 50% de *Pinus spp in natura*), + 2,82% (substituição por 50% de serragem de *Pinus spp in natura* com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e + 6,89% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp* AF48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

Com relação à absorção de água do concreto, podemos verificar:

- Os valores do índice de vazios do concreto para blocos traço 1:10, com substituição de 50% do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, apresentaram aumentos significativos quando comparadas com o concreto com 100% de agregado mineral, da ordem de 62,36% (substituição por 50% de *Pinus spp in natura*), 83,20% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e 76,67% (substituição por 50% de resíduo de *Pinus sp* AF48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

- Verificaram-se diferenças estatísticas significativas entre os valores determinados para a absorção de água dos três concretos produzidos com substituição do agregado por 50% de resíduo de *Pinus spp*;
- Em comparação com as expectativas de valores, determinados conforme apresentado na Tabela 4.67, houve coincidência de valores quanto ao previsto para o concreto com 50% de substituição por resíduo de *Pinus spp in natura*, aumento de 4,80% para a previsão com substituição de 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aumento de 3,84% para a previsão efetuada com a substituição por 50% de resíduo de *Pinus spp AF48H* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

A comparação entre os valores determinados para as características físicas do concreto para blocos traço 1:10 com substituição do agregado miúdo mineral por 50%, em volume, de resíduo de *Pinus spp* e com o concreto traço 1:10 produzido com materiais convencionais, pode ser verificada nos gráficos apresentados na Figura 4.50.

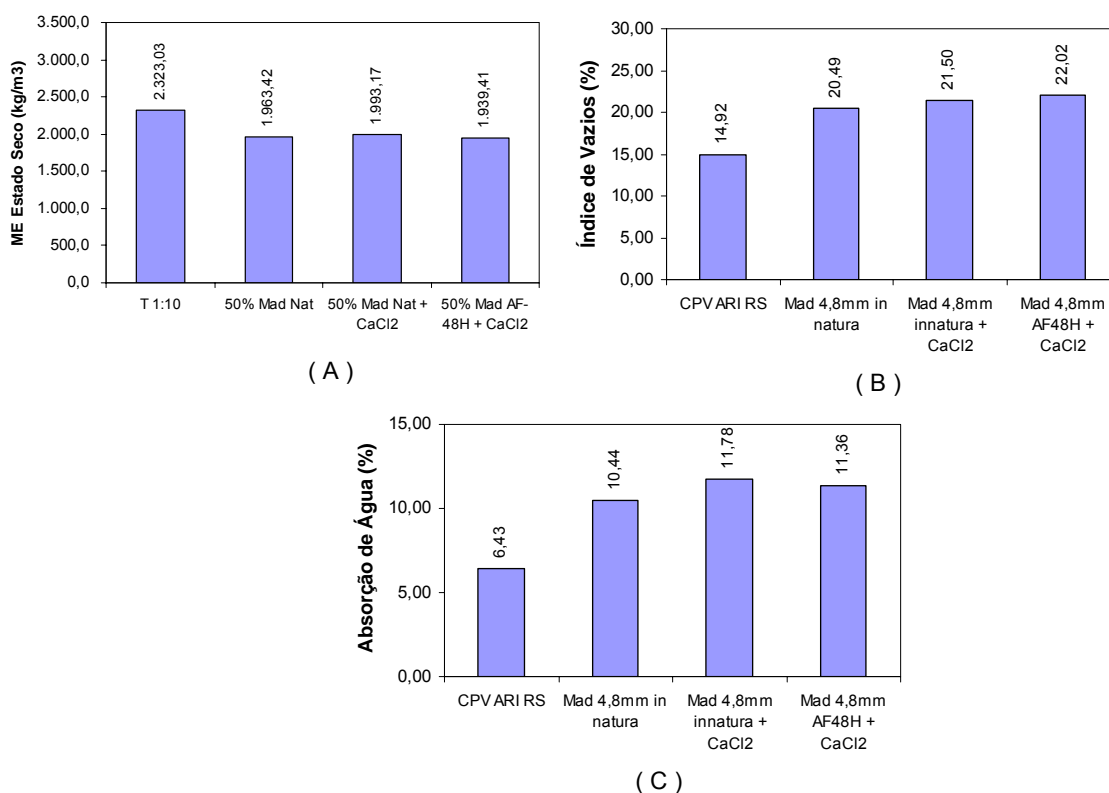


FIGURA 4.50 - TRAÇO 1:10 COM SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO *PINUS spp* – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

As características mecânicas do concreto para blocos traço 1:10 produzido com agregados minerais convencionais e com a substituição de 50%, em volume, do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, são apresentadas na Tabela 4.69.

Analisando os valores das resistências à compressão aos 3 dias, conclui-se:

- Aos 3 dias de idade, a maior resistência à compressão foi obtida para o concreto convencional, com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Verificaram-se diferenças estatísticas significativas entre as resistências apresentadas pelos concretos com substituição do agregado miúdo convencional pelos três diferentes tipos de resíduo de *Pinus spp* utilizados;
- As diferenças apresentadas para a RC 3d em relação ao traço com materiais convencionais, apresentaram a seguinte variação: - 42,37% (50% resíduo de *Pinus spp in natura*), - 32,14% (50% resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e - 18,85% (50% resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

TABELA 4.69 - TRAÇO 1:10 COM SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp* – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COMPÓSITO (ANÁLISE EM CP 50mm)

Substituição Ag Miúdo	Resistência à Compressão (MPa)						Resist. Tração (MPa)			
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
Traço 1 : 10	5,57 ^A	5,35	10,26 ^A	6,25	12,38 ^A	3,06	13,46 ^A	5,54	1,73 ^A	4,88
50% Mad in Natura	3,21 ^D	5,52	4,18 ^C	4,36	4,76 ^C	6,52	5,56 ^C	6,00	1,23 ^C	5,44
50% Mad in Natura + 4.5% CaCl_2	3,78 ^C	3,92	4,66 ^{BC}	2,96	5,37 ^C	6,33	6,06 ^C	5,58	1,59 ^B	5,48
50% Mad AF-48H + 4.5% CaCl_2	4,51 ^B	6,85	5,13 ^B	2,86	6,28 ^B	9,41	7,47 ^B	9,69	1,70 ^{AB}	4,48

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias de 5 medições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; RT = Resistência à Tração por Compressão Diametral

Analisando os valores das resistências à compressão aos 7 dias, constata-se que:

- A maior resistência à compressão foi obtida para o concreto convencional, com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Não se verificam diferenças estatísticas significativas entre as resistências apresentadas pelos concretos com substituição do agregado miúdo

convencional por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* e *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e entre este último e o concreto produzido com 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

- As diferenças apresentadas para a RC 7d em relação ao traço com materiais convencionais, apresentaram a seguinte variação: -59,26% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), - 54,58% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e - 50,00% (50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Em relação às expectativas de resistência, determinadas pelos modelos de regressão apresentados na Tabela 4.64, a variação verificada foi de + 9,42% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), + 5,67% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e em relação ao concreto produzido com substituição por resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, não houve diferença.

Isto comprova a eficiência do sistema alternativo de moldagem e do tempo equivalente de moldagem, inclusive para o concreto com substituição do agregado miúdo convencional pelo resíduo de Pinus spp.

Analisando os valores das resistências à compressão aos 28 dias, conclui-se:

- A maior resistência à compressão foi obtida para o concreto convencional, com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Não se verificam diferenças estatísticas significativas entre as resistências apresentadas pelos concretos com substituição do agregado miúdo convencional por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* e *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- As diferenças apresentadas para a RC 28d em relação ao traço com materiais convencionais, apresentaram a seguinte variação: -61,55% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), - 56,22% (50% de resíduo de *Pinus*

spp in natura com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e – 49,27% (50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

Analisando os valores das resistências à compressão aos 91 dias, conclui-se:

- A maior resistência à compressão foi obtida para o concreto convencional, com diferenças estatísticas significativas para os demais;
- Não se verificam diferenças estatísticas significativas entre as resistências apresentadas pelos concretos com substituição do agregado miúdo convencional por 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* e *in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- As diferenças apresentadas para a RC 91d em relação ao traço com materiais convencionais, apresentaram a seguinte variação: - 58,69% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), - 54,89% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e - 44,50% (50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

Na Figura 4.51, são apresentadas um comparativo entre as resistências à compressão, obtidas pelos concretos para blocos traço 1:10 com materiais convencionais e o mesmo concreto com as substituições de agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*.

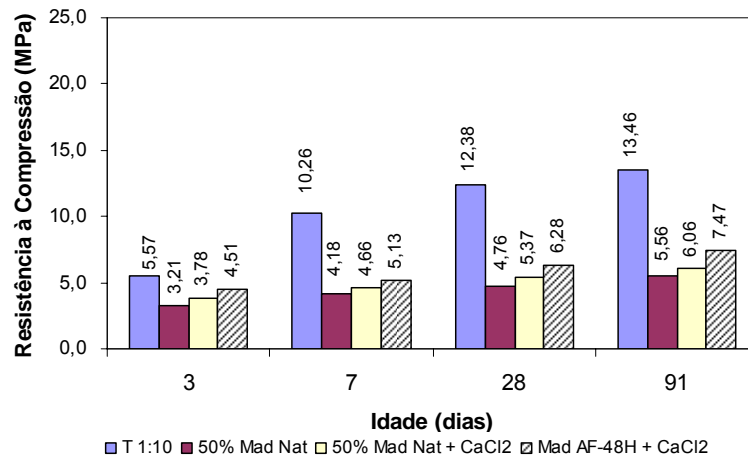


FIGURA 4.51 - TRAÇO 1:10 COM SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp* – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A evolução das resistências à compressão com a idade, para cada um dos concretos estudados nesta Fase da pesquisa, e uma comparação com a resistência mínima à compressão para utilização do material na produção de blocos para alvenaria estrutural, são apresentados na Figura 4.52.

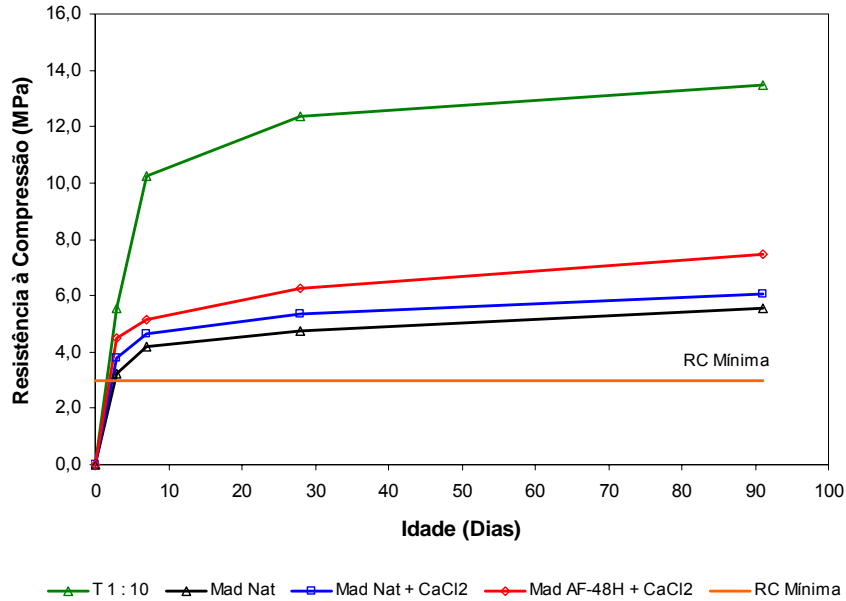


FIGURA 4.52 - TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp* – EVOLUÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM O TEMPO

Na Figura 4.53, são apresentadas as resistências à tração aos 28 dias de idade, determinadas por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos, no concreto para blocos traço 1:10 produzido com materiais convencionais e com o mesmo concreto, com substituições parciais de 50% em volume, do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*.

