



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA: DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
DE PROCESSAMENTO

Fernando Henrique dos Santos Verde

São Luís
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA: DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
DE PROCESSAMENTO

Fernando Henrique dos Santos Verde

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais como requisito à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS.

Orientador: Dr. Flávio Salgado Politi

Co-orientador: Dr. José Manuel Rivas Mercury

Agência Financiadora: CAPES

São Luís
2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE
BIBLIOTECA TEBYREÇÁ DE OLIVEIRA, CEFET-MA

Verde, Fernando Henrique dos Santos

Compósitos cimento-madeira: determinação de parâmetros de processamento / Fernando Henrique dos Santos Verde. - São Luís, 2008.

146 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, 2008.

1. Cimento – Madeira – Compósito 2. Biomassa vegetal 3. *Ficus sp-moraceae* I. Título.

CDU 674.816

***Aos meus pais,
José Maria Verde e Ana Verde,
Minha eterna gratidão***

VITAE

GRADUAÇÃO: Engenharia Industrial Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão em Dezembro de 2004.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE FERNANDO HENRIQUE DOS SANTOS VERDE APRESENTADA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS, DO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO, EM
10 DE JANEIRO DE 2008

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. FLÁVIO SALGADO POLITI
ORIENTADOR - CEFET-MA

PROF. DR. JOSÉ MANUEL RIVAS MERCURY
CO-ORIENTADOR - CEFET - MA

PROF. DR. ANTONIO FARIAS LEAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

PROF. DR. ANTONIO ERNANDES M. PAIVA
CEFET - MA

AGRADECIMENTOS

Ao nosso eterno e bom Deus, Pai Todo Poderoso, Onipotente, Onisciente, Onipresente e senhor de todos nós, o meu muito obrigado por tudo àquilo que o Senhor tem feito em minha vida e pela certeza que sempre estará comigo.

À minha família, em especial à meu pai, José Maria Verde, à minha mãe, Ana Dutra dos Santos Verde, pelo amor, carinho, compreensão e incentivo, que me dedicam para que eu prossiga sempre em busca dos meus ideais.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, por proporcionar esta grande oportunidade em minha vida.

Ao PPGEM, e em especial aos professores integrantes deste Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, pela coragem, determinação e seriedade com que conduzem seus trabalhos, proporcionando aos alunos maior facilidade no desenvolvimento de seus trabalhos.

À meu Orientador, Prof. Dr. Flávio Salgado Politi, pela competência, profissionalismo e contribuição valiosa que me concedeu para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Manuel Rivas Mercury, professor, amigo e Co-orientador, pela valiosa colaboração e assistência durante a elaboração desta dissertação.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudos.

À NASSAU-MA, pela doação de cimento, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Especialista Aluísio Alves, do Departamento de Construção Civil do CEFET-MA, pelo apoio e colaboração durante a elaboração dos ensaios realizados nesta pesquisa.

Aos funcionários do CEFET-MA - Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão (Corpo docente, técnicos administrativos, zeladores etc).

Em fim, a todos que, de forma direta ou indireta, me ajudaram nessa trajetória de luta.

RESUMO

Materiais compósitos consistindo de partículas de madeira embebidas numa matriz de cimento têm chamado muita atenção como uma alternativa para reciclar resíduos de madeira e assim colaborar para preservação das florestas naturais. O uso de painéis desses compósitos já é uma realidade em muitos países devido a suas características particulares, tais como adequada resistência mecânica, baixa condutividade térmica, baixa densidade, elevada resistência ao ataque de fungos e insetos, baixa flamabilidade, resistência a ambientes agressivos, entre muitas outras. Além disso, esses materiais podem ser produzidos numa grande variedade de processos, variando desde um processo manual até um processo automatizado. No entanto surgem problemas quando a pasta de cimento e partículas de madeira são misturadas. Partícula de madeira contém extrativos vegetais, solúveis em água, que são conhecidos inibidores da cura do cimento, e assim, o uso de procedimentos para eliminar, minimizar, desativar ou isolar tais extrativos é necessário para adequar a compatibilidade cimento-madeira. Também devido à grande variedade de espécies vegetais, as condições de processamento precisam ser adequadas conforme a madeira utilizada. No presente trabalho foi investigado a compatibilidade entre cimento e partículas de *Ficus sp* - *Moraceae* - (PAPARAUBA) que é comumente empregada em construção no Maranhão. Foram investigados dois tipos de cimentos, três tipos de aditivos e três tipos de soluções de tratamento para as partículas de madeira, totalizando 36 (trinta e seis) condições investigadas, só de calor de hidratação, e suas relações com propriedades mecânicas e térmicas. Foi demonstrado que a madeira de *Ficus sp* - *Moraceae* pode ser uma fonte alternativa para produção de compósitos cimento-madeira. Foi também mostrado que a resistência a compressão desse compósito não pode ser diretamente relacionado ao índice de inibição. Foram obtidos compósitos usando traços de 1:0,66 e 1:1, sendo este último traço, a maior quantidade percentual de madeira obtida em tais compósitos, traço este, que não foi encontrado na literatura. O compósito obtido, por suas características de acabamento superficial e baixa condutividade térmica possui

potencial não apenas para aplicação em painéis para construção de moradias, mas também para aplicações em placas para revestimento estético e/ou térmico, aplicações em movelaria, entre outras.

Palavras-chave: Compósitos. Cimento. Madeira. Painéis. Placas. Paparauba.

WOOD-CEMENT COMPOSITES: DETERMINATION OF PARAMETERS FOR PROCESSING

ABSTRACT

Composite materials consisting of dispersed wooden particles embedded in a cement matrix have attracted lot of attention as available alternative for recycling wood wastes and therefore preserving the natural forests. The use of panels made from these composites is already a reality in many countries due to its particular properties such as high mechanical resistance, low heat conductivity, low specific weight, raised resistance to aggressive environments, raised resistance to the attack of insects and the fungi, and low inflammability, so on. In addition these materials can be produced in a wide variety of process, varying from a total handmade process till a full automatic production. However there are problems when cement paste and wood particles are mixed together. Wood particles contain vegetable extractives liquors, water soluble, which are well known inhibitor of the cement set, and the use of procedures to eliminate, minimize or deactivate them are needed to improve the cement-wood compatibility. Also due to the large variety of existing vegetal species, adequacy of the processing conditions should be realized according to the vegetal specie of the used wood. In the present work we investigated the cement-wood compatibility of the *Ficus* sp - Moraceae - (PAPARAUBA) which is a wood often found in building wastes in Maranhão state. We have investigated two types of cements, three types of additives and three types of inorganic aqueous solutions for treatment of the wood particles, totalizing 36 different conditions and its relations to compression strength and thermal conductivity. It has been shown that the *Ficus* sp - Moraceae wood may be an alternative source for producing wood-cement composite. It has been shown that the compression strength of this composites is not directly related to the inhibitory index. Composites were obtained using mix proportions 1:0,66 and 1:1, being the later the highest wood content in cement-wood composite that we have citation,

which show adequate mechanical behavior. Finally it has been observed that use of chemical solution and additives containing the same quantity of the cations caused approximately the same effect and in this way, for environmental reasons, it should be preferable to use the additives direct in the cement paste, which produce no solution waste which will require to be disposable after usage.

Key-words: Composite. Cement. Wood. Panels. Slabs. Paparauba.

PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DESTA DISSERTAÇÃO

Politi, F. S.; Rivas, J. M.; Verde, F. H. S. Compósitos Cimento-Madeira: Efeito do Tratamento Químico de Partículas de Ficus sp – Moraceae (Paparuba) no Calor de Hidratação. **I ENCONTRO NORTE-NORDESTE DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS E II ENCONTRO MARANHENSE DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS (II-EMCEM)**, São Luis-MA, Junho/2007.

Verde, F. H. S.; Rivas, J. M.; Politi, F. S. Development of Cement-wood Composites using Ficus SP – Moraceae wood. **VI Encontro da SBPMat**, Natal-RN, Novembro/2007.

Politi, F. S.; Verde, F. H. S. Cement-wood Composites: Effect of Chemical Treatment of Wood Particles And use of Cement Additives in Heat of Hidration and Mechanical Properties. **IV International Conference on Science and Technology of Composite Materials. COMAT**, Rio de Janeiro-RJ, December/2007.

Politi, F. S.; Silva Jr., A. C.; Silva, L. E. M.; Verde, F. H. S. Influência das Condições de Processamento nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimento-Madeira. **18^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS - CBECiMat**, Porto de Galinhas-PE, Novembro/2008.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DESTA DISSERTAÇÃO	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Histórico	3
2.2 Compósito	3
2.3 Aglomerantes Inorgânicos	4
2.4 Hidratação do Cimento Portland	7
2.5 Partículas Vegetais	10
2.6 Compatibilidade cimento-madeira	12
2.7 Determinação do calor de hidratação	18
2.8 Processo de produção do compósito	19
2.9 Aplicação do compósito	22
2.10 Medidas de condutividade	24

2.10.1 Método do Fio Quente	25
2.10.1.1 Fundamentação teórica do método do fio quente	26
2.10.1.2 Técnica do Fio quente Paralelo	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 Partículas Vegetais	33
3.1.2 Cimento Portland	33
3.1.3 Aditivos Químicos	33
3.1.4 Água	34
3.2 MÉTODOS	34
3.2.1 Análise granulométrica das partículas de madeira	34
3.2.2 Teor de umidade das partículas de madeira	35
3.2.3 Absorção de água das partículas de madeira	35
3.2.4 Teste de calor de hidratação	36
3.2.5 Determinação dos parâmetros de processamento	43
3.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova	44
3.2.7 Ensaios de caracterização do compósito	47
3.2.7.1 Ensaio de resistência à compressão axial	47
3.2.7.2 Ensaio de resistência à flexão	48
3.2.7.3 Ensaio de absorção de água dos corpos de prova	48
3.2.7.4 Ensaio para determinação da condutividade térmica	49

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Análise granulométrica das partículas de madeira	53
4.2 Teor de umidade das partículas de madeira	55
4.3 Absorção de água das partículas de madeira	55
4.4 Construção do Sistema para Medidas do Calor de Hidratação	56
4.5 Calor de hidratação	57
4.6 Parâmetros de processamento	73
4.7 Massa específica aparente	76
4.8 Resistência à compressão axial	77
4.9 Resistência à flexão	85
4.10 Absorção de água dos corpos de prova	87
4.11 Condutividade térmica	89
5 CONCLUSÕES	93
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
7 REFERÊNCIAS.....	99
APÊNDICE A Ensaio de peneiramento	107
APÊNDICE B Ensaio de absorção de água das partículas vegetais	109
APÊNDICE C Determinação de parâmetros de processamento	111
APÊNDICE D Ensaio de resistência à compressão	113
APÊNDICE E Ensaio de resistência à flexão	115
APÊNDICE F Ensaio de absorção de água dos corpos de prova	117
APÊNDICE G Absorção de água das partículas de madeira	119
APÊNDICE H Gráficos dos ensaios de resistência à compressão	121

APÊNDICE I Absorção de água dos corpos de prova	133
APÊNDICE J Valores brutos dos ensaios de condutividade térmica .	141
APÊNDICE K Graficos dos ensaios de condutividade térmica	143

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificação para cimentos	6
Tabela 2.2	Abreviações para os óxidos e compostos do clínquer do cimento	7
Tabela 2.3	Entalpia de hidratação dos compostos do clínquer do cimento	8
Tabela 2.4	Classificação de espécies vegetais a partir do índice de inibição	19
Tabela 3.1	Condições de mistura avaliadas no ensaio de calor de hidratação	39
Tabela 3.2	Condições e quantidades de material empregado no ensaio de calor de hidratação	40
Tabela 4.1	Análise granulométrica aplicada sobre as partículas utilizadas para os testes de calor de hidratação	53
Tabela 4.2	Análise granulométrica aplicada sobre as partículas utilizadas para a confecção dos corpos de prova	54
Tabela 4.3	Teor de umidade das partículas de madeira	55
Tabela 4.4	Dados de temperatura, tempo de hidratação e índice de inibição para as condições estudadas	57

Tabela 4.5	Massa específica aparente média para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm ² , nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II	76
Tabela 4.6	Massa específica aparente média para corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm ² , nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II	77
Tabela 4.7	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm ² , no traço 1:0,66 e com cimento CP IV	78
Tabela 4.8	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm ² , no traço 1:0,66 e com cimento CP II	79
Tabela 4.9	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm ² , no traço 1:1 e com cimento CP IV	82
Tabela 4.10	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm ² , no traço 1:1 e com cimento CP II	83
Tabela 4.11	Resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66 e com cimento CP IV	85
Tabela 4.12	Resistência à flexão para corpos de prova no traço 1:0,66 e com cimento CP II	86
Tabela 4.13	Resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:1 e com cimentos CP IV e CP II	86