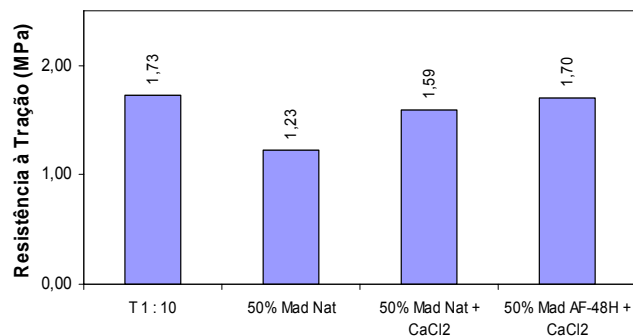


FIGURA 4.53 - TRAÇO 1:10: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE 50% DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL POR RESÍDUO DE *PINUS spp* – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Com relação às resistências à tração, pode-se constatar que:

- A maior RT 28d foi determinada para o concreto convencional;
- Não se verificaram diferenças estatísticas significativas entre a RT 28d determinada para o concreto convencional e para o concreto com 50% de substituição do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* AF48H com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e, nem entre este último e o concreto produzido com 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- As diferenças apresentadas para a RT 28d em relação ao traço com materiais convencionais, apresentaram a seguinte variação: -28,90% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura*), - 8,09% (50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e - 1,73% (50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

4.6 RESULTADOS DA 6ª FASE DA PESQUISA – RESULTADOS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

Após verificar a viabilidade técnica das misturas com base na composição original do traço 1:10 para blocos, com as substituições de 50% do volume do agregado miúdo mineral por resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland pelos seis materiais cimentícios alternativos, mantendo os mesmos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante dos compósitos desenvolvidos na 2ª Fase do estudo (única alteração foi à redução de 3,2% para 2,0% no traço com substituição do cimento Portland por 30% de CCA) passou-se nesta Fase, a produção dos blocos protótipos em fábrica.

Conforme apresentado no Capítulo 3, os blocos protótipos foram testados quanto suas características geométricas, físicas, mecânicas e como estudos

complementares, quanto a seu desempenho como isolante térmico e sua viabilidade econômica.

Foi adotada a amostra mínima de 4 corpos-de-prova, conforme determinado na 3ª Fase da pesquisa.

4.6.1 Análise das Características Geométricas

Na Tabela 4.95 apresentam-se as dimensões dos blocos produzidos com as 10 diferentes composições. Por se tratar de uma característica qualitativa, compararam-se as dimensões reais médias dos blocos produzidos em cada série, aos limites impostos pela norma NBR 6.136 (2008), que determina para os blocos tipo M-15, com dimensões nominais de 14 x 20 x 40 cm, as seguintes características e tolerâncias:

- Dimensões padronizadas: 140 x 190 x 390 mm;
- Dimensões mínimas para paredes e septos: 25 mm
- Tolerâncias: ± 2 mm na largura;
 ± 3 mm na altura e comprimento;
 ± 1 mm na largura das paredes e septos.

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.70 pode-se constatar que:

- Os blocos produzidos com o concreto traço 1:10 com materiais convencionais apresentaram as dimensões dentro das tolerâncias admitidas pelas normas, com exceção das paredes laterais e septo, que apresentaram larguras com variações acima de 1 mm;
- Todos os blocos protótipos produzidos com substituição de 50% de agregado miúdo mineral por resíduo de *Pinus spp*, apresentaram largura superior aos limites impostos pela norma, com variações, para maior, entre 3,08 mm a 4,28 mm;
- Os blocos protótipos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e com 100% de cimento Portland (Ref. 2, 3 e 4), apresentaram dimensões de altura superiores a normalizadas, com variações para mais entre 3,82 mm a 4,28 mm;

- Nenhum dos blocos protótipos apresentou comprimento fora das dimensões padronizadas;
- Todos os blocos protótipos produzidos com o resíduo de *Pinus spp*, apresentaram dimensões acima das normalizadas para as paredes laterais e septo, com variações duas vezes maiores que as apresentadas para os blocos produzidos com materiais convencionais (Ref 1).

TABELA 4.70 - BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Dimensões Nominiais (mm)	Dimensões Padronizadas (mm) - NBR 12.118 (2008)					
	Largura	Altura	Comprimento	Paredes		
				Longitudinal	Transversal	Septo
15x20x40	140,00	190,00	390,00	25,00	25,00	25,00
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 (Ref 1)						
Valores Médios	141,04	191,82	391,00	26,68	26,62	26,96
CV (%)	0,16	0,13	0,36	4,90	2,45	2,52
Variação (mm)*	1,04	1,82	1,00	1,68	1,62	1,96
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira in Natura - Ref 2						
Valores Médios	143,20	194,70	392,60	27,60	28,26	28,52
CV (%)	0,68	0,33	0,39	3,12	6,52	9,22
Variação (mm)*	3,20	4,70	2,60	2,60	3,26	3,52
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira in Natura + 4,5% de CaCl₂ - Ref 3						
Valores Médios	144,28	195,10	392,60	27,24	27,10	27,22
CV (%)	0,94	0,33	0,23	1,31	1,17	1,55
Variação (mm)*	4,28	5,10	2,60	2,24	2,10	2,22
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 4,5% de CaCl₂ - Ref 4						
Valores Médios	143,20	193,82	391,20	26,96	26,70	27,26
CV (%)	0,76	0,84	0,33	2,63	1,63	1,90
Variação (mm)*	3,20	3,82	1,20	1,96	1,70	2,26
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 10% Sílica Ativa						
Valores Médios	143,48	191,82	391,80	26,98	27,12	27,10
CV (%)	0,77	0,50	0,21	0,85	1,29	1,20
Variação (mm)*	3,48	1,82	1,80	1,98	2,12	2,10
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 10% Metacaulim						
Valores Médios	144,02	192,86	392,00	27,64	27,00	27,74
CV (%)	0,76	0,35	0,48	1,32	3,36	2,29
Variação (mm)*	4,02	2,86	2,00	2,64	2,00	2,74
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 5% Cinza Volante						
Valores Médios	143,92	191,56	391,20	28,06	27,10	27,66
CV (%)	0,47	0,33	0,33	4,38	1,33	1,27
Variação (mm)*	3,92	1,56	1,20	3,06	2,10	2,66
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 25% de EAF						
Valores Médios	144,02	191,86	391,60	27,26	27,12	27,58
CV (%)	0,61	0,34	0,29	3,15	1,96	1,50
Variação (mm)*	4,02	1,86	1,60	2,26	2,12	2,58
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 5% de RCC						
Valores Médios	143,24	191,80	392,40	26,92	27,24	27,12
CV (%)	0,52	0,83	0,29	2,67	0,96	1,21
Variação (mm)*	3,24	1,80	2,40	1,92	2,24	2,12
Dimensões Reais Médias (mm) - Traço 1 : 10 - 50% Madeira AF-48H + 30% de CCA						
Valores Médios	143,08	190,32	391,00	26,92	26,86	27,08
CV (%)	0,47	0,44	0,26	2,76	1,04	0,99
Variação (mm)*	3,08	0,32	1,00	1,92	1,86	2,08

Médias obtidas de 5 repetições; CV = Coeficiente de Variação; Variação* = Diferença entre Dimensões Reais e Dimensões Padronizadas conforme NBR 12.118 (2008)

Diante do verificado, pode-se constatar que:

- As diferenças determinadas nas dimensões da largura, altura, paredes laterais e septos, devem-se ao fato da madeira presente (resíduo de *Pinus spp*) sob a forma de agregado lignocelulósico, ser um material mais elástico que os agregados minerais e desta forma tendem, depois de cessado o esforço de compactação, durante a produção, retornar as dimensões originais;
- Quanto às diferenças determinadas para as paredes laterais e septos pelos blocos produzidos com materiais convencionais (Ref 1), deve-se, provavelmente, ao desgaste das fôrmas em função do uso contínuo do equipamento.

4.6.2 Determinação das Características Físicas

Além das características físicas normalmente determinadas como massa específica, índice de vazios e absorção de água, a norma NBR 6.136 (2008), determina, também, a determinação da variação dimensional dos blocos em função da perda de água, denominada retração por secagem.

Na Tabela 4.71, apresentam-se os valores determinados para as características físicas dos blocos protótipos.

Quanto à massa específica dos blocos protótipo, verifica-se:

- A maior massa específica, conforme esperado, foi apresentada pelos blocos protótipos produzidos com os materiais convencionais (2.242,36 kg/m³), apresentando diferenças estatísticas significativas para todos os demais;
- Entre os blocos protótipos, não se verificaram diferenças muito relevantes entre as massas específicas, sendo que o bloco produzido com 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de CaCl₂.2H₂O apresentou a maior massa específica média (2.035,34 kg/m³), porém 9,23% inferior que o produzido com os materiais convencionais;

- As menores massas específicas médias foram verificadas para os blocos com substituição de 50% de agregado miúdo por resíduo de *Pinus spp* e 5% de CV (1.956,08 kg/m³), 12,06% inferior ao Ref. 1 e com substituição do cimento por 30% de CCA (1.964,29 kg/m³), 11,69% inferior que o Ref.1.

TABELA 4.71 - BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ANÁLISE DA RETRAÇÃO POR SECAGEM

Traço 1:10 - 50% Pinus-sp Blocos Protótipos	ME Seco (kg/m ³)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)	Retração por Secagem (%)	CV (%)
Traço 1 : 10 (Ref 1)	2242,36** A	0,85	12,12** E	1,88	5,40** F	2,71	0,0446 BC	13,99
Mad in Natura (Ref 2)	2019,38** BCD	1,95	14,54** BC	5,49	7,21** BC	7,36	0,0422 C	4,06
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	1977,97** BCD	1,42	15,51** A	3,19	7,84** A	2,21	0,0446 BC	9,14
Mad AF-48H + 4.5% CaCl ₂ (Ref 4)	2035,34** B	0,72	13,47** D	1,36	6,62** D	1,76	0,0443 C	5,43
Sílica Ativa (10,0%)	2028,61** BC	6,49	11,36** E	7,8	5,61** EF	6,03	0,0528 A	10,08
Metacaulim (10,0%)	2022,67** BCD	2,19	11,99** E	4,78	5,93** E	5,20	0,0475 ABC	10,06
Cinza Volante (5,0%)	1956,08** D	1,36	14,53** BC	0,98	7,43** AB	1,07	0,0526 AB	5,61
Escória de Alto Forno (25,0%)	2010,66** BCD	2,48	13,78** CD	6,48	6,86** CD	7,16	0,0478 ABC	11,46
Res. de Cerâmica Calcinada (5,0%)	1989,09** BCD	1,70	13,62** D	5,06	6,85** CD	5,39	0,0541 A	2,79
Cinza de Casca de Arroz (30,0%)	1964,29** CD	1,66	14,62** B	3,71	7,45** AB	3,58	0,0545 A	15,66

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; * Médias de 3 medições; ** Médias de 5 medições
CV = Coeficiente de Variação; ME = Massa Específica; Valores entre parentesis indicam o teor de substituição ao cimento Portland

Quanto à porosidade dos blocos protótipos, determinada em função do índice de vazios, verificam-se:

- As maiores porosidades foram determinadas para os blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de CaCl₂.2H₂O -Ref 3 (15,51%), seguido dos blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* – Ref 2 (14,54%) e com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituição do cimento Portland por 5% CV (14,53%) e 30% CCA (14,62%);
- Os menores valores para porosidade, foram determinados para os blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e 10% SA (11,36%), 10% MC (11,99%) e para os blocos Ref 1 - produzidos com materiais convencionais (12,12%), sem diferenças significativas entre eles;

Quanto à absorção de água, verifica-se:

- Os maiores valores foram determinados para os blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -Ref 3 (7,84%), seguido dos blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituição do cimento Portland por 30% CCA (7,45%) e 5% CV (7,43%);
- Os menores valores para absorção de água, foram determinados para os blocos produzidos com agregados convencionais (5,40%) e com 50% de resíduo de *Pinus spp* e 10% SA (5,61%) e 10% MC (5,93%).
- ***Todos os blocos protótipos apresentaram teores de absorção de água inferiores aos limites impostos pela norma NBR 6.136 (2008), que é de 10% para concretos convencionais e 13% para concretos com agregados leves;***

Quanto à retração por secagem, determinada de acordo com a norma NBR 2.118 (2008) verifica-se:

- Não houve diferenças estatísticas significativas entre a retração por secagem determinada para os blocos protótipos produzidos com 100% de cimento e materiais convencionais e 100% de cimento e substituição de 50% em volume do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp*, onde o maior valor determinado (0,0446%) foi igual para o bloco Ref 1 e Ref 3 e o menor valor determinado (0,0422%), foi determinado para o bloco Ref 2;
- Entre os blocos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e com substituições parciais do cimento Portland, também não se verificaram diferenças estatísticas significativas, sendo o valor mais alto para a retração foi determinada para os blocos com substituição do cimento por 30% CCA (0,0545%) e o menor valor para os blocos com substituição de 10% MC (0,0475%);

- **Todos os blocos protótipos apresentaram retração por secagem, inferiores ao limite imposto pela norma NBR 6.136 (2008), que é de 0,065%.**

No Figura 4.54 apresentam-se os resultados dos ensaios para determinação da retração por secagem dos blocos protótipos.

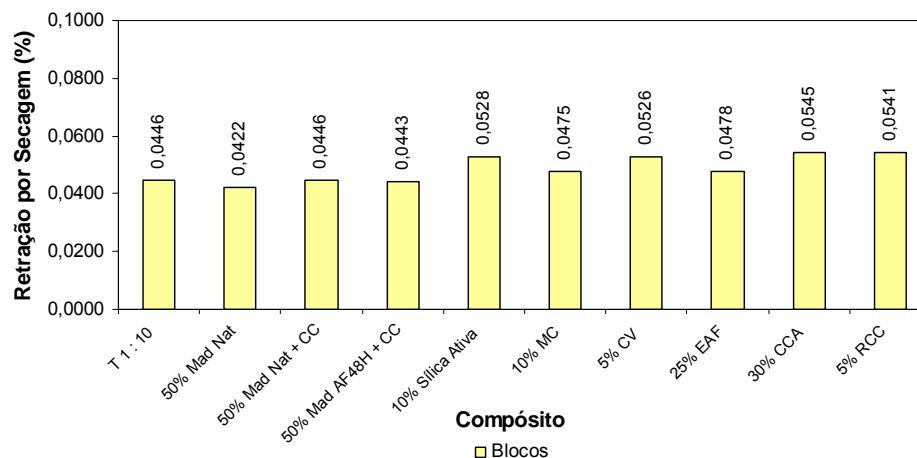


FIGURA 4.54 - VALORES DE RETRAÇÃO POR SECAGEM DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

4.6.3 Características Mecânicas dos Blocos Protótipos

Na Tabela 4.72 são apresentados os resultados da determinação da resistência à compressão dos blocos protótipos aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade.

Quanto às resistências à compressão aos 3 dias de idade, verifica-se:

- A maior RC 3d foi determinada para os blocos produzidos com concreto traço 1:10 com materiais convencionais (5,99 MPa), com diferenças significativas para todos os demais;
- Entre os blocos com 100% de cimento Portland e 50% do agregado miúdo mineral substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, a maior RC 3d foi determinada para os blocos Ref 4 (3,48MPa), com variação percentual de – 41,90% em relação ao Ref 1;
- A menor de todas as RC 3d (2,64 MPa), foi determinada para os blocos produzidos com 100% de cimento Portland e 50% de resíduo de *Pinus spp*

in natura (Ref 2), com variação de – 55,93% em relação aos valores determinados para os blocos Ref 1;

- Entre os blocos protótipos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland, os maiores valores para RC 3d foram determinados para 10% SA (3,82 MPa), 5% CV (3,77 MPa), 25% EAF (3,52 MPa) e 5% RCC (3,55 MPa), enquanto que o menor valor de RC 3d, foi determinado para os blocos com 30% CCA (2,78 MPa), sendo este valor, inferior, inclusive, ao mínimo imposto pela NBR 6.136 (2008), para utilização do bloco em alvenaria estrutural.

TABELA 4.72 - BLOCOS PROTÓTIPOS – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Traço 1:10 - 50% Pinus-sp Blocos Protótipos	Resistência à Compressão (MPa)							
	RC 3d	CV (%)	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)
Traço 1 : 10 (Ref 1)	5,99 ^A	6,98	10,83 ^A	2,60	13,06 ^A	3,86	13,85 ^A	1,41
Mad in Natura (Ref 2)	2,64 ^E	6,48	3,80 ^E	7,20	4,39 ^F	8,68	4,47 ^D	3,96
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	3,35 ^D	7,08	4,21 ^D	6,07	4,61 ^{DEF}	3,58	4,78 ^D	4,80
Mad AF-48H + 4.5% CaCl ₂ (Ref 4)	3,48 ^{DC}	4,27	4,57 ^{BC}	4,53	5,16 ^C	7,19	5,27 ^C	7,18
Silica Ativa (10,0%)	3,82 ^B	3,08	4,48 ^{BCD}	5,43	5,03 ^{CD}	4,22	5,17 ^C	2,16
Metacaulim (10,0%)	3,34 ^D	6,26	4,20 ^D	2,34	4,36 ^F	6,89	4,73 ^D	4,47
Cinza Volante (5,0%)	3,77 ^{BC}	6,16	4,72 ^B	6,79	5,65 ^B	4,58	6,14 ^B	4,53
Escória de Alto Forno (25,0%)	3,52 ^{BCD}	5,59	4,37 ^{CD}	4,74	4,91 ^{CDE}	5,75	5,48 ^C	4,21
Res. de Cerâmica Calcinada (5,0%)	3,55 ^{BCD}	6,81	4,21 ^D	1,54	4,57 ^{EF}	3,88	4,69 ^D	3,36
Cinza de Casca de Arroz (30,0%)	2,78 ^E	4,67	4,16 ^D	6,37	4,43 ^{EF}	4,43	4,72 ^D	2,24

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; Médias de 4 medições; CV = Coeficiente de Variação; RC = Resistência à Compressão; Valores percentuais entre parentesis indicam o teor de substituição ao cimento Portland

Quanto às resistências à compressão aos 7 dias de idade, verifica-se:

- A maior RC 7d foi determinada para os blocos produzidos com concreto traço 1:10 com materiais convencionais (10,83 MPa), com diferenças significativas para todos os demais;
- Entre os blocos com 100% de cimento Portland e 50% do agregado miúdo mineral substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, a maior RC 7d foi determinada para os blocos Ref 4 (4,57 MPa), com variação percentual de – 64,91% em relação ao Ref 1;

- A menor de todas as RC 7d (3,80 MPa), foi determinada para os blocos produzidos com 100% de cimento Portland e 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* (Ref 2), com variação de – 64,91% em relação aos valores determinados para os blocos Ref 1;
- Entre os blocos protótipos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland, os maiores valores para RC 7d foram determinados para 10% SA (4,48 MPa) e 5% CV (4,72 MPa), enquanto que o menor valor de RC 7d, foi determinado para os blocos com 30% CCA (4,16 MPa), sem diferenças estatísticas para os produzidos com 10% MC (4,20 MPa) e 5% RCC (4,21 MPa);
- Todos os blocos protótipos apresentaram RC 7d superiores ao limite imposto pela norma NBR 6.136 (2008), para utilização em alvenaria estrutural, que é de 3,0 MPa.

Quanto às resistências à compressão aos 28 dias de idade, verifica-se:

- A maior RC 28d foi determinada para os blocos produzidos com concreto traço 1:10 com materiais convencionais (13,06 MPa), com diferenças significativas para todos os demais;
- Entre os blocos com 100% de cimento Portland e 50% do agregado miúdo mineral substituído por resíduo de *Pinus spp*, a maior RC 28d foi determinada para os blocos Ref 4 (5,16 MPa), com variação percentual de – 60,49% em relação ao Ref 1;
- A menor de todas as RC 28d (4,39 MPa), foi determinada para os blocos produzidos com 100% de cimento Portland e 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* (Ref 2), com variação de – 66,39% em relação aos valores determinados para os blocos Ref 1;
- Entre os blocos protótipos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland, os maiores valores para RC 28d foram determinados para 5% CV (5,65 MPa) e 10% SA (5,03 MPa),

enquanto que o menor valor de RC 28d, foi determinado para os blocos com 10% MC (4,36 MPa).

Quanto às resistências à compressão aos 91 dias de idade, verifica-se:

- A maior RC 91d foi determinada para os blocos produzidos com concreto traço 1:10 com materiais convencionais (13,85 MPa), com diferenças significativas para todos os demais;
- Entre os blocos com 100% de cimento Portland e 50% do agregado miúdo mineral substituído por resíduo de *Pinus spp*, a maior RC 91d foi determinada para os blocos Ref 4 (5,27MPa), com variação percentual de – 61,95% em relação ao Ref 1;
- A menor de todas as RC 91d (4,78 MPa), foi determinada para os blocos produzidos com 100% de cimento Portland e 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* (Ref 2), com variação de –67,73% em relação aos valores determinados para os blocos Ref 1;
- Entre os blocos protótipos produzidos com 50% de resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland, os maiores valores para RC 91d foram determinados para 5% CV (6,14 MPa), 25% EAF (5,48 MPa) e 10% SA (5,17 MPa), enquanto que o menor valor de RC 91d, foi determinado para os blocos com 5% RCC (4,69 MPa), 30% CCA (4,72 MPa) e 10% MC (4,73 MPa).

Na Figura 4.55 são apresentadas as evoluções das resistências à compressão dos blocos protótipos ao longo do tempo.

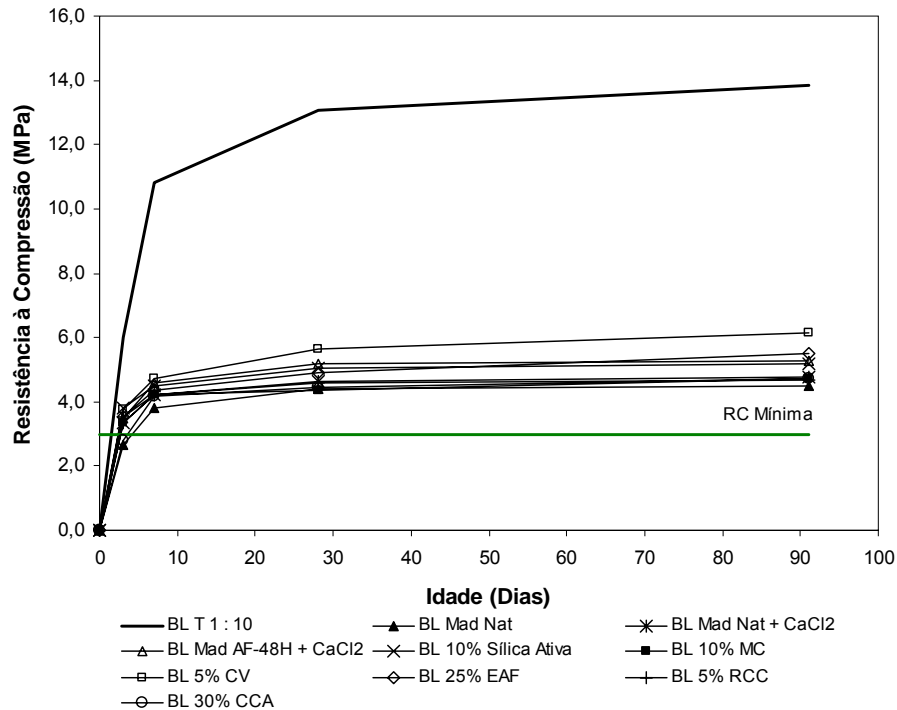


FIGURA 4.55 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO NOS BLOCOS PROTÓTIPOS

Diante do apresentado, constata-se que:

- O aumento das dimensões dos blocos contendo 50% de resíduo de *Pinus spp*, provocado pelo retorno às dimensões originais das partículas de madeira, depois de cessado o esforço de compressão durante a produção dos blocos, pode, muito provavelmente, ter provocado pequenas fissuras, não perceptíveis a olho nú, porém, suficientes para afetar significativamente às resistências mecânicas dos blocos protótipos;
- Tal fenômeno não se fez notar em se tratando dos CP 50 mm, pois estes ficavam em seus moldes, protegidos por uma placa de acrílico ou vidro, por um período de 24 horas. Tanto os moldes como as placas de proteção, restringiam a movimentação das partículas de madeira até a cura da pasta de cimento, que após o período de 24 horas já apresentavam resistência mecânica suficiente para impedir tal fenômeno;

- Outro fator relevante diz respeito à velocidade de abertura da gaveta da máquina produtora de blocos, que por maior cuidado, tratava-se de uma operação manual e, portanto, sujeita as variações típicas do processo produtivo, e que neste caso, poderia contribuir para a redução da resistência dos blocos, em função da produção de macro-fissuras no material;
- Todos os blocos protótipos apresentaram resistências à compressão, a partir dos 7 dias de idade, superiores à resistência mínima recomendada pela NBR 6.136 (2008) para uso em alvenaria estrutural.