Tabela 4.14	Valores médios de condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico para corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm ² , nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II	90
Tabela G1	Absorção de água das partículas de madeira	119
Tabela I1	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₁ / CP IV / 1:0,66)	133
Tabela I2	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₃ / CP IV / 1:0,66)	134
Tabela I3	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₃ A ₁ / CP IV / 1:0,66)	135
Tabela I4	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₁ / CP II / 1:0,66)	136
Tabela I5	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₃ / CP II / 1:0,66)	137
Tabela I6	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₃ A ₁ / CP II / 1:0,66)	138
Tabela I7	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₁ / CP II / 1:1)	139
Tabela I8	Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA ₁ A ₃ / CP II / 1:1)	140

Tabela J1	Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico de corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm ² , nos traços 1:1 e com cimentos CP IV e CP II. Valores em negrito são a média e desvio padrão	141
Tabela J2	Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico de corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm ² , nos traços 1,5:1 e com cimentos CP IV e CP II. Valores em negrito são a média e desvio padrão	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Formas na qual a madeira é frequentemente encontrada	11
Figura 2.2	Curva típica de hidratação do cimento Portland	13
Figura 2.3	Processo de produção manual do compósito cimento- madeira	20
Figura 2.4	Processo de produção automatizado do compósito cimento- madeira	20
Figura 2.5	Algumas das várias aplicações do compósito cimento- madeira	23
Figura 2.6	Arranjo dos corpos de prova utilizados no ensaio de condutividade térmica	29
Figura 2.7	Perfil de temperatura desenvolvido durante um ensaio de condutividade térmica pelo método do fio quente	30
Figura 3.1	Sistema digital de aquisição de dados utilizado para coleta dos dados de calor de hidratação	37
Figura 3.2	Diagrama esquemático dos calorímetros utilizados para o ensaio de calor de hidratação	38
Figura 3.3	Etapas do processo de moldagem e cura dos corpos de prova	46
Figura 3.4	Arranjo utilizado para execução do ensaio de condutividade térmica	50

Figura 4.1	Absorção de água pelas partículas vegetais	55
Figura 4.2	Evolução do calor de hidratação para os cimentos CP IV e CP II	59
Figura 4.3	Efeito da presença de areia e partículas de madeira no comportamento de hidratação dos cimentos CP IV e CP II	60
Figura 4.4	Efeito da presença de tratamentos químicos com solução de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II	61
Figura 4.5	Efeito da presença de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II	62
Figura 4.6	Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A_1 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II	64
Figura 4.7	Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II	64

Figura 4.8	Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II	65
Figura 4.9	Efeito da presença de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 -água, para os cimentos CP IV e CP II	66
Figura 4.10	Efeito da presença de aditivos químicos A_1 e A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_2 -água, para os cimentos CP IV e CP II	66
Figura 4.11	Efeito da presença de aditivos químicos A_1 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_3 -água, para os cimentos CP IV e CP II	67
Figura 4.12	Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_1 , para os cimentos CP IV e CP II	68
Figura 4.13	Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 e A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_2 , para os cimentos CP IV e CP II	69

Figura 4.14	Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_3 , para os cimentos CP IV e CP II	69
Figura 4.15	Efeito do tipo de aditivo sobre a hidratação de misturas cimento-madeira-água, quando se utiliza dosagem que forneça quantidades equivalentes de cátions e ânions	70
Figura 4.16	Efeito de quantidades equivalentes de cátions fornecido tanto pelo uso direto de aditivo químico quanto pelo uso de soluções aquosas de tratamentos das partículas de madeira	71
Figura 4.17	Efeito da saturação das partículas de madeira em misturas cimento-madeira-água mais aditivo	72
Figura 4.18	Aspecto visual de algumas peças produzidas nos testes iniciais	75
Figura 4.19	Resistência à compressão para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm^2 , nas condições: a -(CM / CP II / 1:0,66); b -(CMTA ₃ A ₁ / CP IV / 1:0,66); c -(CMTA ₃ A ₃ / CP IV / 1:0,66); d -(CMTA ₃ / CP II / 1:0,66); e -(CMA ₃ / CP II / 1:0.66); f -(CMTA ₃ A ₃ / CP II / 1:0.66)	81
Figura 4.20	Resistência à compressão para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm^2 , nas condições: a -(CMTA ₃ A ₁ / CP IV / 1:1); b -(CMTA ₃ A ₃ / CP IV / 1:1); c -(CMTA ₃ A ₁ / CP II / 1:1); d -(CMTA ₃ A ₃ / CP II / 1:1)	84

Figura 4.21	Absorção de água de corpos de prova confeccionados nos traços 1:0,66 e 1:1	87
Figura 4.22	Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm ² , nas condições: a -(CMA ₁ / CP IV / 1:0,66); b -(CMA ₁ / CP II / 1:0,66); c -(CMTA ₁ A ₁ / CP II / 1:0,66); d -(CMA ₁ / CP IV / 1:1); e -(CMTA ₁ A ₁ / CP II / 1:1); f -(CMTA ₃ A ₃ / CP II / 1:1)	92
Figura A1	Processo de produção e classificação das partículas de madeira	118
Figura B1	Etapas do ensaio de absorção de água das partículas de madeira	119
Figura C1	Peças produzidas nos testes iniciais, que serviram para determinação dos parâmetros de processamento do compósito produzido nesta pesquisa	120
Figura D1	Rompimento de corpos de prova em compressão	121
Figura E1	Rompimento de corpos de prova em flexão	122
Figura F1	Etapas do ensaio de absorção de água dos corpos de prova	123
Figura H1	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP IV, traço 1:0,66, nas condições CMTA ₁ A ₁ (esquerda) e CMTA ₁ A ₃ (direita)	124

Figura H2	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP IV, traço 1:0,66, nas condições CMTA ₃ A ₁ (esquerda) e CMTA ₃ A ₃ (direita)	125
Figura H3	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CM (esquerda) e CMTA ₁ (direita)	126
Figura H4	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA ₃ (esquerda) e CMA ₁ (direita)	127
Figura H5	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMA ₃ (esquerda) e CMTA ₁ A ₁ (direita)	128
Figura H6	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA ₁ A ₃ (esquerda) e CMTA ₃ A ₁ (direita)	129
Figura H7	Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm ² , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA ₃ A ₃ (esquerda) e cimento CP IV, traço 1:1, condição CMTA ₁ A ₁ (direita)	130

- Figura H8 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₃ (esquerda) e CMTA₃A₁ (direita) 131
- Figura H9 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:1, na condição CMTA₁A₃ (esquerda) e cimento CP II, traço 1:1, na condição CMTA₁A₁ (direita) 132
- Figura H10 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₃ (esquerda) e CMTA₃A₁ (direita) 133
- Figura H11 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, na condição CMTA₃A₃ 134
- Figura K1 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:0,66, na condição CMA₁ (esquerda) e cimento CP II, traço 1:0,66, na condição CMA₁ (direita) 135
- Figura K2 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², na condição (CMA₁ / CP IV / 1:1) 136

- Figura K3 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMA₁ (esquerda) e CMA₃ (direita) 137
- Figura K4 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₁(esquerda) e CM TA₃A₃ (direita) 138

SIMBOLOS E ABREVIATURAS

α	Difusividade térmica
AA_p	Absorção de água das partículas de madeira
AA	Absorção de água dos corpos de prova
Al_2O_3	Alumina (A)
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	Cloreto de alumínio
A_1	Aditivo cloreto de cálcio
A_2	Aditivo cloreto de alumínio
A_3	Aditivo cloreto de ferro
$^{\circ}C$	Grau Celsius (unidade de temperatura)
c	Calor específico
C	Cimento
CAREIA	Cimento-areia-água
CM	Cimento-madeira-água
CMA_1	Cimento-madeira-água mais aditivo A_1
CMA_2	Cimento-madeira-água mais aditivo A_2
CMA_3	Cimento-madeira-água mais aditivo A_3
$CMTA_1$	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 - água
$CMTA_1A_1$	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 - água mais aditivo A_1
$CMTA_1A_2$	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 - água mais aditivo A_2
$CMTA_1A_3$	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 - água mais aditivo A_3

CMTA_2	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_2
CMTA_2A_1	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_2 - água mais aditivo A_1
CMTA_2A_2	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_2 - água mais aditivo A_2
CMTA_2A_3	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_2 - água mais aditivo A_3
CMTA_3	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_3
CMTA_3A_1	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_3 - água mais aditivo A_1
CMTA_3A_2	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_3 - água mais aditivo A_2
CMTA_3A_3	Cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_3 - água mais aditivo A_3
CMA_{11}	Cimento-madeira-água mais aditivo A_1 , com quantidades de ânions (Cl) equivalentes às condições CMA_1 , CMA_2 e CMA_3 .
CM_sA_1	Cimento-madeira saturada de água-água mais aditivo A_1 .
C_2AH_8	Aluminato de cálcio hidratado
C_3AH_6	Aluminato de cálcio hidratado
C_4AH_9	Aluminato de cálcio hidratado
$\text{C}_4\text{A}\underline{\text{S}}\text{H}_{12}$	Monosulfato
$\text{C}_6\text{A}\underline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$	Etringita
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cloreto de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio (calcário)
CaO	Óxido de cálcio ou cal (C)
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio hidratado ($\text{C}\underline{\text{S}}\text{H}_2$)

CSH	Silicato de cálcio hidratado
-Ei	Função exponencial integral
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (F)
FeCl ₃ 6H ₂ O	Cloreto de ferro
g	Grama
h _u	Teor de umidade
h	Hora
H ₂ O	Água
I	Índice de inibição da cura do cimento
J/kgK	Joule por quilograma Kelvin (unidade de calor específico)
k	Condutividade térmica
K ₂ O	Óxido de potássio (Álcalis)
Min	Minuto
mm	Milímetro
m _a	massa final da amostra após saturação em água
m _f	Massa final da amostra após saturação em água
m _i	Massa inicial da amostra após secagem em estufa
m _n	Massa inicial da amostra no estado natural
m _s	Massa final da amostra após secagem à temperatura de 90 °C
m _u	Massa inicial da amostra com umidade natural
MPa	Megapascal (unidade de tensão)
MEA	Massa específica aparente

xxx

MgO	Óxido de magnésio (M)
MOR	Módulo de ruptura
Na ₂ O	Óxido de sódio (Álcalis)
q'	Densidade linear de potência
r	Distância radial a partir do fio quente até o termopar
R	Coeficiente de correlação
$S'_2 = \Delta T' / \Delta t'$	Máximo incremento de temperatura da curva Tempo x Temperatura, para mistura cimento-água
$S_2 = \Delta T / \Delta t$	Máximo incremento de temperatura da curva Tempo x Temperatura, para mistura cimento-madeira-água
SiO ₂	Sílica (S)
SnCl ₂	Cloreto de estanho
SO ₄	Sulfato (<u>S</u>)
T _{max}	Temperatura máxima atingida para mistura cimento-madeira-água
t _{max}	Tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura cimento-madeira-água
T' _{max}	Temperatura máxima atingida para mistura cimento-água
t' _{max}	Tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura cimento-água
ΔT	Variação de temperatura
Δt	Variação de tempo
W/mK	Watt por metro kelvin (unidade de condutividade térmica)
ρ	Densidade do material
γ	Constante de EULER.

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico ($\beta\text{C}_2\text{S}$)
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico (C_3S)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio (CH)
$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Silicato tricálcico hidratado ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$)
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico (C_3A)
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)

1 INTRODUÇÃO

Resíduos da indústria madeireira e da agricultura são produzidos, em maior ou menor volume, em todas as regiões do país, e a crescente produção desses resíduos exige pronta utilização.

O uso desses resíduos, como fonte alternativa de fibras lignocelulosicas para obtenção de materiais compósitos ligados por cimento inorgânico têm despertado grande interesse por ser uma alternativa viável para reciclar resíduos de madeira, resíduos da agricultura etc, além de favorecer a preservação de matas nativas.

A quantidade de pesquisas sobre tais compósitos é crescente em nível mundial, como já mencionado, pela necessidade do aproveitamento de tais resíduos, porém no Brasil estas pesquisas ainda são relativamente reduzidas quando comparadas com países da Europa e América do norte.

Pesquisas utilizando resíduos de madeira, casca de arroz, palha de trigo, soja dentre outras matérias-primas, têm sido reportadas como alternativa para o desenvolvimento de tais compósitos [1]. Do ponto de vista ambiental, a utilização desses resíduos seria benéfica, pois evitaria a queima destes ou ainda a sua deposição em locais inadequados, contribuindo desta forma para a minimização dos possíveis impactos ambientais.