4.6.4 Determinação das Características Térmicas dos Compósitos Base dos Blocos Protótipos

A condutividade térmica dos materiais com os quais os blocos protótipos foram produzidos são apresentadas na Tabela 4.73.

Como pode ser verificado, a simples substituição de 50% em volume do agregado miúdo convencional pelo resíduo de *Pinus spp*, fez com que a condutividade térmica média do concreto para blocos traço 1:10, fosse reduzida de 0,90 W/mK, para valores em torno de 0,60 W/mK (resíduo de *Pinus spp* AF-48H + 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a 0,64 W/mK (resíduo de *Pinus spp in natura* + 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), portanto com reduções de 33,33% a 28,89%, respectivamente.

Quando, além da substituição da metade do agregado miúdo mineral por resíduo de *Pinus spp* ainda substituiu-se parcialmente o cimento Portland do traço, verifica-se que a condutividade térmica do concreto produzido reduziu de 0,90 W/mK para 0,68 W/mK quando utilizado 10% de sílica ativa, portanto com redução de 24,44% a 0,52 W/mK, no traço com 30% de CCA, com redução de 42,22%.

Diante do exposto, pretende-se comprovar a tese que os materiais produzidos com base em compósitos cimento-madeira, como no caso dos blocos protótipos de concreto traço 1:10 com substituição de 50% do agregado miúdo mineral pelo resíduo

de *Pinus spp*, apresentam características de isolamento térmico, superiores aos materiais cimentícios convencionais.

TABELA 4.73 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS COMPÓSITOS BASE DOS BLOCOS

Compósito	Condutividade Térmica (W/mK)	CV (%)	Variação (%)
Traço 1 : 10 (Ref 1)	0,90 ^A	0,64	-
Mad in Natura (Ref 2)	0,61 ^{CDE}	9,13	- 32,22%
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	0,64 ^{BCD}	2,40	- 28,89%
Mad AF-48H + 4.5% CaCl ₂ (Ref 4)	0,60 ^{DE}	3,83	- 33,33%
Sílica Ativa (10,0%)	0,68 ^B	7,37	- 24,44%
Metacaulim (10,0%)	0,67 ^{BC}	3,46	- 25,56%
Cinza Volante (5,0%)	0,57 ^{EF}	6,08	- 36,67%
Escória de Alto Forno (25,0%)	0,60 ^{DE}	6,77	- 33,33%
Res. de Cerâmica Calcinada (5,0%)	0,57 ^{EF}	6,08	- 36,67%
Cinza de Casca de Arroz (30,0%)	0,52 ^F	5,09	- 42,22%

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias ao nível de 95% de confiança; Médias obtidas de 3 medições; CV = Coeficiente de Variação

4.6.5 Análise da Eficiência Técnica, Econômica e Ambiental dos Blocos Protótipos

Nas etapas anteriores do estudo, restou provada, diante das exigências da NBR 6.136 (2008), a viabilidade técnica da produção e utilização dos blocos de concreto traço 1:10 com 50%, em volume, de resíduo de *Pinus spp* como agregado lignocelulósico, no lugar do agregado miúdo convencional e de substituições parciais do cimento Portland CPV ARI RS, por seis materiais cimentícios alternativos.

Para verificar a viabilidade do novo material, deve-se considerar não somente os custos financeiros inerentes ao processo de produção, mas também, os impactos ecológicos derivados da redução de emissões de CO₂, visto que um dos usos mais tradicionais do resíduo de *Pinus spp* é sua queima para a produção de energia.

A redução das emissões durante a produção do cimento Portland, em função da substituição deste pelos materiais cimentícios alternativos, também deve ser

considerada, assim como a própria imobilização ambientalmente segura, destes mesmos materiais cimentícios alternativos, que deixam de ser apenas resíduos de outras atividades industriais e passam a ser encarados como matérias-primas.

Deve-se considerar, também, a redução da utilização de areia (agregado miúdo mineral) na composição dos blocos, que substituído pelo resíduo de *Pinus spp*, deixa de ser extraído de fontes não renováveis onde sua exploração, via de regra, gera grandes danos ambientais.

A fim de considerar todos estes fatores e ainda, as características físicas, mecânicas e térmicas apresentadas por cada tipo de bloco protótipo desenvolvido, resolveu-se criar um Índice de Eficiência (IE), considerando como referência o bloco produzido com os materiais convencionais.

Desta forma, cada característica dos blocos protótipos foi encarada como um Fator. A divisão dos Fatores apresentados para cada bloco protótipo pelo mesmo Fator do bloco de referência deu origem a um Coeficiente de Equivalência referente à característica considerada.

O Índice de Eficiência de cada tipo de bloco foi então determinado pela multiplicação de todos os Coeficientes de Equivalência relativos a ele. Como para o bloco produzido com materiais convencionais, de referência, apresenta IE = 1,00, todos os demais que apresentarem IE > 1,00 se mostram materiais mais Eficientes que o de referência, enquanto os que apresentarem IE < 1,00, se mostram menos Eficientes que o de referência.

Determinação do Custo dos Blocos Protótipos

Como o custo é apenas um dos fatores relevantes incluídos na análise, e portanto, para facilitar os cálculos, todos os custos de produção comuns aos blocos, tais como, custo da mão-de-obra, impostos e taxas, não foram considerados. Para composição dos custos dos blocos o valor relativo aos materiais, fretes, custos para transporte e moagem dos materiais alternativos, custos do pré-tratamento do resíduo de *Pinus spp*, energia entre outros, foram determinados com base nos valores de

mercado para Setembro de 2009. Na Tabela 4.74, são apresentados os custos determinados para os blocos protótipos.

TABELA 4.74 - CUSTO DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

Bloco Protótipo	Custo (R\$/Unidade)	Variação (%)
Traço 1 : 10 (Ref 1)	0,990	-
Mad in Natura (Ref 2)	0,878	- 11,31%
Mad in Natura + 4.5% CaCl ₂ (Ref 3)	0,998	+ 0,81%
Mad AF-48H + 4.5% CaCl ₂ (Ref 4)	1,024	+ 3,43%
Sílica Ativa (10,0%)	1,014	+ 2,42%
Metacaulim (10,0%)	0,996	+ 0,61%
Cinza Volante (5,0%)	0,878	- 11,31%
Escória de Alto Forno (25,0%)	0,869	- 12,22%
Res. de Cerâmica Calcinada (5,0%)	1,022	+ 3,23%
Cinza de Casca de Arroz (30,0%)	0,876	- 11,52%

Como pode ser observado, o custo dos blocos protótipos é significativamente influenciado pelo custo do cimento Portland e do CaCl₂.2H₂O, tanto que nos blocos produzidos sem CaCl₂.2H₂O o custo é 11,31% menor que o bloco convencional e os blocos produzidos com teores de 5% de CV, 25% de EAF e 30% de CCA, apresentam custos 11,31%, 12,22% e 11,52% menores, respectivamente (apesar de utilizarem resíduo com pré-tratamento AF-48H e 4,5% de CaCl₂.2H₂O).

Determinação da Eficiência dos Blocos Protótipos

Na Tabelas 4.75 e 4.76 apresentam-se, as características dos blocos protótipos, considerados como Fatores (Tabela 4.75) e Coeficientes de Equivalência (Tabela 4.76), bem como já são apresentados seus Índices de Equivalência (IE).

TABELA 4.75 - CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS - FATORES

Bloco	Características						Custo (R\$/Bloco)
	ME (kg/m ³)	RC28d (MPa)	RT28d (MPa)	CT (W/mK)	% Resíduo Pinus sp	% Cimento	
T 1:10 Convencional	2.242,36	13,06	1,73	0,90	1,00	1,00	0,990
Mad Nat	2.019,38	4,39	1,23	0,61	0,50	1,00	0,878
Mad Nat + CC	1.977,97	4,61	1,59	0,64	0,50	1,00	0,998
Mad AF48H + CC	2.035,34	5,16	1,70	0,60	0,50	1,00	1,024
10% Sílica Ativa	2.028,61	5,03	1,62	0,68	0,50	0,90	1,014
10% MC	2.022,67	4,36	1,36	0,67	0,50	0,90	0,996
5% CV	1.956,08	5,65	1,71	0,57	0,50	0,95	0,878
25% EAF	2.010,66	4,91	1,44	0,60	0,50	0,75	0,869
5% RCC	1.989,09	4,57	1,15	0,57	0,50	0,95	1,022
30% CCA	1.964,29	4,43	1,83	0,52	0,50	0,70	0,876
Proporcionalidade	inv	dir	dir	inv	inv	inv	inv

TABELA 4.76 - COEFICIENTES DE EQUIVALÊNCIA E ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

Bloco	Coeficientes de Equivalência						Custo	IE
	Massa Específica	RC 28d	RT 28d	Cond. Térmica	% Res. de Pinus sp	% Subst. do Cimento		
T 1:10 Convencional	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mad Nat	1,110	0,336	0,711	1,475	2,000	1,000	1,128	0,883
Mad Nat + CC	1,134	0,353	0,919	1,406	2,000	1,000	0,992	1,026
Mad AF48H + CC	1,102	0,395	0,983	1,500	2,000	1,000	0,967	1,241
10% Sílica Ativa	1,105	0,385	0,936	1,324	2,000	1,111	0,976	1,145
10% MC	1,109	0,334	0,786	1,343	2,000	1,111	0,994	0,863
5% CV	1,146	0,433	0,988	1,579	2,000	1,053	1,128	1,837
25% EAF	1,115	0,376	0,832	1,500	2,000	1,333	1,139	1,590
5% RCC	1,127	0,350	0,665	1,579	2,000	1,053	0,969	0,844
30% CCA	1,142	0,339	1,058	1,731	2,000	1,429	1,130	2,289

Diante do determinado na Tabela 4.76, pode-se constatar que:

Blocos protótipos que apresentaram maior eficiência que os blocos de concreto traço 1:10 convencional:

- 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* com adição de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (IE = 1,026);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (IE = 1,241);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 10% de Sílica Ativa (IE = 1,145);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 5 de Cinza Volante (IE = 1,837);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H, 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 25% de EAF (IE = 1,590);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 30% de CCA (IE = 2,289);

Por outro lado, não são tão eficientes quanto os blocos convencionais, os blocos protótipos produzidos com:

- 50% de resíduo de *Pinus spp in natura* (IE = 0,883);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H e 10 de Metacaulim (IE = 0,863);
- 50% de resíduo de *Pinus spp* AF-48H, 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 5% de RCC (IE = 0,844).