Em alguns países europeus bem como nos EUA, existem grandes aplicações desses compósitos na construção de moradias, em blocos para construção, material de acabamento, construções rurais entre outras [1]. Essas aplicações são devidas, a esses materiais apresentarem boas propriedades tais como: adequada resistência mecânica, vedação térmica, absorção e vedação acústica, baixo peso, boa durabilidade, resistência ao fogo, resistência em ambientes agressivos, a ataque de insetos e ao mofo.

Porém, existem dificuldades de combinarmos espécies vegetais com cimento (compatibilidade cimento-madeira), uma vez que estas contêm extrativos que inibem as reações de pega (endurecimento) do cimento [2], sendo que esta compatibilidade (cimento-madeira) é significativamente afetada pela espécie vegetal empregada, na produção dos painéis [3], sendo desta

forma, necessário a utilização de procedimentos para minimizar tais efeitos inibitórios.

Sendo assim, a limitação ao uso de uma determinada espécie vegetal em tais compósitos está relacionada à minimização ou eliminação dos extrativos contidos nestas espécies.

Para tanto, tratamentos têm sido propostos [4], visando eliminar ou minimizar os efeitos inibidores das substâncias químicas presentes nas espécies a serem utilizadas, melhorando com isto a compatibilidade cimento-madeira, entre os quais podemos citar: a adição de aditivos aceleradores da pega do cimento, tratamento das partículas vegetais em solução aquosa, lavagem das partículas etc.

Uma forma para se avaliar a compatibilidade cimento-madeira, bem como avaliar a ação de aditivos ou tratamentos nas partículas de madeira, sobre a reação de pega do cimento, é o monitoramento do calor liberado durante o processo de hidratação do cimento, ou como comumente chamado, medidas do calor de hidratação, donde pode-se obter parâmetros tais como o tempo para atingir a temperatura máxima, a temperatura máxima propriamente dita, índice de inibição [5], índice de compatibilidade, entre outros.

Cabe ressaltar que devido à grande variedade de espécies vegetais existentes, adequações ao processamento destes compósitos são necessárias conforme o tipo de material empregado, visando melhorar a compatibilidade cimento-madeira.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral, (Avaliar o potencial de utilização de partículas de *Ficus sp* – *Moraceae* (Paparauba) em compósitos cimento-madeira); E como objetivos específicos, (Construir um sistema para medida de calor de hidratação para avaliar a compatibilidade cimento-madeira de paparauba, Determinar parâmetros de processamento para produção de compósitos cimento-madeira de paparauba, Desenvolver um material de construção que agregue qualidades tais como: baixo custo de produção, resistência mecânica compatível ao uso, boa vedação térmica, resistência ao fogo etc., Construir um sistema para medida de condutividade térmica para materiais de baixa condutividade térmica).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

Placas produzidas a partir da mistura, gesso e lã madeira-água, foram em 1880 patenteadas na Alemanha. Em 1910 substituiu-se o gesso pela magnesita, e a produção destas placas (patenteadas em 1908) iniciou-se na Áustria [6].

O Cimento Portland foi introduzido no final de 1920, e tem sido o ligante hidráulico mais comum atualmente, daí o porquê das placas serem comumente chamadas de: placas de cimento-lã de madeira, na Europa, e na América do Norte, Cement Excelsior Board (CEB) [6].

A técnica para se produzir placas desse material, sobretudo ligadas com cimento, e também com magnesita, se difundiu rapidamente da Áustria e da Alemanha para outros países Europeus e para a América do Norte [6].

A primeira placa de lã de madeira ligada com cimento foi produzida manualmente em uma pequena planta. O equipamento foi limitado a uma máquina para produzir as lãs (fibras), e um misturador. A manufatura tornou-se mais e mais mecanizada com o passar dos anos, com capacidade de produção significativamente maior. Modernas fábricas são normalmente totalmente mecanizadas, e aproximadamente 15 pessoas podem produzir acima de 150 m³ de placas por dia. Atualmente existe produção na África, Ásia, América latina, além da Europa e América do Norte [6].

2.2 Compósito

A palavra compósito refere-se à mistura de dois ou mais componentes, para se obter um material com propriedades que não se encontram nos constituintes da mistura, de forma isolada. Podem ser obtidos a partir de uma matriz reforçada com fibras. A maioria dos materiais compósitos consiste numa mistura de um material de reforço ou de enchimento,

devidamente selecionado, com um material compatível que serve de ligante (ou matriz), de modo a obtermos determinadas características e propriedades [7]. Geralmente os componentes não se dissolvem uns nos outros e podem ser fisicamente identificados pelas interfaces que os separam.

Existem muitos tipos de compósitos. Um grande número deles é do tipo fibroso (formados por fibras no seio de uma matriz) ou de partículas (formados por partículas no seio de uma matriz). Existem também muitas combinações diferentes de reforço e de matrizes [7].

Muitos fatores devem ser considerados quando projetamos um compósito reforçado por fibras (ou partículas), incluindo, o comprimento, diâmetro, largura, orientação, quantidade, e propriedade das fibras (ou partículas), a propriedade da matriz e a ligação entre a fibra (ou partícula) e a matriz [8].

Para o compósito cimento-madeira, estes fatores são ainda mais determinantes, visto que não tem sido reportada uma boa compatibilidade entre cimento e espécies vegetais. Daí a necessidade de se conhecer alguns parâmetros de processamento a fim de fornecermos subsídios tecnológicos para a produção de materiais com características físico-mecânicas aptas ao emprego destes compósitos como material de construção alternativo.

2.3 Aglomerantes Inorgânicos

Aglomerante é um material ligante, em geral pulverulento, que promove a união entre os grãos do material inerte (agregado) [9]. Dentre os mais variados tipos de aglomerantes, temos o cimento Portland, que é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água [10].

O cimento Portland resulta da moagem de um material, produzido a partir do cozimento (aquecimento) de uma mistura moída e homogeneizada de calcário e argila, denominado clínquer, ao qual são adicionados:

- Gesso - tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do cimento quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% em peso para 97% de clínquer, em massa.
- Escória de alto forno - são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Antigamente, as escórias de alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas possuem propriedades hidráulicas, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.
- Pozolanas - são rochas vulcânicas ou matérias inorgânicas fossilizadas encontradas na natureza, como certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550 °C a 900 °C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas (sílica fume, sílica coloidal), entre outros. Da mesma forma que no caso da escória de alto-forno, pesquisas levaram à descoberta de que os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também apresentam propriedades hidráulicas, se bem que de forma distinta. Isto porque não basta adicionar os materiais pozolânicos, sob forma de pó muito fino, em presença de água, para que estes passem a desenvolver as reações

químicas que os tornam primeiramente pastosos e depois endurecidos. A reação só vai ocorrer se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença de mais um outro material. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana.

O cimento portland apresenta-se com uma diversidade de designações, dependendo de sua composição química. A Tabela 2.1 apresenta algumas designações do cimento portland. Nesta representação as letras E, F e Z designam escória de alto forno, filler e pozolana respectivamente.

Tabela 2.1 Especificação para cimentos [10].

Nome técnico	Sigla	Classe	Identificação tipo e classe	Clínquer + Gesso	Escória	Pozolana	Carbonato
Cimento Portland Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	CPII-E-25 CPII-E-32 CPII-E-40	94- 56	6 -34	0	0 - 10
Cimento Portland Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	CPII-Z-25 CPII-Z-32 CPII-Z-40	94- 76	0	6 - 14	0 - 10
Cimento Portland Composto com Filler	CPII-F	25, 32, 40	CPII-F-25 CPII-F-32 CPII-F-40	94- 90	0	0	6 - 10
Cimento Portland Pozolânico	CPIV	25, 32	CPIV-25 CPIV-32	85-45	0	15 - 50	0 - 5
Cimento Portland de alta resistência Inicial	CPV-ARI		CPV-ARI	100-95	-	-	0-5

Uma nomenclatura particular aos profissionais ligados ao cimento expressa os óxidos e compostos do clínquer, através das abreviações mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Abreviações para os óxidos e compostos do clínquer do cimento.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta\text{C}_2\text{S}$
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
SO_4	<u>S</u>	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

2.4 Hidratação do Cimento Portland

A hidratação do cimento Portland é o processo que ocorre quando o cimento Portland entra em contato com a água, ocasionando uma seqüência de reações que é responsável pelas propriedades mecânicas do cimento endurecido.

As reações de hidratação são exotérmicas, ou seja, liberam calor. Cada componente do cimento gera diferentes taxas de evolução de calor. O calor total liberado pode ser influenciado por alguns fatores, especialmente pela finura e composição do cimento. A Tabela 2.3, apresenta a quantidade de calor desenvolvido pelas principais fases que compõem o cimento portland.

Com a introdução da água, os componentes do cimento começam a se hidratar. Os produtos formados em sua maioria são os silicatos de cálcio hidratados cristalinos e géis de CSH, que por sua vez começam a formar a matriz coesiva ou um esqueleto microestrutural. O desenvolvimento dessa microestrutura ocorre pelo aumento progressivo do número de hidratos

formados dentro do esqueleto poroso. À medida que se desenvolvem mais CSH a mistura ganha resistência [11].

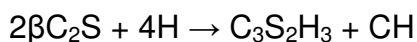
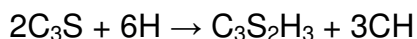
Tabela 2.3 Entalpia de hidratação dos compostos do clínquer do cimento [11].

Fase inicial	Produto da reação	Entalpia da hidratação completa (KJ/mol)
$C_3S + (H)$	$CSH + CH$	-118
$\beta C_2S + (H)$	$CSH + CH$	- 45
$C_3A + (CH + H)$	C_4AH_{19}	-314
$C_3A + H)$	C_3AH_6	- 245
$C_3A + (CSH_2 + H)$	$C_4AS\bar{H}_{12}$ (monossulfato)	- 309
$C_3A + (CSH_2 + H)$	$C_6AS_3H_{32}$ (etringita)	- 452
$C_4AF + (CH + H)$	$C_3(AF)H_6$	- 203

Imediatamente após a introdução da água na mistura de cimento, um pequeno período de intensa atividade química ocorre. Esta atividade química corresponde à dissolução dos íons, reação da água com o C_3A , formando semi-hidratos cristalinos do tipo C_3AH_6 , C_4AH_9 , C_2AH_8 e etringita. Após este período ocorre o período de dormência ou de indução, caracterizado por uma curta ausência de atividade química, provocada pela formação de uma camada protetora ao redor da superfície das partículas de cimento, sendo que a mistura se mantém plástica neste período [11].

Ao entrar em contato com água, o C_3S e o βC_2S produzem silicatos de cálcio hidratado cristalino e géis de composição variável (CSH), com estruturas similares, mas com variações significativas quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada. Tendo em vista que é a estrutura do composto que irá determinar a sua propriedade, as variações entre os teores de cálcio/sílica e de água, terão pequeno efeito sobre as características físicas do C_3S e do βC_2S [11].

As reações estequiométricas para a hidratação completa dos silicatos presentes em uma pasta de cimento podem ser representadas por:

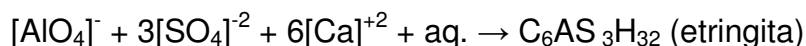


Cálculos estequiométricos concluem que a hidratação do C_3S produz 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de hidróxido de cálcio (portlandita) em peso, enquanto que a hidratação do C_2S gera 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de hidróxido de cálcio em peso.

A reação do C_3A com água é imediata. Rapidamente ocorre a formação de hidratos cristalinos, tais como C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_8 . Ocorre ainda liberação de uma grande quantidade de calor. Esta reação instantânea causa perda de trabalhabilidade da mistura, tornando-a imprópria para uso. Para retardar este efeito de perda de plasticidade da mistura, adiciona-se pequena quantidade de gipsita [11].

Os produtos formados pela hidratação do C_3A e do C_4AF são estruturalmente semelhantes, portanto as discussões aqui apresentadas são válidas para ambos os compostos. Em geral a reatividade do C_4AF é mais lenta que a do C_3A , mas ela aumenta com o aumento do teor de alumina e diminuição de temperatura resultante da reação de hidratação [11].

A gipsita reage com C_3A formando um mineral chamado etringita ($C_6AS_3H_{32}$). A etringita apresenta uma morfologia em forma de pequenas agulhas prismáticas na superfície do C_3A , formando assim uma barreira que reduz a velocidade de hidratação do aluminato tricálcico. Mais tarde ela se transforma em monosulfoaluminato de cálcio hidratado (monosulfato). As reações químicas relativas a estas reações são:



Normalmente a etringita é o primeiro hidrato a cristalizar, devido à elevada relação sulfato/aluminato no início da hidratação. Pode-se dizer que a

etringita contribui para o enrijecimento, para a pega e desenvolvimento da resistência inicial [11].

Quando a concentração de sulfatos na mistura diminui e ocorre um aumento do teor de aluminatos devido à renovação da hidratação do C_3A e do C_4AF , a etringita torna-se instável e é gradativamente convertida em monossulfato, que é o produto final da hidratação destes compostos. A reação química destes compostos é dada abaixo:



2.5 Partículas Vegetais

De acordo com citações na literatura [12], na expressão partícula vegetal, a palavra partícula designa um termo genérico para todos os elementos lignocelulósicos com os quais são feitas as chapas de aglomerado, podendo estas ser diferenciadas de acordo com: a dimensão, a densidade, e o formato. A expressão “FLAKE” refere-se a uma partícula plana, fina, com espessura entre 0,2 e 0,4 mm, comprimento de 25 a 100 mm e largura entre 10 e 25 mm. A expressão “SHAVINGS” (aparas) designa partículas finas de madeira, produzidas em algumas operações de trabalho, que permitem a obtenção de chapas de resistência, rigidez e estabilidade dimensional linear inferiores às das chapas produzidas com “FLAKES”. “CHIPS” (lascas, cavacos) são pedaços de madeira, de tamanho variável de 12 a 25 mm de comprimento por 1 a 5 mm de largura, e espessura um pouco menor. “EXCELSIOR” (palha ou lã de madeira), usada na fabricação de chapas de madeira com cimento Portland, são partículas longas e finas (até 25,4 mm de comprimento) com aproximadamente 5 mm de largura, normalmente obtidas de madeiras de baixa densidade (principalmente as do gênero Pinus), utilizadas para fins estruturais.

Estas partículas geram chapas que são frequentemente divididas em 3 categorias quanto a sua densidade: baixa densidade ($0,58 \text{ g/cm}^3$); média densidade ($0,58 \text{ a } 0,79 \text{ g/cm}^3$) e alta densidade (acima de $0,79 \text{ g/cm}^3$) [12].

A Figura 2.1 ilustra alguns dos tipos de partículas de madeira citados, além de algumas formas que as madeiras podem ser encontradas.



Figura 2.1 Formas na qual a madeira é frequentemente encontrada [13].

Do ponto de vista da análise dos componentes constituintes da madeira, os principais compostos macromoleculares presentes na parede celular são: celulose, polioses (hemiceluloses), e lignina, que estão presentes em todas as madeiras. Junto com os componentes da parede celular existem numerosas substâncias que são chamadas de materiais acidentais ou estranhos da madeira, no caso os extrativos e substâncias minerais. Cabe ressaltar que a composição e quantidade relativa dos extrativos dependem de diversos fatores, como espécie, idade e região de procedência, perfazendo aproximadamente de 3 - 10% da madeira seca [14].

Estes extrativos são conhecidos inibidores da pega (endurecimento) normal e do desenvolvimento das propriedades de resistência da matriz cimento [15].

2.6 Compatibilidade cimento-madeira

A expressão compatibilidade quando aplicada na área de pesquisa em compósitos cimento-madeira, refere-se ao grau de cura após a mistura do cimento com água e uma dada madeira na forma fragmentada. Em geral se o processo químico de endurecimento (pega) do cimento não é significativamente afetado pela presença das partículas de madeira, é dito que esse cimento e essa madeira são compatíveis. Por outro lado, se a pega do cimento é prejudicada pela presença das partículas de madeira, então é dito que eles são incompatíveis. Esse fenômeno de interação entre partículas de madeira e cimento (compatibilidade) é comumente expresso pela diminuição das propriedades físicas dos compósitos cimento-madeira, chegando em alguns casos a propiciar amostras sem integridade física [5].

Dentre alguns métodos utilizados para avaliar a compatibilidade cimento-madeira, a evolução da temperatura de hidratação tem sido recentemente considerado como um dos métodos mais adequados e versáteis, permitindo gerar índices que avaliam de forma quantitativa tal compatibilidade, fato este evidenciado em várias pesquisas [5,17,18]. Nestes ensaios é medida a evolução do calor liberado durante a hidratação da pasta cimentícia contendo partículas de madeira e então é feita a comparação com a evolução térmica do calor de hidratação da mistura cimento e água.

Nestas medidas, comumente chamadas de calor de hidratação, como observado na literatura [5], pode-se retirar vários parâmetros, os quais estão descritos a seguir.

A Figura 2.2, mostra de forma esquemática uma curva típica de hidratação do cimento Portland com alguns parâmetros.

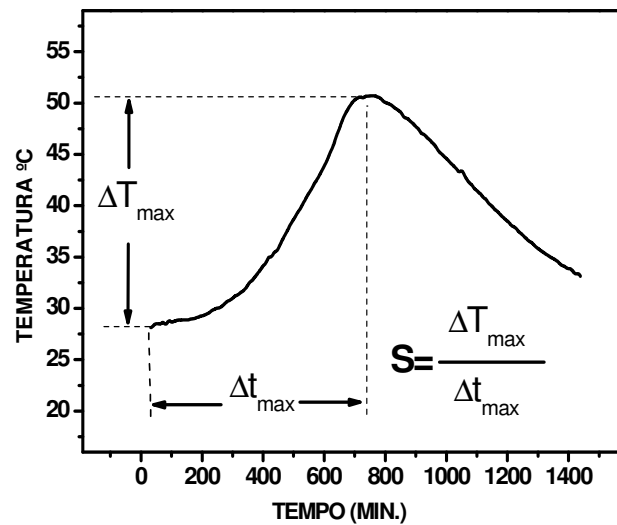


Figura 2.2 Curva típica de hidratação do cimento Portland.

Parâmetros retirados das medidas de calor de hidratação:

- Temperatura máxima atingida, ou temperatura de pico, aqui designada por ($T_{\max}$);
- Tempo necessário para atingir a temperatura máxima ($t_{\max}$);
- A taxa de hidratação (S , $^{\circ}\text{C/h}$), que expressa a taxa na qual a temperatura aumenta durante a hidratação do cimento;
- O fator C_A , proposto por Moslemi, que é definido como a razão da quantidade de calor liberado na mistura cimento-madeira-água, e o calor liberado na pasta cimentícia contendo apenas cimento e água;
- O índice de Inibição I proposto por Hofstrand em 1984 que é matematicamente definido como:

$$I = 100 \left\{ \left(\frac{t_{\max} - t'_{\max}}{t'_{\max}} \right) * \left(\frac{T'_{\max} - T_{\max}}{T'_{\max}} \right) * \left(\frac{S' - S}{S'} \right) \right\}$$

(2.1)

onde:

- I - índice de inibição da cura do cimento (%);
- t_{max} - tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura cimento- madeira-água (h);
- t'_{max} - tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura cimento-água (h);
- T'_{max} - temperatura máxima atingida para mistura cimento-água (°C);
- T_{max} - temperatura máxima atingida para mistura cimento-madeira-água (°C);
- S' - $\Delta T/\Delta t'$ - máximo incremento de temperatura na curva tempo x temperatura, para mistura cimento-água (°C/h);
- S - $\Delta T/\Delta t$ - máximo incremento de temperatura da curva tempo x temperatura, para mistura cimento-madeira-água (°C/h);

- O índice proposto por Tarkow, que considera apenas os valores de t_{max} e que é matematicamente expresso por:

$$I = \left(\frac{t_{max} - t'_{max}}{t'_{max}} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Um dos parâmetros que afeta a compatibilidade cimento-madeira, é a espécie vegetal empregada. Comportamentos distintos foram observados quando através de medidas de calor de hidratação foi avaliada a compatibilidade de espécies vegetais combinadas com cimento Portland. Tal fato indicou que poderia estar havendo interferência de teores de extrativos diferenciados em cada uma das espécies vegetais empregadas [18].

Além da espécie vegetal, o tipo de cimento, o tratamento das espécies vegetais empregadas, época de corte, condições de estocagem da madeira, entre outras, afetam o comportamento do compósito cimento-madeira [19].

Dentre os vários métodos utilizados para eliminar ou minimizar os efeitos dos elementos inibidores, melhorando desta forma a compatibilidade cimento-madeira, estão:

1. Utilização de aditivos aceleradores da pega do cimento;

A ação aceleradora dos aditivos, bem como a ação inibidora dos extrativos vegetais, sobre a hidratação de misturas cimentícias contendo fibras vegetais ainda não está bem esclarecida.

O retardamento da pega do cimento pelos inibidores constituintes da madeira é provocado pela formação de uma membrana impermeável que envolve as partículas do cimento, fazendo com que a hidratação dos grãos de cimento seja rapidamente interrompida [20].

Os aditivos aceleradores promovem uma ação sobre a dissolução dos constituintes anidros, e uma pequena ação sobre a cristalização dos compostos hidratados [11]. Sendo a pasta de cimento constituída de ânions (silicatos e aluminatos) e cátions (cálcio), o aditivo acelerador promove a dissolução destes, sendo que com uma grande quantidade de ânions na mistura, o acelerador promove a dissolução dos íons que têm menor velocidade de dissolução durante o período inicial (os silicatos), acelerando desta forma a hidratação.

Vários pesquisadores reportam pesquisas sobre a ação de aditivos em misturas cimento-madeira [19,21,22,23]. Um estudo mais detalhado sobre a ação de aditivos em misturas cimento-madeira está descrito na literatura [24], sendo que foram investigadas a influência de 137 aditivos inorgânicos na hidratação de misturas cimento-madeira.

Alguns compostos exibem pouca ou nenhuma ação aceleradora na hidratação do cimento puro, mas quando usado em misturas contendo madeira causam um aumento em $T_{\max}$ [24]. Uma possível explicação para tal fato é que estes compostos atuam de modo a desativar a ação inibitória dos extrativos vegetais, sem, no entanto, apresentarem ação aceleradora na pasta cimentícia. Formação de complexos organo-metálicos (quelatos) entre os cátions livres e

os sítios reativos nos polifenóis das partículas de madeira pode contribuir para neutralizar os inibitórios permitindo a reação de hidratação do cimento acontecer.

2. Lavagem das partículas vegetais em água ou solução aquosa;

O uso de lavagens em água, água quente, ou soluções salinas aquosas tem sido reportado por vários pesquisadores [25,26]. A lavagem permite eliminar certa quantidade de extrativos presentes nas fibras vegetais. A eficiência do método depende do pH da solução, da temperatura e tempo de extração, dentre outros.

A literatura [27] reporta que o uso de lavagens em água fria por 60 minutos foi suficiente para tornar a madeira *L. secundi.orum* compatível com o cimento portland, e que o uso de água quente em tais lavagens não causou efeito significativo sobre a compatibilidade desta madeira na pasta cimentícia.

O uso de lavagens em soluções alcalinas visa propiciar uma ação lixiviante mais intensa nas partículas de madeiras, pois a pasta cimentícia fresca é altamente alcalina (pH=11) e sua alcalinidade aumenta com o tempo conforme o CaOH é produzido. Isto tem um efeito lixiviante (leaching) na madeira e faz com que ela libere mais extrativos do que apenas os extrativos vegetais solúveis em água que seriam liberados [5].

3. Tratamento das partículas vegetais;

O tratamento difere dos processos de lavagem, pois no primeiro espera-se apenas uma ação que facilite a extração dos compostos inibitórios, enquanto que nos tratamentos espera-se a formação de uma fina camada sobre as partículas. Tem-se reportado o uso tanto de tratamentos a base de compostos poliméricos [28] como também de compostos inorgânicos [24,29].

O emprego do tratamento das partículas vegetais em solução de silicato de sódio causou uma melhora na ligação entre as partículas de madeira e a pasta de cimento [25,30]. Esta melhora foi atribuída devido ao

desenvolvimento de agulhas de etringita na superfície das partículas de madeira e nas proximidades das superfícies da matriz cimentícia [30]. Através de tratamentos químicos foi possível obter uma região de transição entre as fibras e o cimento, com uma relação Ca/Si que favorecia aderência das fibras nas matrizes cimentícias [31]. É também comum, o uso de tratamentos das partículas de madeira de forma a proteger a fibra pela formação de um filme impermeável ou ao menos hidrofóbico, diminuindo assim o contato destas com a umidade [31].