Apesar de estes últimos blocos apresentarem $\text{IE} < 1,00$, são materiais que apresentaram viabilidade técnica, econômica e ambiental, como pode ser verificado ao longo do trabalho, apenas a relação custo/benefício de sua produção, talvez não seja, ainda, recompensadora, em comparação com a adoção do bloco convencional.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões decorrentes da realização da pesquisa e sugeridos alguns assuntos ligados ao tema, que merecem ser avaliados de uma forma mais específica, em trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES DO ESTUDO

a- Quanto à interação entre o cimento Portland e o resíduo de *Pinus spp*, conclui-se que:

- A granulometria da serragem exerceu influência significativa sobre as características físicas, mecânicas e térmicas dos compósitos, sendo que a serragem com $D_{\text{máx}} = 4,8$ mm apresentou os melhores resultados;
- A utilização do aditivo acelerador de pega $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, também exerceu influência significativa sobre as características físicas e mecânicas dos compósitos, sendo seus efeitos comprovados, também, por técnicas termométricas. O teor ótimo de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, para os compósitos puros (sem substituição parcial do cimento Portland) foi determinado em 4,5% (em relação a massa de cimento do compósito);
- Os pré-tratamentos ao resíduo de *Pinus spp*, quando utilizados com a adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, apresentaram incrementos significativos nas características mecânicas dos compósitos. Dos 12 pré-tratamentos testados, os melhores desempenhos foram determinados para os efetuados com Água Quente e com Água Fria;
- A técnica inovadora utilizada para análise termométrica das misturas, baseada na utilização de sensores de Bragg em fibras óticas, mostrou-se eficiente em comparação aos sistemas de aquisição que utilizam termopares, principalmente pela precisão do sistema, que é imune a interferências e facilidade de multiplexagem, permitindo a leitura de múltiplos pontos com a mesma fibra ótica;

- A simples determinação das temperaturas e tempos de hidratação dos compósitos, porém, não se mostrou suficiente para a definição do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mais viável para utilização nos compósitos ensaiados, por não levar em consideração as características necessárias para manuseio e moldagem do material no estado fresco.

b- Quanto às substituições parciais do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos, conclui-se que:

- A substituição parcial do cimento Portland pelos seis materiais alternativos testados mostrou-se viável, sendo que as composições otimizadas apresentaram substituições de 5% de cinza volante e resíduo de cerâmica calcinada, 10% de sílica ativa e metacaulim, 25% de escória de alto-forno e 30% de cinza de casca de arroz;
- Teores de substituição acima dos referidos acima resultaram em decréscimos significativos da resistência à compressão dos compósitos curados;
- Verificaram-se problemas com o uso concomitante do aditivo acelerador de pega e superplastificante, sendo, necessário, aumentos consideráveis de superplastificante para teores mais altos de aditivo acelerador, para um mesmo teor de substituição do cimento.
- Os compósitos produzidos com as substituições parciais do cimento Portland, principalmente aqueles com maiores teores de substituição apresentaram menores temperaturas e maiores tempos de hidratação, apesar de não apresentarem quedas significativas em termos de resistências mecânicas.

c- Quanto à substituição parcial do agregado miúdo mineral pela resíduo de *Pinus spp*, no concreto para produção de blocos, conclui-se que:

- É possível substituir o agregado miúdo mineral (areia) do traço do concreto para blocos pelo resíduo de *Pinus spp* nas mais diversas proporções, condicionando este teor de substituição às características físicas e

mecânicas dos blocos a serem produzidos. Neste estudo fixou-se o teor de substituição em 50% (em volume), buscando atingir características que permitissem a utilização dos blocos produzidos em alvenaria estrutural, objetivo que foi plenamente alcançado;

- Na produção dos blocos protótipos com base nos compósitos cimento-madeira estudados, verificou-se a necessidade de alterar a velocidade de abertura dos extratores da máquina vibro-prensa, a fim de evitar a formação de trincas no material fresco;

d- Quanto à produção dos blocos protótipos, com substituição parcial do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos, conclui-se que:

- Os blocos protótipos contendo resíduo de *Pinus spp* e substituições parciais do cimento Portland apresentaram massas específicas menores que os blocos convencionais, porosidade, absorção de água e retração por secagem abaixo dos limites impostos pela norma 6.136 (2008);
- Os blocos protótipos atingiram resistências à compressão que permitem sua utilização em alvenaria estrutural para construções de até 5 pavimentos, sem estrutura de concreto armado;
- Os compósitos base dos blocos protótipos apresentaram reduções significativas da condutividade térmica em comparação com o concreto utilizado na produção dos blocos convencionais;
- Todos os blocos protótipos apresentaram viabilidade técnica e econômica, porém quanto à eficiência, os blocos produzidos com 10% de metacaulim, 5% de resíduo de cerâmica e com serragem sem pré-tratamento nem aditivo acelerador, apresentaram pequena desvantagem quando comparados aos blocos convencionais. Por outro lado, todas as outras composições estudadas nesta pesquisa, apresentaram vantagens altamente significativas.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São necessários estudos mais aprofundados sobre o material produzido, com vistas a minimizar os riscos de uso material produzido. A interface entre as partículas do resíduo de *Pinus spp* a matriz cimentícia, deverá ser analisada por meio de sistemas óticos e eletrônicos e poderá ser melhorada com a inclusão de materiais impermeabilizantes melhorada.

Como as edificações são bens duráveis, e a quantidade de recursos empregada para a produção desse bem, normalmente é alta, e diante ainda do grande déficit habitacional que o Brasil apresenta, os recursos disponíveis para a implantação de habitações de interesse social, também não podem ser empregados de maneira irresponsável, ou em materiais de construção de baixa qualidade, para tanto a durabilidade dos blocos produzidos com a adição do resíduo de *Pinus spp* e materiais cimentícios alternativos deverá ser determinada.

Deverão ser analisadas as características de resistência ao fogo, bem como uma análise do ciclo-de-vida dos blocos produzidos com o compósito cimento-madeira, verificando as potencialidades de reciclagem ou de utilização do material após a vida útil das construções na qual estão inseridos.

As características de isolamento térmico e acústico, também deverão ser determinadas, por meio da monitoração de uma edificação protótipo, bem como a ocorrência de patologias inerentes a utilização do novo material proposto.

Para minimizar os efeitos determinados pela utilização de teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ acima de 4,5% e o uso concomitante do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com aditivos redutores de água, deverão ser testados outros aditivos aceleradores, livres de cloretos e aditivos plastificantes, superplastificantes ou surfactantes, com outras bases químicas.

Pode-se, ainda, estender a substituição do agregado miúdo mineral pelo resíduo de *Pinus spp* e dos materiais cimentícios alternativos na produção de outros artefatos de uso corrente, tais como painéis, telhas, lajotas, *pavers*, meios-fios, muretas de proteção rodoviária, etc.

Enfim, pode-se estender a pesquisa visando à utilização de resíduos de outros tipos de madeira ou resíduos vegetais.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os objetivos propostos para a pesquisa, acredita-se que se obteve êxito, uma vez que se comprovou a viabilidade do uso do resíduo de *Pinus spp* e de outros resíduos industriais em substituição ao cimento Portland, no concreto utilizado para a produção de blocos, com finalidade à construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. São Paulo, 1991. 204 p. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. Ed. PINI. 1ª. edição. 667 p., São Paulo, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI

___ **ACI 234R** - Guide for the use of silica fume in concrete. 2006.

___ **ACI 211.3R** - Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete . 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM

___ **ASTM C 177 – 04**: Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus, Pennsylvania, USA, 2008.

___ **ASTM C 618 - 08a**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Pennsylvania, USA, 2008.

___ **ASTM C 989 – 09**: Standard specification for slag cement for use in concrete. Pennsylvania, USA, 2009.

___ **ASTM C 1073 – 03**: Standard test method for hydraulic activity of ground slag reaction with alkali. Pennsylvania, USA, 2003.

___ **ASTM C 1170 – 08**: Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table, Pennsylvania, USA, 2008.

ÂNGULO, S.C., ZORDAN, S.E., JOHN, V.M. Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclado e suas Aplicações. CT206. IBRACON. **Anais**. Pág. 45 a 56. São Paulo, 2001.

ANJOS, M.A.S. Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 346-249, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Cerâmica no Brasil – Números do Setor**. Documento disponível em www.abceram.org.br. Acesso em 15/09/2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Guia básico de utilização do cimento Portland. **Boletim Técnico** 106, 22p. São Paulo, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Estudo Setorial 2008**. Documento disponível em www.abimci.com.br. Acesso em 25/09/2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT

___ **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

- ___ **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ___ **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- ___ **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- ___ **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ___ **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ___ **NBR NM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- ___ **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ___ **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ___ **NBR 5737:** Cimento Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.
- ___ **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ___ **NBR 5751:** Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.
- ___ **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2008.
- ___ **NBR 6467:** Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
- ___ **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ___ **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ___ **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.
- ___ **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- ___ **NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.
- ___ **NBR 7222:** Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ___ **NBR 9775:** Agregados – determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- ___ **NBR 9778:** Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.

___ **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

___ **NBR 12094**: Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação da condutividade térmica. Rio de Janeiro, 1991.

___ **NBR 14653**: Avaliação de bens. Rio de Janeiro, 2001.

___ **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

___ **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

AUFLEGER, M. CONRAD, M. STROBL, T. MALKAWI, A.I.H., DUAN, Y. Distributed fiber optic temperature measurement in RCC-Dams in Jordan and China. In: International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. 2003, Madrid. **Proceedings**. A.A. Balkema Publishers, p.401-407, 2003.

BATTAGIN, A.F., ESPER, M.W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno**. São Paulo, ABCP, 123 p. 1988.

BERALDO, A.L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité**. Nancy, 1994. 222p. Tese de Doutorado. Université Henri Poincaré.

BERALDO, A.L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: GHAVAMI K., TOLEDO FILHO, R.D., NASCIMENTO, W.J. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande. Editora Gráfica Marcone, 1997. p. 1-48.

BERALDO, A. L., CARVALHO, J.V. Compósito Eucalyptus grandis – cimento Portland. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 150-161. 2004.

BERALDO, A.L., LOPES, W.G., CARVALHO, J.V., ARZOLLA, J.A.P.R., SEVEGNANI, K., SOUZA, P. Efeito da espécie vegetal do tipo de cimento e do tratamento utilizado sobre a resistência à compressão de compósitos. In: 8º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, **Anais**, Salvador, 2000.

BERALDO, A.L., ROLIM, M.M. Efeito de tratamentos sobre a resistência à compressão de compósitos cimento-madeira de reflorestamento. In: Congresso Latinoamericano y II Internacional de Ingeniería Rural. **Anais**, v.10, p. 773-778, Neuquén, Argentina. 1996.

BIRAULT, A.C. **Plant experience with wood-cement particleboard in France**. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Session III: Industrial Manufacturing Processes. USA. v.1, 1989. p. 80-82.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 874-3.2**: Methods for determining thermal insulating properties. Tests for thermal transmittance and conductance. Calibrated hot-box. 1990.

CAMÕES, A. **Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes**. Engenharia Civil, n23. Universidade do Minho, Portugal, 2005.

CARMO, J.B.M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face a resistência mecânica e a viabilidade econômica**. Curitiba, 2006. 136 p., Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

CASTRO, V.G. **Desenvolvimento de um painel cimento-madeira de Pinus taeda de média massa específica e partículas orientadas**. Brasília, 2000. 33p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília.

CHOQUET, P., JUNEAU, F., BESSETE, J. **New generation of Fabry-Perot fiber optics sensors for monitoring of structures**. In: SPIE Conference on Smart Structures and Materials. Newport Beach, USA, 2000.

DAFICO, D.A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Florianópolis, 2001. 191 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

DAFICO, D.A., PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para a produção de pozolana branca. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, **Anais**, p. 1671-1680, 2002.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. São Paulo, 1995. 286 p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DANTAS FILHO, F.P. **Contribuição ao estudo para aplicação do pó de serra da madeira em elementos de alvenaria de concreto não estrutural**. Campinas, 2004. 117 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM. **Relatório sobre a oferta mundial e produção nacional de metacaulim no ano 2007**. Documento disponível em www.dnpm.gov.br. Acesso em 29/06/2008.

DIAS, J.F.F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. São Paulo, 2004. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DINWOODIE, J.M. and PAXTON, B.H. A technical assessment of cement-bonded particleboard. In: Proceedings 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. **Forest Products Society**. P. 115-124, 1989.

EVANS, P.D. Summary: An introduction to wood-cement composites. In: Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region. **Proceedings**, p. 7-10, Australia, 2000.

FAN, M., BONFIELD, P., DINWOODIE, J., BREESE, M. Dimensional instability of cement particleboard. In: International Conference on Wood and Wood Fiber Composites. Stuttgart. **Proceedings**, p. 363-374, 2000.

FENGEL, W.A., WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin. Ed. Walter de Gruyter, 613p., 1989.

FERREIRA JÚNIOR, S. Produção de Blocos de Concreto para Alvenaria; Prática Recomendada. São Paulo, **Boletim Técnico**, n. 107, ABCP, 1985, 12p.

FERREIRA, A., ARAÚJO, F.M., MAIA, A. A. ALVES, P.A., SANTOS, J.L. Redes de Bragg em fibra óptica – Contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural. In: Encontro Nacional Betão Estrutural. **Anais**. Portugal, 2004.

FICKER, J. **Manual de avaliações e perícias em imóveis urbanos**. 2ª ed. São Paulo. Pini, 2005.

FRASSON JÚNIOR, A. **Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Florianópolis, 2000. 146 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

FREITAS JÚNIOR, J.A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2005, 131 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

GONÇALVES, J.P., TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R. Estudo de hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, v.6,n.4, p. 83-94. 2006.

GRANDI, L.A.C. **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra**. Campinas, 1995. 128p. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas.

GRANDI, L.A.C. **O uso do pó de serra como material de construção em misturas secas e argamassa**. São Carlos, 1991. 92 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

GRANDI, S.L. Alvenaria estrutural: a memória de um sistema construtivo. **Prisma soluções construtivas com blocos de concreto**, nº 5, dezembro 2002, Ed. Mandarim, São Paulo, dezembro/2002, p. 21 –23.

HACHMI, M. and CAMPBELL, A.G. Wood-cement chemical relationships. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. **Proceedings**. P. 43-47. 1989.

HACHMI, M., MOSLEMI, A. A., CAMPBELL, A.G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science Technology**, n.24, p. 345-354, 1990.

HOEFLICH, V.F. O papel das florestas para o desenvolvimento da sociedade brasileira. **Revista da Madeira**, n. 83, 2004

HON, D.N.S; SHIRAISHI, N. **Wood and Cellulosic Chemistry**. Marcel Dekker, Inc. New York. 2001. 914p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Mundial de Arroz**. Relatório disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em 15/07/2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8302**: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus. 1991.

ISAIA, G.C. Método holístico para dosagem de concreto de alto desempenho com pozolanas pelo critério durabilidade. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 4, São Paulo, **Anais**, São Paulo, v1, p.329-346, 1996.

ISAIA, G.C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, São Paulo, 2v. 1712p. (2007)

ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2v. 1.600 p. IBRACON, São Paulo, 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná – FUPEF. Curitiba, 2005. 247 p.

JAYNE, B.A., BODIG, J. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company, 711 p., 1993.

JOHN, V.M., AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional de Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil. **Anais**. p.29-38, EPUSP, São Paulo, 1993.

JORGE, F.C., PEREIRA, C., FERREIRA, J.M.F. Wood-cement composites: a review. **Holz Roh Werkst** n. 62, p. 370-377, 2004.

KLOCK, U. **Química da Madeira**. Notas de aula do curso de engenharia florestal da Universidade Federal do Paraná, disponíveis em www.madeira.ufpr.br, acesso em 06/09/2005.

LANGE, H., SIMATUPANG, M.H., NEUBAUER, A. Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood-cement composites. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. **Proceedings**. p. 48-52, USA. 1989.

LATORRACA, J.V.F. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. Curitiba, 2000. 191 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

LEE, A.W.C., HONG, Z. Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of wood-cement compatibility. **Forest Products Journal**. v.36, p. 87-90, 1986.

LEE, A.W.C., HONG, Z., PHILLIPS, D.R, HSE, C.Y. Effect of cement-wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time and compressive strength of wood-cement mixtures. **Wood Fibre Science**, v.19, p. 262-268, 1987.

LEVINE, D.M., BERENSON, M.L., STEPHAN, D. **Statistics for Managers Using Microsoft® Excel** (Updated Version). Prentice Hall, Inc. a Simon & Schuster Company, 1998.

LIMA, A.F., JARÁ, E.R.P., ALFONSO, V.A. **Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica**. In: Celulose e Papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2^a ed. São Paulo. p. 129-167. IPT, 1988.

MA, L.F., YAMAUCHI, H., PULIDO, O.R., TAMURA, Y, SASAKI, H., KAWAI, S. Manufacture of cement-bonded boards from wood and other lignocellulosic materials: Relationships between cement hydration and mechanical properties of cement bonded boards. In: Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region. **Proceedings**, p. 13-23, Australia, 2000.

MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances in Concrete Technology**, v1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARTELLI, C., SILVA, J.C.C, NOVAES, P.J.D., KALINOWSKI, H.J. Sistema de leitura de redes de Bragg para medidas estáticas e dinâmicas. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 17, n.1, 2004.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. Curitiba, 2005. 187p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

MEDEIROS, J.S. Blocos de concreto para alvenaria estrutural: Avaliação de parâmetros básicos para a produção. In: 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, **Anais**, Florianópolis, 1994.

MEDEIROS, J.S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: Produção de componentes e parâmetros de projeto**. São Paulo, 1993. 449 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002. 146 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. 674 p. Ed. IBRACON, 2008.
- MILANI, A.P.S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e solo-cal adicionados de casca de arroz**. Campinas, 2005. 113 p., Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas.
- MILLER, D.P., MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: effects of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science**, n. 23, 1991. p. 472-482.
- MORAIS, S.A.L., NASCIMENTO, E.A., MELO, D.C. Análise da madeira de Pinus oocarpa Parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p. 461-470, Viçosa, 2005.
- MOSER, D.E., SOARES, M.A., MARQUES FILHO, J., AUFLEGER, M. Instrumentação por fibra ótica em barragens no Brasil – Estudo de caso pioneiro UHE Fundão. In: 3º Simpósio Brasileiro de Barragens. **Anais**. São Paulo, 2006.
- MOSLEMI, A. A. Inorganic-bonded wood composites: From sludge to siding. **Journal of Forestry Science**. November, 1993.
- MOSLEMI, A. A. Wood-cement panel products: coming of age. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. **Proceedings**, USA. 1989. p. 12-18.
- MOSLEMI, A. A. **Important considerations in wood-cement compatibility**. Ph.D. Tesis. University of Idaho. 1988.
- NAHUZ, M.A.R. Atividades industriais com madeiras de Pinus – Atualidades e desafios. **Revista da Madeira**, n. 83, 2004.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. 738 p., Ed. PINI, São Paulo, 1997.
- NITA, C., JOHN, V.M. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. **Boletim Técnico**, n. BT/PCC/451. 13p. Departamento de Engenharia e Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- OLIVEIRA, C.T.A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. São Paulo, 2000. 162p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. 12ª ed., Editora Globo, 307 p., São Paulo, 1993.
- PIMENTEL, L. L. **Telhas onduladas à base de cimento Portland e resíduos de Pinus caribea**. Campinas, 2000. 67p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.
- PINTO, T.P. Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil – Situação atual. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. **Anais**. EPUSP/ANTAC, P. 156-170. São Paulo, 1997.

- POUEY, M.T.F. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Porto Alegre, 2006. Tese de Doutorado. 320 p. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., OLIVEIRA, A.L., BEDIN, C.A. **Alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 1ª ed. Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- RAMIREZ-CORETTI, A., ECKELMAN, C.A. and WOLF, R.W. Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American perspective. **Forest Products Journal**, n.48. 1998.
- RAZZI, P.S., PORTIER, R., RAMAN, A. Studies on polymer-wood interface bonding: effect of coupling agents and surface modification. **Journal of Composite Materials**. n.33. 1999. p. 1064-1079.
- ROCHA, G.G.N., VASCONCELOS, W.L. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. **Concreto e Construções**, n. 42, 98-116, IBRACON, 2006.
- RUY, V.A. **Estudo da qualidade dos blocos cerâmicos produzidos pelas olarias da região metropolitana de Curitiba – Avaliação de três empresas selecionadas**. Curitiba, 2004. 78 p. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
- SANDBERG, P., BENINI, H. O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais. **Concreto e Construções**, n. 51, Ibracon, 2008.
- SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Florianópolis, 1997. 111 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª ed. São Paulo. Edgard Blücher, 1992.
- SAVASTANO JÚNIOR, H., AGOPYAN, V. Microestrutura x desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais. In: Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, Epusp/Antac, 1997. p. 153-158.
- SAVASTANO JÚNIOR, H. Sisal mechanical pulps as reinforcement for cement materials. In: International Conference on non Conventional Materials and Technologies. Hanoi, 2002. **Proceedings**, p. 211-218.
- SAVASTANO JÚNIOR, H. JOHN, V.M., FERREIRA, O.P. Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites. In: **Materials and Structures**, v. 35, p. 64-68, RILEM, 2002.
- SEKINO, N. and SUZUKI, S. Durability of wood-based panels subjected to ten-year outdoor exposure in Japan. In: 6 th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. Oregon State University. Corvallis, **Proceedings**, p. 323-332. 2002.
- SEMPLE, K.E., EVANS, P.D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of Portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. In: Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region. **Proceedings**, p. 29-39, Australia, 2000.
- SEMPLE, K.E. and EVANS, P.D. **Wood-cement composites – Suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas**. Rural Industries Research and Development Corporation. Kingston ACT, 2004.
- SEMPLE, K.E., EVANS, P.D. Compatibility of some Australian acacias with Portland cement. **Holz Roh Werkstoff** n. 56, 2004.

SEMPLE, K.E., EVANS, P.D. Adverse effects of heartwood on the mechanical properties of wood-wool cement boards manufactured from radiata Pine wood. **Wood Fibre Science**, n. 32, p. 37-43, 2000.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. São Paulo, 2002. 128p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SIMATUPANG, M.H., SCHWARTZ, G.H. and BRÖKER, F.W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: 8th World Forestry Congress. **Special paper**. Indonésia. 1978. 21p.

SIMATUPANG, M.H., LANGE, H., KASIM, A. SEDDING, N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. International Congress on Fiber and Particleboard with Inorganic Binder, Idaho, **Proceedings**, p. 33-42, 1988.

SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO – SNIC. **Produção mundial de cimento Portland**. Documento disponível em www.snic.org.br. Acesso em 28/08/2008.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**. Academic Press, Inc. Orlando. 1993.

SOUSA, J.G.G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. Brasília, 2001. 120p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

SOUZA, M.R. Tecnologias para usos alternativos de resíduos florestais: Experiência do Laboratório de Produtos Florestais – IBAMA na área de utilização de resíduos florestais e agrícolas. In: Workshop Sulamericano sobre Usos Alternativos de Resíduos de Origem Florestal e Urbana. **Anais**, p.49-62. Curitiba, 1997.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Porto Alegre, 2003. 203 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STANCATO, A.C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados**. Campinas. 2006. 209p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

SUMMER, M., GIANETTI, G., BENINI, H. A indústria do cimento e seu papel na redução das emissões de CO₂. **Concreto e Construções**, n. 51. p. 65 – 84. IBRACON, 2008.

SWAMY, R.N. Vegetable fiber reinforced cement composites – a false dream or a potential reality? In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. Salvador, 1990, **Proceedings**. Chapman and Hall, p. 3-9.

TANGO, C.E.S. **Blocos de concreto: dosagem, produção e controle de qualidade**. 1^a. ed. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1984.

TAPPI T 204 cm. Solvent extractives of wood and pulp. 1997.

THOMAZ, E, HELENE,P. Qualidade no Projeto e na execução de Alvenaria Estrutural e de Alvenaria de Vedação em Edifícios. EPUSP, **Boletim Técnico**, n. 252, São Paulo, 2000.

WEATHERWAX, R.C. and TARKOW, H. Effect of wood on the setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor. **Forest Products Journal**, v.17, n.7, p.30-32, 1967.