4. Injeção de CO_2 (dióxido de carbono) durante a prensagem dos painéis para acelerar a cura etc;

A carbonatação é um fenômeno químico que ocorre naturalmente na superfície de concretos, e prossegue durante anos. Ao longo da reação de carbonatação, o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que tem origem na hidratação do cimento, e que se encontra nos poros do concreto, combina-se com gás carbônico do ar atmosférico (CO_2), na razão de 0,03 a 0,05% em volume, para formar carbonato de cálcio (CaCO_3), insolúvel em água, que se deposita nos poros do concreto, fechando-os. A água liberada na reação $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ pode, em condições excepcionais, não evaporar e dissolver hidróxido de cálcio da pasta do cimento, e a reação ter continuidade [32].

A carbonatação em concretos tem um efeito muito favorável, pois torna o concreto (argamassa) mais compacto, aumenta sua resistência e impermeabilidade, uma vez que a superfície carbonatada forma uma proteção natural contra a penetração de gases e líquidos [32].

A magnitude na mudança das propriedades (densidade, resistência, deformação etc.) em concreto carbonatado, é proporcional ao conteúdo de cimento no material. Sendo que a influência da carbonatação é observada não somente no aumento das propriedades, mas também na forma do diagrama tensão-deformação [33].

Em compósitos cimento-madeira, foi verificado que a carbonatação proporcionou melhora no comportamento do compósito, além de que o

desenvolvimento da resistência destes compósitos ocorreu após poucos minutos de injeção de CO_2 , fato este que poderia permitir a desmoldagem do compósito em poucos minutos ao invés de várias horas, o que é comum quando os compósitos endurecem por processo de hidratação normal [34,35].

Cabe ressaltar, que a reação de carbonatação no concreto e no compósito cimento-madeira ocorre de forma similar. É importante ainda mencionar, que a carbonatação natural de concretos é diferente da carbonatação de compósitos cimento-madeira, no que diz respeito ao tempo de duração, sendo que esta última é controlada artificialmente, para promover uma redução no tempo de manufatura dos painéis.

2.7 Determinação do calor de hidratação

Calor de hidratação é a quantidade de calor liberado por unidade de massa de cimento durante a sua reação com água e é expresso em joule por grama de cimento [36]. A sua determinação pode ser feita por dois métodos:

1. Determinação do calor de hidratação através da medida do calor de dissolução do cimento.
2. Calorímetro semi-adiabático utilizando-se a garrafa de Langavant.

Esta pesquisa descreve sucintamente o procedimento que utiliza a garrafa de Langavant, conforme a norma NBR 12006/90 [36]. Neste método utiliza-se um container envolto por material isolante, do tipo algodão ou fibra mineral, o qual encontra-se inserido dentro de um outro container também constituído de material isolante. Este container possui uma tampa também de material isolante, que possui um furo o qual permite a introdução de um termopar para registro da temperatura. O monitoramento da temperatura é realizado através de um sistema digital de aquisição de dados via microcomputador.

A evolução temporal do calor de hidratação permite a criação de um

índice que quantifica o efeito inibidor da espécie vegetal na pega do cimento. Tal índice leva em consideração tanto a máxima temperatura de hidratação obtida bem como o tempo necessário para se atingir esta temperatura máxima. O objetivo deste índice é avaliar a compatibilidade da biomassa vegetal com o cimento. Desta forma as várias espécies vegetais podem ser classificadas de acordo com o índice de inibição, como descrito na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Classificação de espécies vegetais a partir do índice de inibição [22,23].

ÍNDICE DE INIBIÇÃO (%)	CLASSIFICAÇÃO
$I < 10$	Baixa inibição
$I = 10 \text{ a } 50$	Moderada inibição
$I = 50 \text{ a } 100$	Alta inibição
$I > 100$	Extrema inibição

A expressão matemática que expressa o índice de inibição da pega do cimento, como já mencionado, é expressa pela Equação 2.1 [18,22,23].

2.8 Processo de produção do compósito

Os compósitos cimento-madeira podem ser produzidos tanto por processo manual, como também, por processo automatizado dependendo apenas da quantidade de recursos financeiros disponíveis para sua implementação. Como exemplo, podemos citar a produção deste tipo de compósito nas Filipinas, utilizando trabalho manual, os quais são utilizados para produção de casas de baixo custo. Já no Japão este tipo de compósito é produzido em plantas automatizadas, e sua utilização é para produção de

casas modulares de alto custo. As Figuras 2.3 e 2.4 mostram os processos manual e automatizado respectivamente.



Figura 2.3 Processo de produção manual do compósito cimento-madeira [37].

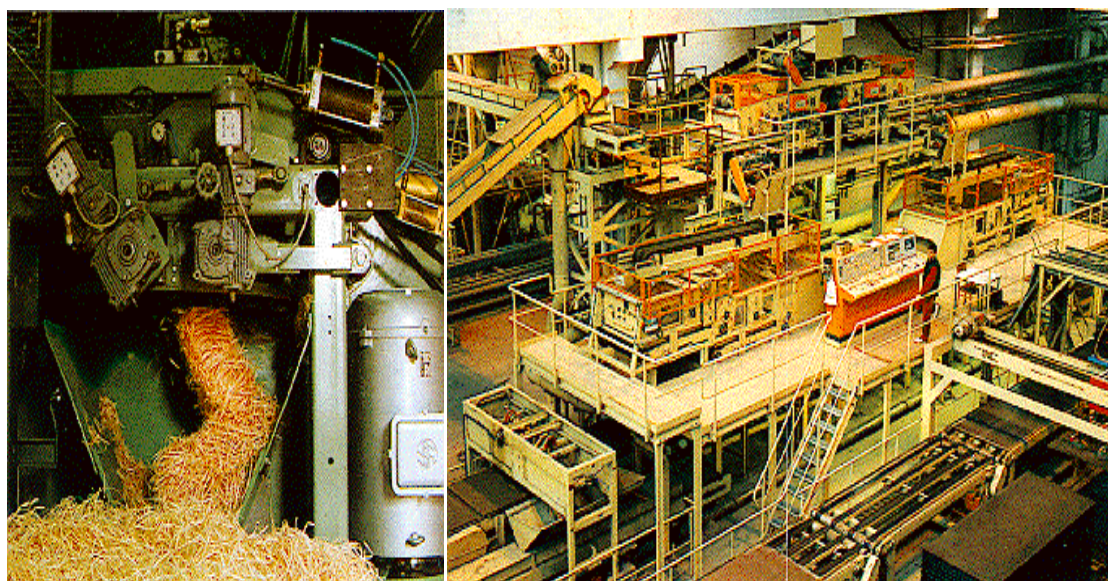


Figura 2.4 Processo de produção automatizado do compósito cimento-madeira [acervo do autor].

Para a produção desse material (compósitos cimento-madeira), observa-se na literatura [12,15,16,17,18,19,21,22,23,25,26,34,38,39], que os

traços (cimento:madeira) frequentemente utilizados para a produção destes estão na faixa que vai de: 1:0,5 a 1:0,25, ou seja, a quantidade de cimento é de 2 (duas) a 4 (quatro) vezes a quantidade de partículas de madeira. Observa-se ainda, que a mudança na proporção cimento-madeira, bem como o tipo de cimento empregado influencia diretamente as propriedades do compósito.

Em linhas gerais, ainda, com relação à proporção cimento-madeira, a literatura [39] reporta que quando a porcentagem de partículas de madeira aumenta, o valor da densidade decresce, além de causar também uma redução da condutividade térmica, redução da resistência à compressão, e módulo de elasticidade. Em consequência da redução da densidade, a deformabilidade aumenta, a resistência mecânica decresce.

O aumento da deformabilidade com o aumento do conteúdo de agregado de madeira ocorre devido à natureza das fibras de madeira, as quais permitem acomodar a deformação e promover boa aderência a matriz [39].

O decréscimo da condutividade térmica e resistência mecânica, com o aumento do conteúdo de madeira, está ligado ao aumento na porosidade conferida pela madeira, e a baixa condutividade térmica da madeira [39].

Este compósito (cimento-madeira) pode ser moldado com ou sem a aplicação de pressão. O uso de pressão leva a placas com maior densidade e provavelmente uma menor porosidade. Com relação ao uso de pressão, sempre que possível deve-se preferir o uso de pesos sobre os moldes, ao invés do uso de prensas, pois durante o processo inicial ocorre uma certa densificação, o que ocasiona uma certa redução da pressão de moldagem. Já com a aplicação de pressão pelo uso de pesos sobre a tampa do molde, a pressão permanece constante durante todo o tempo de cura.

Um ponto importante no processamento das placas é trabalhar com a madeira saturada ou parcialmente saturada com água. Isto é devido ao fato de que as fibras vegetais têm grande capacidade para absorver água, e quando estas não estão encharcadas, elas irão absorver a água de hidratação do cimento, alterando assim a relação água cimento. Tal fato vem recebendo pouca atenção dos pesquisadores, tendo sido encontrado apenas uma referencia que menciona este fato [30].

Outro ponto importante é trabalhar com fibras com granulometria controlada, pois a quantidade de pasta cimentícia necessária para envolver as partículas de madeira depende da área específica das fibras de madeira [40].

2.9 Aplicação do compósito

Compósito cimento-madeira na forma de placas é uma alternativa para a chamada construção seca (*"Dry Wall"*). É muito versátil e de larga utilização no mundo todo, em aplicações diversas [41] como: alvenaria de vedação, divisórias, forro, isolamento ou tratamento termo-acústico de ambientes, paredes, lajes, proteção contra fogo, calor, etc. Tais aplicações são devido as suas excelente propriedades tais como: Imputrescível, Incombustível, Elevado Isolamento Térmico e Acústico, Elevada Absorção Acústica, Resistente ao Ataque de Cupins, Baixa Dilatação Térmica, Resistente à Compressão e Flexão etc.

Suas propriedades são dificilmente igualadas ou encontradas com a mesma simultaneidade em outros materiais alternativos. Porém, é importante mencionar que em algumas aplicações, problemas surgiram devido à instabilidade dimensional deste compósito, principalmente em ambientes úmidos. Esta instabilidade [42], é atribuída ao efeito combinado de 3 (três) principais fatores: reações de umidade, reações de carbonatação e a degradação do compósito. O primeiro é resultado do fluxo de umidade no compósito, o segundo resulta da conseqüente indução de tensão entre as partículas de madeira e a pasta de cimento durante o molhagem e secagem do material, já o terceiro é inerente à alcalinidade da pasta do cimento que resulta em um ambiente agressivo para as partículas de madeira, resultando na degradação destas, e conseqüentemente do compósito.

Cabe ainda mencionar que soluções têm sido propostas para minimizar este problema. Entre estas, está o tratamento das fibras de madeira. Pesquisadores observaram uma melhora no comportamento dimensional deste compósito quando as fibras de madeira utilizadas foram tratadas [43,44].

A Figura 2.5 mostra algumas das aplicações onde o compósito cimento-madeira tem obtido sucesso.



Figura 2.5 Algumas das várias aplicações do compósito cimento-madeira [41].

2.10 Medidas de condutividade

Do Ponto de vista técnico, existe três importantes propriedades físicas dos materiais: a difusividade térmica, a condutividade térmica e o calor específico.

Estas propriedades regem os problemas de condução de calor em regime permanente e não-permanente. Existe uma correlação entre estas três propriedades dadas pela Equação 2.3:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad 2.3$$

onde:

α - difusividade térmica (m^2 / s)

k - condutividade térmica (W / mK)

ρ - densidade (Kg / m^3)

c - calor específico ($J / Kg \cdot K$)

A difusividade térmica é uma medida da rapidez com que ocorrem variações de temperatura no interior de uma massa. A medida da difusividade térmica consiste, essencialmente, na determinação da relação entre o tempo e o diferencial de temperatura entre o interior e a superfície de um corpo de prova, inicialmente a uma mesma temperatura, quando se varia a temperatura na superfície.

A densidade é a massa de um corpo por unidade de volume unitário, sendo facilmente mensurável.

O calor específico expressa a quantidade de calorias necessárias para elevar em um grau a temperatura de um grama de material. O calor específico pode ser medido com facilidade quando se trata de uma amostra pequena. Entretanto, quando se trata de um material cerâmico, o qual é

formado por várias fases, inclusive a porosa, já não é mais possível a preparação de uma amostra pequena que seja representativa, conseqüentemente, a medida desta propriedade torna-se mais problemática.

A condutividade térmica de um material pode ser descrita como sendo a taxa em que calor é trocado através de uma área unitária do material, quando sujeita a um gradiente de temperatura unitário. Matematicamente é expressa pela Equação 2.4:

$$k = \frac{\frac{Q}{t \cdot A}}{\frac{dT}{dx}} \quad (2.4)$$

onde :

- Q - quantidade de calor trocado no tempo t através de uma área A do material, sendo esta área medida perpendicularmente à direção em que se dá a troca de calor;
- dT / dx - gradiente de temperatura, isto é, a variação de temperatura com a distância, na direção do fluxo de calor.

Atualmente são conhecidos vários métodos para a determinação da condutividade térmica de um material, dentre os quais o método do fio quente é um método amplamente utilizado para a determinação da condutividade térmica dos materiais.

2.10.1 Método do Fio Quente

Esta técnica experimental é um método direto, absoluto e não estacionário, com a qual é possível medir condutividades térmicas até aproximadamente o valor de 25 W/mK.

Para uma formulação matemática do método, o fio quente é assumido ser uma fonte de calor ideal (massa = 0, e portanto capacidade

térmica = 0), infinitamente longa e fina (diâmetro = 0), a qual é circundada até o infinito pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar. Ao passar uma corrente elétrica constante através do fio, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pelo fio e vai se propagar através do material. Essa propagação de calor num meio infinito gera, no material, um campo transiente de temperaturas. A condutividade térmica é então determinada a partir da medida da elevação da temperatura em um ponto $p(x, y, z)$ do material, a uma distância r do fio quente. Na prática, a fonte teórica linear é aproximada por uma resistência elétrica fina, e o sólido infinito é substituído por uma amostra finita. Assim sendo, a capacidade térmica do fio, a resistência de contato entre ele e a amostra, e o tamanho finito da amostra são fatores que impõem um tempo mínimo e um tempo máximo a serem utilizados no cálculo da condutividade térmica.

O método do fio quente possui algumas variações. O modelo teórico é o mesmo, sendo que a diferença básica entre essas variações está no procedimento de medida da temperatura.

2.10.1.1 Fundamentação teórica do método do fio quente

Se um material é isotrópico, a condutividade térmica é a mesma em qualquer direção. A temperatura T , no instante t e no ponto $p(x, y, z)$, num sólido infinito, devido a uma quantidade de calor q que é instantaneamente gerada no tempo $t = 0$ no ponto $p(x', y', z')$, é dada pela Equação 2.5.

$$T = \frac{q}{8\rho c(\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha t}\right\} \quad (2.5)$$

onde:

ρ - densidade (kg/m^3);

c - calor específico (J/kgK);

α - $k/\rho c$ - difusividade térmica;

Para uma fonte linear instantânea de calor, se uma quantidade de calor $q'dz$ é instantaneamente gerada no instante $t = 0$, em todos os pontos sobre uma linha infinita paralela ao eixo z , e passando pelo ponto (x', y') , a temperatura no ponto (x, y) no instante t é obtida substituindo-se q na Equação 2.5 por $q'dz$, e integrando em relação a z , chegaremos a Equação 2.6, sendo q' a quantidade de calor gerada por unidade de comprimento da fonte.

$$T = \frac{q'}{4\pi kt} \exp \left\{ -\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{4\alpha t} \right\} \quad (2.6)$$

Se uma fonte gera calor a partir do instante $t = 0$, a uma taxa $q'(t)$ por unidade de tempo e por unidade de comprimento de uma linha paralela ao eixo z passando pelo ponto (x', y') , a temperatura no ponto (x, y) no instante t é obtida substituindo-se q' na Equação 2.6 por $q'(t)dt$ e integrando em relação a t , chegaremos a Equação 2.7, onde: $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$, e q' é a quantidade de calor gerada por unidade de comprimento da fonte.

$$T = \frac{q'}{4\pi k} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q'}{4\pi k} \left[-Ei \left(-\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right] \quad (2.7)$$

Na Equação 2.7, a função $-Ei(-x)$, chamada função exponencial integral é definida pela Equação 2.8.

$$- Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (2.8)$$

e pode ser aproximada pela seguinte série de potências como em 2.9, onde $\gamma = 0,5772156649...$ é a constante de Euler.

$$- Ei(-x) = Ei(x) = -\gamma - \ln x - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n * n!} \quad (2.9)$$

Na técnica de fio quente paralelo a condutividade térmica é calculada pela Equação 2.7, a qual é descrita na Equação 2.10.

$$T = \frac{-q'}{4\pi k} Ei\left(-\frac{\rho c r^2}{4kt}\right) \quad (2.10)$$

onde:

k - condutividade térmica (W/mK);

q' - densidade linear de potência (W/m);

T - excesso de temperatura em relação à temperatura inicial de referência (K);

ρ - densidade do material (kg/m³);

c - calor específico (J/kgK);

r - distância radial a partir do fio quente até o termopar (m);

t - tempo, contado a partir do início da liberação de calor (s);

$-Ei$ - função exponencial integral;

2.10.1.2 Técnica do Fio quente Paralelo

Nesta técnica são utilizadas duas amostras, com uma delas contendo duas ranhuras paralelas para receber o fio quente e o fio do termopar. Pela ranhura central passa o fio quente e pela outra localizada a uma distância r do fio quente passa o termopar. As superfícies destas amostras devem ser polidas e cuidados adicionais devem ser adotados a fim de proporcionar um perfeito contato térmico dos fios com o material das amostras a serem medidas. Um sistema de aquisição e processamento de dados totalmente automatizado é utilizado para a coleta dos dados. O transiente de temperatura detectado pelo termopar é processado em um microcomputador, via uma placa de aquisição de dados digital.

As Figuras, 2.6 e 2.7 ilustram respectivamente, o arranjo experimental dos corpos de prova e um transiente de temperatura.

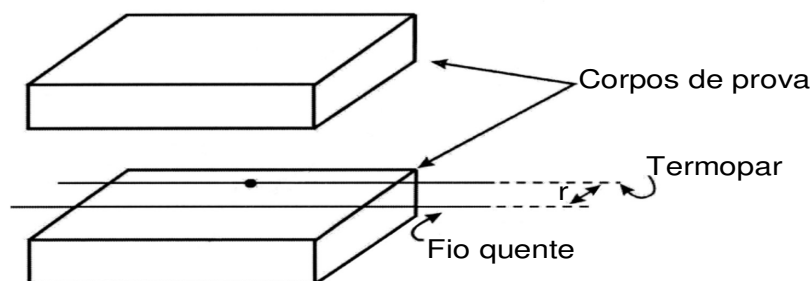


Figura 2.6 Arranjo dos corpos de prova utilizados no ensaio de condutividade térmica [45].

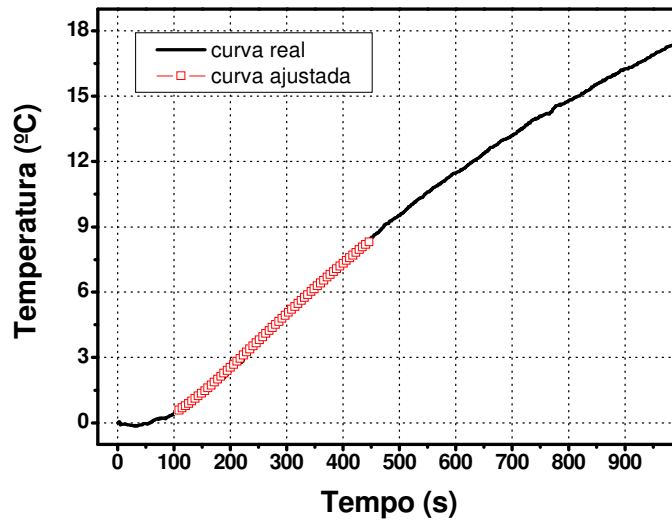


Figura 2.7 Perfil de temperatura desenvolvido durante um ensaio de condutividade térmica pelo método do fio quente.

Quando se utiliza a técnica do fio quente paralelo, a condutividade térmica do material é dada, como já mencionado, pela Equação 2.10, ou seja:

$$k = \frac{-q'}{4\pi T(t)} Ei\left(-\frac{\rho c r^2}{4kt}\right) \quad (2.11)$$

A obtenção do valor da condutividade, k , a partir da Equação 2.11 não é trivial, pois k aparece tanto dentro da integral exponencial como também do lado esquerdo da igualdade. A norma DIN 51046 - parte 2, que normalizou esta técnica de medida, utiliza para determinação da condutividade térmica, um procedimento de cálculo que podemos chamar de convencional, no qual a condutividade térmica é determinada a partir da Equação 2.11, como se segue.

Num instante t qualquer, a temperatura, a uma distancia r do fio quente é dada por:

$$T(t) = \frac{-q'}{4\pi k} Ei\left(-\frac{\rho cr^2}{4kt}\right) \quad (2.12)$$

No instante $2t$, a temperatura no mesmo ponto será dada por:

$$T(2t) = \frac{-q'}{4\pi k} Ei\left(-\frac{\rho cr^2}{8kt}\right) \quad (2.13)$$

Dividindo-se as Equações 2.12 e 2.13 membro a membro obtém-se:

$$\frac{T(2t)}{T(t)} = \frac{Ei\left(-\frac{x}{2}\right)}{Ei(-x)} \quad (2.14)$$

onde:

$$x = \frac{\rho cr^2}{4kt} \quad (2.15)$$

Desta forma, conhecendo-se a densidade (ρ), o calor específico da amostra (c), pode-se determinar numericamente o valor de x , tal que a Equação 2.14 seja satisfeita dentro de uma determinada precisão pré-estabelecida.

Assim, a condutividade térmica é calculada sempre de dois em dois pontos. O resultado final é obtido fazendo-se, uma média aritmética dos valores encontrados para diversos t . O intervalo de tempo considerado para o cálculo dessa média aritmética é aquele onde as condutividades térmicas obtidas com a Equação 2.8 são mais ou menos constantes.

Um outro método, o qual será utilizado nesta pesquisa, determina a condutividade térmica por um método numérico de regressão não linear. Este método, que requer apenas o conhecimento prévio do valor de densidade do material, consiste em ajustar simultaneamente, os valores de condutividade térmica (k) e calor específico (c) do material estudado, de modo a se obter a melhor aproximação possível do transiente térmico obtido experimentalmente, com a curva proposta pelo modelo teórico, expressa pela Equação 2.12. Este procedimento, proposto na literatura [46], é mais preciso do que o chamado convencional, pois permite que o cálculo leve em consideração a informação contida em todo o transiente térmico, e não apenas em alguns pontos. Este método é iterativo, de modo que uma aproximação inicial de alguns parâmetros é necessária.

Além disso, como este método proporciona que sejam determinadas simultaneamente a condutividade térmica e o calor específico do material analisado, pode-se ainda obter de forma indireta, através da Equação 2.3, o valor de difusividade térmica, possibilitando assim a determinação dos principais parâmetros térmicos de um material, ou seja, a condutividade, o calor específico e a difusividade térmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Partículas Vegetais

Utilizou-se partículas de madeira produzidas especialmente para este fim a partir de chapas de madeiras de *Ficus sp - Moraceae* (paparauba), com medidas de 1x0,3x0,02 metros aproximadamente. Estas chapas foram plainadas em uma plaina mecânica da marcenaria do CEFET-MA, gerando partículas com dimensões variadas, as quais foram submetidas a um processo de peneiramento manual para separá-las por tamanho.

3.1.2 Cimento Portland

Os cimentos empregados foram o CP II Z 32 RS e o CP IV 32 RS da Nassau, de fabricação recente, a fim de se evitar problemas associados ao envelhecimento destes durante sua estocagem. Estes foram acondicionados em sacos plásticos, também para evitar uma possível hidratação parcial durante sua estocagem no CEFET-MA.

3.1.3 Aditivos Químicos

Os aditivos químicos utilizados foram o cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o cloreto de alumínio ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e o cloreto de ferro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), aqui designados por A₁, A₂ e A₃ respectivamente, que serviram como aceleradores de pega do cimento e também para o tratamento das partículas vegetais.

3.1.4 Água

Utilizou-se sempre água potável disponibilizada pela CAEMA (Companhia de água e esgoto do Maranhão).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Análise granulométrica das partículas de madeira

A análise granulométrica das partículas foi realizada de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A classificação foi feita de acordo com a NBR 7217 [47].

De mão das partículas, estas foram submetidas ao processo de peneiramento manual, através de dois jogos de peneiras, uma para partículas vegetais a serem utilizadas nos ensaios de calor de hidratação e outro para as partículas a serem usadas para confecção de corpos de prova nos demais ensaios (compressão axial, flexão em 3 pontos, absorção de água, condutividade térmica). As séries de peneiras utilizadas foram: (2,00 mm; 1,40 mm; 1,19 mm; 1,00 mm; 0,84 mm; 0,71 mm; 0,59 mm; 0,50 mm; 0,30 mm) e (2,80 mm; 2,38 mm; 2,00 mm; 1,68 mm; 1,40 mm) para os ensaios de calor de hidratação e demais ensaios, respectivamente.