WEBER, S.L. **Metodologia para Obtenção de Sílica de Elevada Reatividade para Uso em Concreto de Alto Desempenho a partir do Processamento de Cinza de Casca de Arroz**. Florianópolis, 2001. 98p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. São Paulo, 1989, 191 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

ZUCCO, L.L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. Campinas, 1999. 118p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

ANEXOS

ANEXO 1	ANOVA - 1ª FASE: RESULTADOS DA ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E O RESÍDUO DE <i>PINUS spp</i>	257
ANEXO 2	ANOVA - 2ª FASE: RESULTADOS DA ANÁLISE DAS SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS AO CIMENTO PORTLAND	266
ANEXO 3	ANOVA - 3ª FASE: RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS DE REFERÊNCIA	271
ANEXO 4	ANOVA - 4ª FASE: RESULTADOS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM	273
ANEXO 5	ANOVA - 5ª FASE: RESULTADOS DA ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO MINERAL PELO RESÍDUO <i>PINUS spp</i>	275
ANEXO 6	ANOVA - 6ª FASE: RESULTADOS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS	281

ANEXO 1

ANOVA - 1ª FASE: ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE O CIMENTO PORTLAND E O RESÍDUO DE *PINUS spp*

Termometria - Determinação do Teor $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Determinação da Temperatura Máxima

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor CaCl_2	1184,49	6	197,414	62,09(s)	0,0000
Erro	57,2348	18	3,17971		
Total (Corr.)	1241,72	24			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Tempo para $\text{TM}_{\text{Máx}}$

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor CaCl_2	246087,0	6	41014,5	284,49(s)	0,0000
Erro	2595,0	18	144,167		
Total (Corr.)	248682,0	24			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Físicas dos Compósito: Resíduo de *Pinus spp* com $\text{DM}_{\text{Máx}} = 2,4 \text{ mm}$

Massa Específica do Compósito: Resíduo de *Pinus spp* com $\text{DM}_{\text{Máx}} = 2,4 \text{ mm}$

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor CaCl_2	46279,0	4	11569,8	88,06(s)	0,0000
Erro	1970,85	15	131,39		
Total	48249,9	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade): Resíduo de *Pinus spp* com $\text{DM}_{\text{Máx}} = 2,4 \text{ mm}$

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor CaCl_2	46,8934	4	11,7233	15,44(s)	0,0000
Erro	11,3913	15	0,759422		
Total	58,2847	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água: Resíduo de *Pinus spp* com $\text{DM}_{\text{Máx}} = 2,4 \text{ mm}$

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor CaCl_2	57,8035	4	14,4509	50,64(s)	0,0000
Erro	4,2806	15	0,285373		
Total	62,0841	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Físicas dos Compósitos - *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm**Massa Específica do Compósito: Resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor $CaCl_2$	15172,6	4	3793,14	25,51(s)	0,0000
Erro	2230,43	15	148,695		
Total (Corr.)	17403,0	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade): Resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor $CaCl_2$	284,986	4	71,2465	263,31(s)	0,0000
Erro	4,0587	15	0,27058		
Total	289,045	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água: Resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 4,8$ mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor $CaCl_2$	166,592	4	41,648	167,61(s)	0,0000
Erro	3,72712	15	0,248475		
Total	170,319	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas - *Pinus sp* com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm**Resistência aos 3 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de $CaCl_2$	200,008	4	50,0019	74,48(s)	0,0000
Erro	10,07	15	0,671332		
Total (Corr.)	210,078	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 7 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de $CaCl_2$	268,405	4	67,1013	126,34(s)	0,0000
Erro	7,96645	15	0,531097		
Total	276,372	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 28 dias de Idade: Resíduo de *Pinus spp* com DMáx = 2,4 mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	278,651	4	69,6629	88,17(s)	0,0000
Erro	11,851	15	0,790068		
Total	290,502	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração aos 28 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com DMáx = 2,4 mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	1,35163	4	0,337907	101,73(s)	0,0000
Erro	0,049825	15	0,00332167		
Total	1,40145	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas - *Pinus sp* com Dmáx = 4,8 mm**Resistência aos 3 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com DMáx = 4,8mm**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	62,1377	4	15,5344	28,80(s)	0,0000
Erro	8,09085	15	0,53939		
Total	70,2286	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 7 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com DMáx = 4,8 mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	337,338	4	84,3346	172,56(s)	0,0000
Erro	7,33082	15	0,488722		
Total	344,669	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 28 dias de Idade: Resíduo de *Pinus spp* com DMáx = 4,8 mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	397,231	4	99,3077	120,96(s)	0,0000
Erro	12,3145	15	0,820965		
Total (Corr.)	409,545	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração aos 28 dias de idade: Resíduo de *Pinus spp* com Dmáx = 4,8 mm

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Teor de CaCl ₂	1,75347	4	0,438368	75,11(s)	0,0000
Erro	0,08755	15	0,00583667		
Total	1,84102	19			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resultados Otimizados - Análise Comparativa dos Compósitos Produzidos com Resíduo de *Pinus spp* com Dmáx = 2,4 mm e 4,0% de CaCl₂.2H₂O e com Resíduo de *Pinus spp* com Dmáx = 4,8 mm e 4,5% de CaCl₂.2H₂O.

Características Físicas

Massa Específica do Compósito

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor CaCl ₂	21209,8	1	21209,8	106,26(s)	0,0000
Erro	1197,66	6	199,611		
Total	22407,4	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade):

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor CaCl ₂	8,71531	1	8,71531	14,44(s)	0,0090
Erro	3,62078	6	0,603463		
Total	12,3361	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água:

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor CaCl ₂	17,6418	1	17,6418	56,04(s)	0,0003
Erro	1,8888	6	0,3148		
Total	19,5306	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas

Resistência aos 3 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor de CaCl ₂	4,21951	1	4,21951	3,37(ns)	0,1159
Erro	7,50637	6	1,25106		
Total	11,7259	7			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor de CaCl ₂	54,6012	1	54,6012	138,75(s)	0,0000
Erro	2,3611	6	0,393517		
Total (Corr.)	56,9623	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor de CaCl ₂	53,4578	1	53,4578	39,42(s)	0,0008
Erro	8,13575	6	1,35596		
Total	61,5936	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração aos 28 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Dmáx e Teor de CaCl ₂	0,0578	1	0,0578	18,65(s)	0,0050
Erro	0,0186	6	0,0031		
Total	0,0764	7			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Análise dos Pré-Tratamentos ao Resíduo de *Pinus spp***Análise Química - Determinação de Extrativos**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Extrativos	150,978	12	12,5815	7435,85(s)	0,0000
Erro	0,0659884	39	0,00169201		
Total (Corr.)	151,044	51			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Termometria - Pré-Tratamentos sem CaCl₂.2H₂O**Determinação da Temperatura Máxima**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Não Uso de CaCl ₂	2313,41	13	177,955	53,58(s)	0,0000
Erro	92,9891	28	3,32104		
Total (Corr.)	2406,4	41			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Tempo para TMáx

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Não Uso de CaCl ₂	923404,0	13	71031,1	527,83(s)	0,0000
Erro	3768,0	28	134,571		

Total (Corr.) 927172,0 41

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Termometria - Pré-Tratamentos com 4,5% de CaCl₂.2H₂O**Determinação da Temperatura Máxima**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Uso de CaCl ₂	1455,4	13	111,954	49,28(s)	0,0000
Erro	63,6132	28	2,2719		

Total (Corr.) 1519,02 41

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Tempo para TMáx

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Uso de CaCl ₂	213610,0	13	16431,6	182,57(s)	0,0000
Erro	2520,0	28	90,0		

Total (Corr.) 216130,0 41

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Pré-Tratamentos: Características Físicas**Massa Específica do Compósito**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	1,52188E6	14	108706,0	671,41(s)	0,0000
Erro:	7285,81	45	161,907		

Total 1,52917E6 59

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade) do Compósito

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	1822,01	14	130,144	707,22(s)	0,0000
Erro:	8,281	45	0,184022		

Total 1830,29 59

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	1158,43	14	82,745	526,17(s)	0,0000
Erro:	7,07668	45	0,157259		
Total	1165,51	59			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Pré-Tratamentos: Características Mecânicas**Resistência à Compressão aos 3 dias de idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	924,134	14	66,0096	90,34(s)	0,0000
Erro:	32,8792	45	0,730648		
Total	957,013	59			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	1447,01	14	103,358	96,64(s)	0,0000
Erro:	48,1278	45	1,06951		
Total	1495,14	59			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	1927,95	14	137,711	94,48(s)	0,0000
Erro:	65,588	45	1,45751		
Total	1993,54	59			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Pré-Tratamentos	9,78983	14	0,699274	101,96(s)	0,0000
Erro:	0,308625	45	0,00685833		
Total	10,0985	59			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Traços de Referência

Características Físicas

Massa Específica

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	1,19655E6	3	398851,0	2008,25(s)	0,0000
Erro:	2383,28	12	198,607		
Total (Corr.)	1,19894E6	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	1473,85	3	491,282	1495,77(s)	0,0000
Erro:	3,94138	12	0,328448		
Total (Corr.)	1477,79	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	932,42	3	310,807	1817,38(s)	0,0000
Erro:	2,05223	12	0,171019		
Total (Corr.)	934,472	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas

Resistência à Compressão aos 3 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	263,937	3	87,979	167,24(s)	0,0000
Erro:	6,31277	12	0,526065		
Total (Corr.)	270,25	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	816,139	3	272,046	342,12(s)	0,0000
Erro:	9,54223	12	0,795185		
Total (Corr.)	825,681	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	1590,85	3	530,285	402,43(s)	0,0000
Erro:	15,8126	12	1,31772		
Total (Corr.)	1606,67	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	1394,18	3	464,726	162,09(s)	0,0000
Erro:	34,405	12	2,86709		
Total (Corr.)	1428,58	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração aos 28 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	7,07113	3	2,35704	780,26(s)	0,0000
Erro:	0,03625	12	0,00302083		
Total (Corr.)	7,10738	15			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

ANEXO 2

ANOVA – 2ª FASE: ANÁLISE DAS SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS AO CIMENTO PORTLAND

Substituição Parcial do Cimento Portland por Sílica Ativa

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/SA	1466,68	23	63,7688	59,21(s)	0,0000
Erro:	63,5405	59	1,07696		
Total	1530,22	82			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/SA	2668,74	23	116,032	43,15(s)	0,0000
Erro:	166,702	62	2,68874		
Total	2835,44	85			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland por Metacaulim

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/MC	2144,55	33	64,9863	39,47(s)	0,0000
Erro:	158,059	96	1,64645		
Total	2302,61	129			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/MC	3754,43	33	113,771	65,83(s)	0,0000
Erro:	162,455	94	1,72825		
Total	3916,89	127			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza Volante

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/CV	4031,57	33	122,169	76,49(s)	0,0000
Erro:	162,919	102	1,59725		
Total	4194,49	135			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/CV	6407,69	33	194,172	68,60(s)	0,0000
Erro:	288,694	102	2,83033		
Total	6696,38	135			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland por Escória de Alto-Forno**Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/EAF	4589,46	33	139,075	77,62(s)	0,0000
Erro:	182,758	102	1,79175		
Total	4772,22	135			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/EAF	4481,8	33	135,812	45,36(s)	0,0000
Erro:	305,379	102	2,99391		
Total	4787,18	135			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Calcificada**Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/RCC	3786,61	33	114,746	52,81(s)	0,0000
Erro:	178,164	82	2,17273		
Total	3964,78	115			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst CP/RCC	4039,0	33	122,394	47,83(s)	0,0000
Erro:	212,37	83	2,55867		
Total	4251,37	116			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza de Casca de Arroz

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: Subst CP/CCA	2272,26	33	68,8563	33,80(s)	0,0000	
Erro:	167,036	82	2,03702			
Total	2439,29	115				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: Subst CP/CCA	2693,56	33	81,6231	32,58(s)	0,0000	
Erro:	200,453	80	2,50566			
Total	2894,02	113				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland - Traços Maximizados Características Físicas

Determinação da Massa Específica

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito:Subst ao Cimento	1,78809E6	10	178809,0	622,39(s)	0,0000	
Erro:	10055,3	35	287,294			
Total (Corr.)	1,79815E6	45				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação do Índice de Vazios (Porosidade) do Compósito

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito:Subst ao Cimento	1842,07	10	184,207	357,52(s)	0,0000	
Erro:	18,0333	35	0,515238			
Total	1860,1	45				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Absorção de Água

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito:Subst ao Cimento	1323,75	10	132,375	378,60(s)	0,0000	
Erro:	12,2376	35	0,349647			
Total	1335,98	45				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito:Subst ao Cimento	938,811	10	93,8811	67,94(s)	0,0000
Erro:	52,5113	38	1,38188		
Total (Corr.)	991,323	48			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito:Subst ao Cimento	1708,71	10	170,871	85,00(s)	0,0000
Erro:	74,3795	37	2,01026		
Total (Corr.)	1783,09	47			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade comparando com Referências

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito:Subst ao Cimento	1564,96	10	156,496	64,91(s)	0,0000
Erro:	86,7963	36	2,41101		
Total (Corr.)	1651,75	46			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito:Subst ao Cimento	22,2427	10	2,22427	96,39(s)	0,0000
Erro:	0,92305	40	0,0230762		
Total (Corr.)	23,1657	50			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Parcial do Cimento Portland - Traços Maximizados Análise Termométrica dos Compósitos

Determinação da Temperatura Máxima

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Cimento	916,81	10	391,681	260,62(s)	0,0000
Erro:	34,5669	23	1,50291		
Total (Corr.)	3951,37	33			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Tempo para TMáx

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Cimento	191630,0	10	19163,0	153,68(s)	0,0000
Erro:	2868,0	23	124,696		
Total (Corr.)	194498,0	33			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

ANEXO 3

ANOVA - 3ª FASE: RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS DE REFERÊNCIA

Características Físicas

Determinação da Massa Específica no Estado Fresco

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	9088,42	2	4544,21	9,74(s)	0,0056
Erro:	4199,58	9	466,62		

Total 13288,0 11
 • (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Massa Específica no Estado Seco

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	14811,0	2	7405,49	34,80(s)	0,0001
Erro:	1915,12	9	212,792		

Total (Corr.) 16726,1 11
 • (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação do Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	0,108217	2	0,0541083	0,39(ns)	0,6881
Erro:	1,24927	9	0,138808		

Total 1,35749 11
 • (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Absorção de Água

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	0,0888667	2	0,0444333	1,33(ns)	0,3109
Erro:	0,2998	9	0,0333111		

Total 0,388667 11
 • (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas

Resistência à Compressão aos 3 dias de Idade

Análise de Variância					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	113,259	2	56,6297	271,33(s)	0,0000
Erro:	1,87837	9	0,208708		

Total 115,138 11
 • (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	30,0037	2	15,0019	96,70(s)	0,0000
Erro:	1,39617	9	0,155131		
Total	31,3999	11			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	67,2914	2	33,6457	96,06(s)	0,0000
Erro:	3,15235	9	0,350261		
Total	70,4437	11			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Traço	60,311	2	30,1555	65,05(s)	0,0000
Erro:	4,17208	9	0,463564		
Total	64,4831	11			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

ANEXO 4

ANOVA - 4ª FASE: RESULTADOS DO SISTEMA ALTERNATIVO DE MOLDAGEM

Determinação do Tempo de Moldagem Equivalente

Massa Específica no Estado Fresco

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tempo Moldagem	61264,2	9	6807,13	9,29(s)	0,0000
Erro:	17580,9	24	732,539		
Total	78845,1	33			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tempo de Moldagem	82,7474	9	9,19416	41,45(s)	0,000
Erro:	5,32331	24	0,221805		
Total	88,0708	33			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Produção Traço 1:10 em CP 50 mm e Comparação com Blocos T 1:10 de Referência

Características Físicas

Determinação da Massa Específica no Estado Fresco

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	287,004	1	287,004	0,12(ns)	0,7379
Erro:	16566,1	7	2366,58		
Total	16853,1	8			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Massa Específica no Estado Seco

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	14459,1	1	14459,1	6,96(s)	0,0336
Erro:	14551,1	7	2078,73		
Total	29010,2	8			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação do Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	17,4845	1	17,4845	77,76(s)	0,0000
Erro:	1,5739	7	0,224843		
Total	19,0584	8			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Determinação da Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	2,32562	1	2,32562	23,27(s)	0,0019
Erro:	0,69958	7	0,09994		
Total (Corr.)	3,0252	8			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas**Resistência à Compressão aos 3 dias de Idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	0,39762	1	0,39762	3,16(ns)	0,1187
Erro:	0,88078	7	0,125826		
Total (Corr.)	1,2784	8			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	0,722	1	0,722	2,69(ns)	0,1451
Erro:	1,8802	7	0,2686		
Total (Corr.)	2,6022	8			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	1,03209	1	1,03209	5,40(ns)	0,0530
Erro:	1,3372	7	0,191028		
Total (Corr.)	2,36929	8			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Tipo de Moldagem	0,349361	1	0,349361	1,04(ns)	0,3410
Erro:	2,3432	7	0,334742		
Total (Corr.)	2,69256	8			

- (ns) Diferença não significativa a 95% de nível de Confiança

ANEXO 5

ANOVA - 5ª FASE: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO MINERAL PELO RESÍDUO DE *PINUS spp*

Substituições por Resíduo de *Pinus spp in natura*

Massa Específica

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: % de Res.Pinus	1,56936E6	5	313871,0	258,15(s)	0,0000	
Erro:	29180,7	24	1215,86			
Total (Corr.)	1,59854E6	29				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: % de Res.Pinus	742,857	5	148,571	109,63(s)	0,0000	
Erro:	32,5244	24	1,35518			
Total (Corr.)	775,382	29				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: % de Res.Pinus	455,733	5	91,1466	290,77(s)	0,0000	
Erro:	7,52332	24	0,313472			
Total (Corr.)	463,257	29				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: % de Res.Pinus	257,805	5	51,561	440,93(s)	0,0000	
Erro:	2,80648	24	0,116937			
Total (Corr.)	260,611	29				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituições por Resíduo de *Pinus spp in natura* + 4,5% de CaCl₂.2H₂O

Massa Específica

Análise de Variância						
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade	
Efeito: % de Res.Pinus	1,56068E6	5	312135,0	224,52(s)	0,0000	
Erro:	33365,6	24	1390,23			
Total (Corr.)	1,59404E6	29				

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	692,603	5	138,521	189,66(s)	0,0000
Erro:	17,5291	24	0,730378		

Total (Corr.) 710,132 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	438,975	5	87,795	201,80(s)	0,0000
Erro:	10,4416	24	0,435065		

Total (Corr.) 449,417 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	257,423	5	51,4847	405,94(s)	0,0000
Erro:	3,04388	24	0,126828		

Total (Corr.) 260,467 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituições por Resíduo de *Pinus spp* AF-48H + 4,5% de CaCl₂.2H₂O**Massa Específica**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	1,60569E6	5	321139,0	97,56(s)	0,0000
Erro:	78997,2	24	3291,55		

Total (Corr.) 1,68469E6 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	771,072	5	154,214	90,81(s)	0,0000
Erro:	40,7566	24	1,69819		

Total (Corr.) 811,828 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	475,793	5	95,1587	145,44(s)	0,0000
Erro:	15,7033	24	0,654303		

Total (Corr.) 491,497 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: % de Res.Pinus	265,251	5	53,0502	464,00(s)	0,0000
Erro:	2,744	24	0,114333		
Total (Corr.)	267,995	29			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Substituição Agregado Miúdo Mineral por 50% de Resíduo de *Pinus spp***Características Físicas****Massa Específica**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	473604,0	3	157868,0	100,03(s)	0,0000
Erro:	22094,4	14	1578,17		
Total (Corr.)	495698,0	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	156,448	3	52,1492	86,21(s)	0,0000
Erro:	8,46825	14	0,604875		
Total (Corr.)	164,916	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	86,2872	3	28,7624	124,16(s)	0,0000
Erro:	3,2432	14	0,231657		
Total (Corr.)	89,5304	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas**Resistência à Compressão aos 3 dias de idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	14,0857	3	4,69523	76,16(s)	0,0000
Erro:	0,801455	13	0,0616504		
Total	14,8872	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	112,619	3	37,5397	261,89(s)	0,0000
Erro:	1,86345	13	0,143342		
Total	114,483	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	173,118	3	57,7061	333,10(s)	0,0000
Erro:	2,2521	13	0,173238		
Total	175,37	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	185,486	3	61,8285	179,38(s)	0,0000
Erro:	4,48089	13	0,344684		
Total	189,967	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	0,745346	3	0,248449	40,07(s)	0,0000
Erro:	0,086815	14	0,00620107		
Total	0,832161	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Comparação entre T 1:10 convencional e T1:10 com 50% Resíduo de *Pinus spp* (3 Tipos)**Características Físicas****Massa Específica**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	473604,0	3	157868,0	100,03(s)	0,0000
Erro:	22094,4	14	1578,17		
Total (Corr.)	495698,0	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	156,448	3	52,1492	86,21(s)	0,0000
Erro:	8,46825	14	0,604875		
Total (Corr.)	164,916	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	86,2872	3	28,7624	124,16(s)	0,0000
Erro:	3,2432	14	0,231657		
Total (Corr.)	89,5304	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas**Resistência à Compressão aos 3 dias de idade**

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	14,0857	3	4,69523	76,16(s)	0,0000
Erro:	0,801455	13	0,0616504		
Total	14,8872	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	112,619	3	37,5397	261,89(s)	0,0000
Erro:	1,86345	13	0,143342		
Total	114,483	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	173,118	3	57,7061	333,10(s)	0,0000
Erro:	2,2521	13	0,173238		
Total	175,37	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	185,486	3	61,8285	179,38(s)	0,0000
Erro:	4,48089	13	0,344684		
Total	189,967	16			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Subst Ag Miúdo	0,745346	3	0,248449	40,07(s)	0,0000
Erro:	0,086815	14	0,00620107		
Total	0,832161	17			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

ANEXO 6

ANOVA - 6ª FASE: RESULTADOS DOS BLOCOS PROTÓTIPOS

Características Físicas

Massa Específica Seco

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	249356,0	9	27706,2	9,83(s)	0,0000
Erro:	109962,0	39	2819,55		

Total 359318,0 48

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Índice de Vazios (Porosidade)

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	79,1687	9	8,79652	23,47(s)	0,0000
Erro:	14,6184	39	0,37483		

Total 93,7871 48

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Absorção de Água

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	29,0358	9	3,2262	31,36(s)	0,0000
Erro:	4,01246	39	0,102884		

Total 33,0482 48

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Retração por Secagem

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	0,000577312	9	0,0000641458	2,80(s)	0,0263
Erro:	0,000457647	20	0,0000228823		

Total (Corr.) 0,00103496 29

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Características Mecânicas

Resistência à Compressão aos 3 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	30,2205	9	3,35783	66,06(s)	0,0000
Erro:	1,52493	30	0,0508308		

Total (Corr.) 31,7454 39

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 7 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	155,659	9	17,2955	312,34(s)	0,0000
Erro:	1,66122	30	0,0553742		
Total (Corr.)	157,321	39			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 28 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	251,205	9	27,9117	302,71(s)	0,0000
Erro:	2,7662	30	0,0922067		
Total (Corr.)	253,971	39			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Resistência à Compressão aos 91 dias de Idade

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	287,686	9	31,9651	656,65(s)	0,0000
Erro:	1,46038	30	0,0486792		
Total (Corr.)	289,146	39			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança

Condutividade Térmica

Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrado Médio	F-Obs	Probabilidade
Efeito: Composição	0,30032	9	0,0333689	28,52(s)	0,0000
Erro:	0,0234	20	0,00117		
Total (Corr.)	0,32372	29			

- (s) Diferença significativa a 95% de nível de Confiança