As características granulométricas das partículas de madeira a serem utilizadas nos ensaios de calor de hidratação, foram determinadas a partir de uma amostra de 400 g de partículas, retirada aleatoriamente, onde partículas retidas na peneira de 2,00 mm eram descartadas neste ensaio. As características granulométricas para as amostras a serem utilizadas na confecção de corpos de prova (compressão axial, flexão em 3 pontos, absorção de água, condutividade térmica), foram obtidas a partir do ensaio de peneiramento de uma amostra de 250 g de partículas, retiradas aleatoriamente, onde partículas retidas na peneira de 2,8 mm e as passantes na peneira de 1.4 mm eram descartadas.

3.2.2 Teor de umidade das partículas de madeira

A determinação do teor de umidade do material foi realizada com base na norma NBR 9939 [48]. Inicialmente, 3 (três) amostras de 100 g cada uma, de partículas de madeira que passaram na peneira de 2 mm e ficaram retidas na de 1 mm foram levadas a uma estufa com temperatura de 90 ± 5 °C durante 24 horas. Após este período, estas amostras foram pesadas, sendo que o teor de umidade foi calculado utilizando-se a Equação 3.1.

$$h_u = \left(\frac{m_n - m_s}{m_s} \right) * 100 \quad (3.1)$$

onde:

h_u - teor de umidade (%);

m_n - massa inicial da amostra no estado natural (g);

m_s - massa final da amostra após secagem à temperatura de 90 °C (g);

3.2.3 Absorção de água das partículas de madeira

Para este ensaio utilizou-se partículas de madeira com as mesmas características das utilizadas para a determinação do teor de umidade, ou seja, partículas de madeira que passaram na peneira de 2 mm e ficaram retidas na de 1 mm. A metodologia utilizada foi a descrita na NBR 9778/87 [49]. Inicialmente, tomou-se 4 amostras de 100 g de partículas vegetais cada, as quais foram imersas em um recipiente contendo 1 kg de água. A pesagem do material úmido, após imersão em água, foi realizada após intervalos de 5 min, 15 min, 45 min e 1:45 h, 2:45 h, 3:45 h, 4:45 h, 5:45 h. Após este tempo foram realizadas medidas de 24 h em 24 h até que se atingisse a saturação total em

água, ou seja, onde as massas das amostras permanecessem aproximadamente constantes em duas pesagens subseqüentes.

A absorção de água foi calculada conforme a Equação 3.2.

$$AA_p = \left(\frac{m_a - m_u}{m_u} \right) * 100 \quad (3.2)$$

onde:

AA_p - absorção de água das partículas de madeira (%);

m_u - massa inicial da amostra com umidade natural (g);

m_a - massa final da amostra após saturação em água (g);

3.2.4 Teste de calor de hidratação

Para realização deste ensaio, foi construído um sistema que consistia de calorímetros e termopares tipo K, acoplados a um sistema de aquisição de dados via microcomputador conforme Figura 3.1.

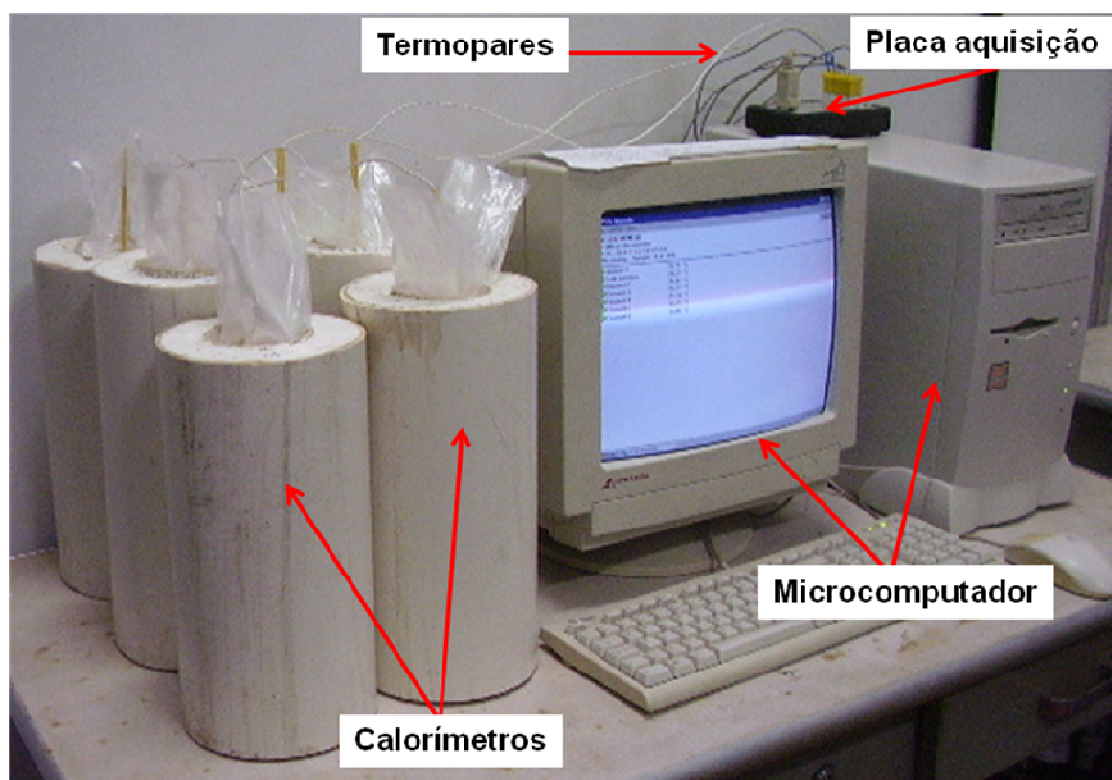


Figura 3.1 Sistema digital de aquisição de dados utilizado para coleta dos dados de calor de hidratação.

A Figura 3.2 mostra um diagrama esquemático dos calorímetros utilizados.

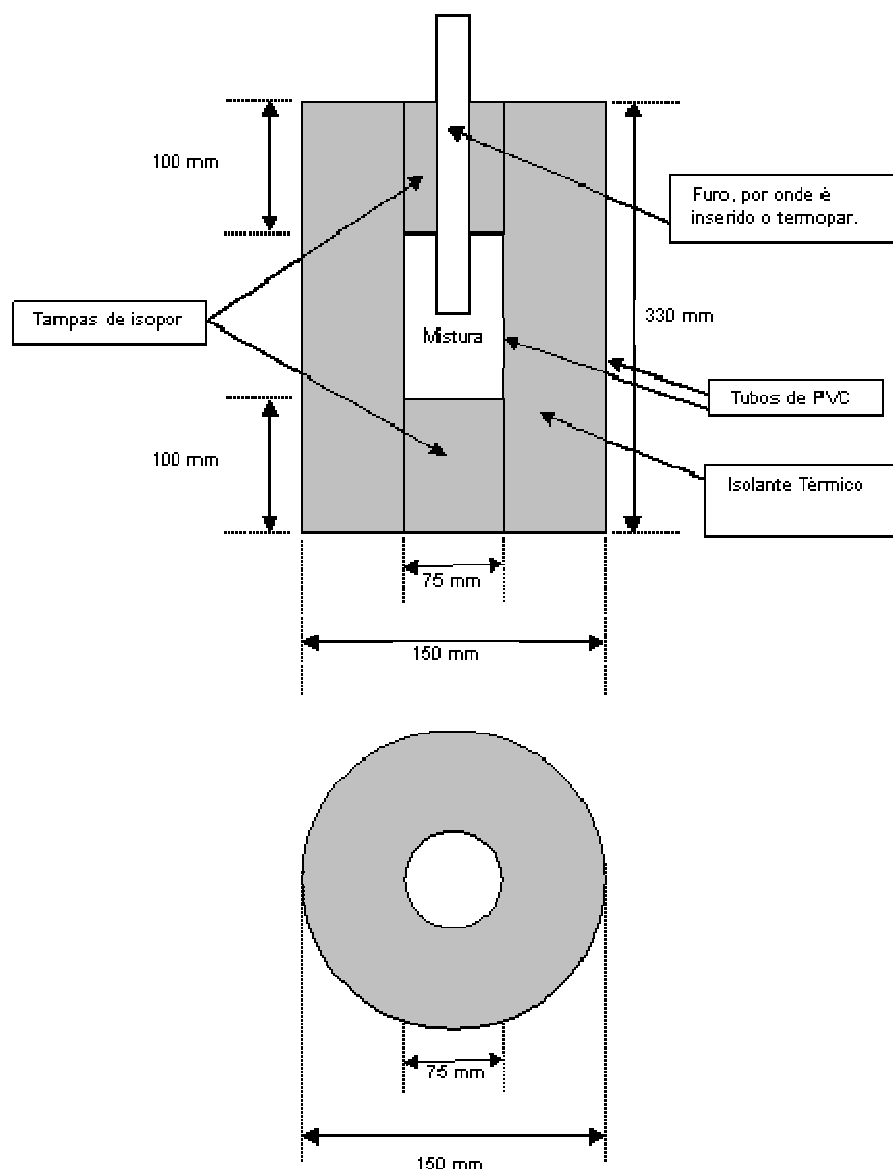


Figura 3.2 Diagrama esquemático dos calorímetros utilizados para o ensaio de calor de hidratação.

Conforme já mencionado, a Equação 2.1 foi utilizada para o cálculo do índice de inibição da cura do cimento pelas partículas de madeira.

É importante observar que foi necessário mensurar o tempo e temperatura de hidratação do cimento na ausência e na presença das partículas vegetais para se obter o índice de inibição. Para cada condição estudada foram realizadas três repetições, e os valores de temperatura de pico

($T_{\max}$) e tempo de hidratação para se atingir a temperatura de pico, ($t_{\max}$), representam os valores médios obtidos.

As medidas de temperatura foram realizadas com uma taxa de amostragem de 1 (um) ponto por minuto, durante 24 horas, totalizando 1440 pontos registrados por amostra.

Conforme previamente mencionado, as medidas de calor de hidratação foram realizadas, utilizando-se partículas de madeira que passaram na peneira de 2 mm e ficaram retidas na de 0,30 mm. Foram ensaiadas amostras em 18 (dezoito) condições, para cada tipo de cimento, totalizando 36 condições distintas avaliadas, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Condições de mistura avaliadas no ensaio de calor de hidratação.

Condição de mistura	Componentes da mistura
C	cimento-água
CAREIA	cimento-areia-água
CM	cimento-madeira-água
CMA ₁	cimento-madeira-água mais aditivo A ₁
CMA ₂	cimento-madeira-água mais aditivo A ₂
CMA ₃	cimento-madeira-água mais aditivo A ₃
CMTA ₁	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₁ -água
CMTA ₁ A ₁	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₁ -água mais aditivo A ₁
CMTA ₁ A ₂	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₁ -água mais aditivo A ₂
CMTA ₁ A ₃	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₁ -água mais aditivo A ₃
CMTA ₂	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₂ -água
CMTA ₂ A ₁	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₂ -água mais aditivo A ₁
CMTA ₂ A ₂	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₂ -água mais aditivo A ₂
CMTA ₂ A ₃	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₂ -água mais aditivo A ₃
CMTA ₃	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₃ -água
CMTA ₃ A ₁	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₃ -água mais aditivo A ₁
CMTA ₃ A ₂	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₃ -água mais aditivo A ₂
CMTA ₃ A ₃	cimento-madeira tratada com solução de aditivo A ₃ -água mais aditivo A ₃

A₁ - Aditivo cloreto de cálcio, A₂ - Aditivo cloreto de alumínio, A₃ - Aditivo cloreto de ferro.

Nestes ensaios, utilizou-se as quantidades de material sugeridas na literatura [18,22,23] com algumas variações, como mostrado na Tabela 3.2.

A mistura dos componentes nas várias condições foi feita em saco plástico, e colocada em seguida nos calorímetros, onde o tempo total para mistura desses componentes ficou em torno de 4 (quatro) minutos. Posteriormente, os calorímetros foram fechados hermeticamente com uma tampa a qual estava acoplado o instrumento de medição de temperatura (termopar).

Tabela 3.2 Condições e quantidades de material empregado no ensaio de calor de hidratação.

Materiais	Condição / Massa utilizada (g)					
	C	CAREIA	CM	CMA _n	CMTA _n	CMTA _n A _n
Cimento	200	200	200	200	200	200
Água	86	86	100	100	100	100
Areia	-	15	-	-	-	-
Madeira	-	-	15	15	-	-
Madeira tratada	-	-	-	-	18	18
Aditivo	-	-	-	8	-	8

C - cimento-água, CAREIA - cimento-areia-água, CM - cimento-madeira-água, A_n - aditivo, n - índice que representa o tipo de aditivo (1 ou 2 ou 3), CMA_n - cimento-madeira-água mais aditivo A_n, CMTA_n - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_n-água, CMTA_nA_n - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_n-água mais aditivo A_n.

Foi necessário fazer o tratamento das partículas de madeira em algumas condições. O tratamento destas partículas teve a duração de 36 horas, sendo utilizada para tal tratamento, uma solução aquosa a 5% de aditivo (em relação ao peso da água), com uma relação partícula/solução de 1/10 (em peso). Já nas condições onde foi necessário aditivo químico como acelerador, a quantidade utilizada, foi sempre 4% (em relação ao peso do cimento).

Por fim, foi avaliada a influência do uso de aditivos e/ou tratamentos com quantidades equivalentes de cátions ou ânions, para se ter uma idéia melhor a respeito de qual aditivo era o mais eficiente, e também qual elemento

(cátion ou anion) têm mais influência nas reações de hidratação do cimento. Para tanto foi necessário levantar a massa atômica de cada composto (aditivo) utilizado.

- Massa atômica dos elementos químicos:

Ca – 40,078 g / mol	Cl – 35,4527 g / mol
Fe - 55,845 g / mol	O – 15,9994 g / mol
Al – 26,98153 g / mol	H – 1,00794 g / mol

- Massa atômica dos compostos (aditivos químicos):

$$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 26,98 + (3 \times 35,45) + (6 \times 18) = 241,33 \text{ g/mol}$$

$$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 55,845 + (3 \times 35,45) + (6 \times 18) = 270,19 \text{ g/mol}$$

$$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 40,078 + (2 \times 35,45) + (2 \times 18) = 254,43 \text{ g/mol}$$

- Determinação da quantidade equivalente de aditivo:

Em 100 ml de solução de tratamento (100g) tem-se 5 g de um determinado composto (aditivo).

Em 241,33g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tem-se 1 mol de Al^{+3} , sendo assim:

- Quantos mol de Al^{+3} têm-se em 5g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

$$241,33 \text{ g de } \text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ ————— } 1 \text{ mol } \text{Al}^{+3}$$

$$5 \text{ g de } \text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ ————— } X = 20,72 \text{ E-3 mol de } \text{Al}^{+3}$$

- Quantas gramas de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ são necessárias para obter-se $20,72 \text{ E-}3 \text{ mol}$ de Fe^{+3} .

270,195g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ _____ 1 mol Fe^{+3}

X = 5,5984g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ _____ 20,72 E-3 mol de Fe^{+3}

- Quantas gramas de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ são necessários para obter-se $20,72 \text{ E-}3 \text{ mol}$ de Ca^{+2} .

254,43g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ _____ 1 mol Ca^{+2}

X = 5,28 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ _____ 20,72 E-3 mol de Ca^{+2}

A fim de comparar o uso direto de aditivos na pasta de cimento com o uso de partículas de madeira tratadas em soluções aquosas, foram avaliadas condições que continham quantidades molares equivalentes de cátions.

Considerando-se que a absorção de água (solução) pela madeira é cerca de $1,7 \times$ o peso da madeira, obteve-se a quantidade de aditivo que ficava retido na madeira como segue:

- Massa de madeira utilizada = 15 g;
- Massa de água (solução) absorvida pela madeira = $1,7 \times$ massa de madeira = 25,5 g;

Sendo assim, a quantidade de aditivo a ser utilizada diretamente na pasta de cimento para promover quantidades equivalentes às condições onde as partículas de madeira foram tratadas, foi obtida como segue:

100g de solução _____ 5g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

25,5g de solução _____ **X = 1,275g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**

100g de solução _____	5,5984g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
25,5g de solução _____	$X = 1,4275\text{g de } \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
100g de solução _____	5,28g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
25,5g de solução _____	$1,3464\text{g de } \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Sendo assim, utilizou-se: 1,275g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1,4275g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e 1,3464g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, direto na pasta de cimento, perfazendo desta forma quantidades equivalentes de cátions para que fosse possível avaliar a influência dos tratamentos com o uso direto de aditivos na pasta de cimento.

Além disso, ainda comparou-se a influência das partículas de madeira parcialmente saturadas de água (solução) com partículas secas.

3.2.5 Determinação dos parâmetros de processamento

O traço nesta pesquisa foi representado por: **c: m: a**; onde:

- c** - representa a quantidade, em massa, de Cimento Portland;
- m** - representa a quantidade, em massa, de partículas de madeira;
- a** - representa a quantidade de água em relação à quantidade de Cimento;

Os traços iniciais utilizados nesta pesquisa foram: 1:0,33 e 1:0,5 (cimento/partículas de madeira); a seqüência de mistura das matérias-primas foi: [(cimento + partículas secas) + água] com uma relação água/cimento variável. As relações água/cimento foram: 0,8 e 1,0 para o traço 1:0,33, e 1,2 para o traço 1:0,5. Posteriormente a seqüência de mistura das matérias-primas foi modificada para: [(cimento + 100% de água em relação ao peso do aglomerante) + partículas secas].

Finalmente passou-se a saturar as partículas com água antes de adicioná-las à pasta de cimento, que teve a dosagem de água reduzida para 50% (relação água/cimento igual 0,5), assumindo desta forma a seguinte seqüência de mistura: [(cimento + 50% de água em relação ao peso do cimento) + partículas saturadas com 150, 120, 100 e 80% de água].

As condições onde as partículas eram saturadas com 150, 120 e 100% de água, geravam segregação da pasta de cimento na parte inferior do molde após prensagem, além de parte desta pasta sair do molde, fatos estes que não ocorriam quando as partículas eram saturadas com 80% de água.

Desta forma, para produção dos corpos de prova ensaiados nesta pesquisa, a seqüência de mistura das matérias-primas e a relação água/cimento utilizadas foram: [(cimento + 50% de água em relação ao peso do cimento) + partículas saturadas com 80% de água ou solução]. Tais corpos de prova foram produzidos com partículas de madeira que passaram pela peneira de 2,8 mm e ficaram retidas na de 1,4 mm. Já os traços utilizados foram: 1:0,66 (60% de cimento e 40% de partículas de madeira) e 1:1 (50% de cimento e 50% de partículas de madeira) em massa. Cabe mencionar que a mistura foi homogeneizada sempre de forma manual.

Foi determinado empiricamente, para os traços utilizados, o consumo de materiais para produção de 1 (um) corpo de prova, e então passamos à etapa de moldagem.

3.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de compressão axial (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura); e das placas (300 x 100 x 15 mm e 300 x 100 x 25 mm), seguiram os procedimentos indicados na NBR 7215 [50].

Os moldes eram preenchidos gradativamente com a mistura, a qual era adensada com um soquete à medida que as camadas iam sendo despejadas nos moldes, e por fim prensando-as com carga de 4 kgf/cm² para

os corpos de prova cilíndricos usados para o ensaio de compressão, e, com a carga de 30 kgf/cm² para os corpos de prova cilíndricos usados para o ensaio de absorção de água e também para as placas. Estes corpos de prova eram desmoldados após 48 h. A cura foi feita em recinto fechado, ao ar, em temperatura ambiente.

Para cada corpo de prova cilíndrico produzido com carga de 4 kgf/cm² foi utilizado no traço 1:0,66 (80 g de cimento, 53,33 g de partículas de madeira no estado seco e 40 g de água), e no traço 1:1 (60 g de cimento, 60 g de partículas de madeira no estado seco e 30 g de água).

Já para corpos de prova cilíndricos produzidos com carga de 30 kgf/cm² utilizou-se no traço 1:0,66 (85 g de cimento, 55 g de partículas de madeira no estado seco e 45 g de água), e no traço 1:1 (63 g de cimento, 63 g de partículas de madeira no estado seco e 31,5 g de água).

Para a produção das placas utilizadas no ensaio de flexão (dimensões de 300 x 100 x 15 mm), utilizou-se no traço 1:0,66 (250 g de cimento, 170 g de partículas de madeira no estado seco e 125 g de água), e no traço 1:1 (190 g de cimento, 190 g de partículas de madeira no estado seco e 95 g de água).

Nas placas utilizadas no ensaio de condutividade térmica (dimensões de 300 x 100 x 25 mm), utilizou-se no traço 1:0,66 (480 g de cimento, 320 g de partículas de madeira no estado seco e 240 g de água), e no traço 1:1 (360 g de cimento, 360 g de partículas de madeira no estado seco e 180 g de água).

Obs: Como pode ser visto na Figura 3.3, fez-se uma adaptação (prolongamento) nos moldes (cilíndricos) devido à necessidade de prensagem da mistura (cimento – água – partículas de madeira). Tal procedimento foi necessário porque os moldes têm apenas 100mm de altura. Foi também necessário fazer o grampeamento dos moldes com a mistura prensada, pois após prensagem era necessário retirar os moldes prensados da prensa. Tal procedimento manteve a carga de prensagem durante o processo de cura. Também foi necessário revestir com plástico os moldes retangulares para facilitar a desmoldagem.



Figura 3.3 Etapas do processo de moldagem e cura dos corpos de prova.

3.2.7 Ensaios de caracterização do compósito

Para a realização dos ensaios de compressão axial foram moldados quatro corpos de prova (cp) cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada condição investigada, utilizando-se uma carga de 4kgf/cm².

Para o ensaio de flexão, para as condições ensaiadas, foram moldadas placas, medindo 300 x 100 x 15 mm, utilizando-se uma carga de 30 kgf/cm², de onde se retiraram quatro amostras medindo 150 mm x 50 mm x 15 mm.

Para o ensaio de absorção de água foram moldados 3 (três) cp cilíndricos de 50 mm diâmetro por 100 mm de altura, utilizando-se uma carga de 30 kgf/cm²

Para os ensaios de condutividade térmica foram moldadas placas, medindo 300 x 100 x 25 mm, utilizando-se uma carga de 30 kgf/cm², de onde retiraram-se três amostras medindo 100 x 100 x 25 mm.

3.2.7.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão foi realizada conforme a norma NBR 7215 [50], com uma velocidade de carregamento de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s. Os corpos-de-prova foram rompidos após cura de 28 dias, em máquina de ensaio TIRATEST com capacidade de 20 kN. A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. Os corpos de prova apresentaram um comportamento aparentemente dúctil e com uma deformação relativa bem alta antes da fratura (acima de 20% de deformação relativa). Desta forma optou-se por realizar os ensaios de compressão até a deformação relativa de 20%.

3.2.7.2 Ensaio de resistência à flexão

O modulo de ruptura foi determinado pelo ensaio de flexão a três pontos seguindo a metodologia observada na literatura [6] a partir da DIN 1101. O ensaio foi realizado em uma maquina de ensaio TIRATESTE, empregando 4 corpos de prova para o cálculo da média. Os valores do modulo de ruptura (MOR) foram obtidos a partir da Equação (3.3).

$$MOR = \frac{0,75 FL}{wt^2} \quad (3.3)$$

onde:

MOR - modulo de ruptura em MPa;

F - carga máxima aplicada (N);

L - comprimento do corpo de prova (mm);

w - largura do corpo de prova (mm);

t - espessura do corpo de prova (mm);

3.2.7.3 Ensaio de absorção de água dos corpos de prova

A metodologia utilizada na realização deste ensaio foi a descrita na norma NBR 9778 [49].

A secagem foi realizada tomando-se a massa de 3 (três) corpos de prova ao ar, colocando-os em uma estufa a $(70 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C})$, e determinando sua massa após permanência de 48 horas, obtendo-se a massa seca dos corpos de prova. Posteriormente os corpos de prova foram mergulhados em um recipiente com água potável, á temperatura ambiente, retirados após 2, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 e 192 horas de imersão, sempre secando-se a superfície destes corpos a cada vez que eles eram retirados da água, até obter a massa saturada das amostras.

O cálculo do teor percentual de umidade absorvida pelo material foi determinado pela Equação 3.4.

$$AA = \left(\frac{m_f - m_i}{m_i} \right) * 100 \quad (3.4)$$

onde:

AA - absorção de água dos corpos de prova (%);

m_i - massa inicial da amostra após secagem em estufa (g);

m_f - massa final da amostra após saturação em água (g);

3.2.7.4 Ensaio para determinação da condutividade térmica

A condutividade térmica foi determinada pela técnica do fio quente paralelo, desenvolvida pela literatura [46], como descrita na revisão bibliográfica desta dissertação. Neste procedimento, através de um duplo ajuste simultâneo da expressão que descreve a distribuição de temperatura neste método, determinam-se os valores de calor específico e condutividade térmica. O duplo ajuste, realizado por regressão não-linear, foi realizado com a ajuda do programa comercial ORIGIN™ versão 7.5.

A montagem utilizada para estas medidas pode ser visualizada na Figura 3.4, sendo que consistia de:

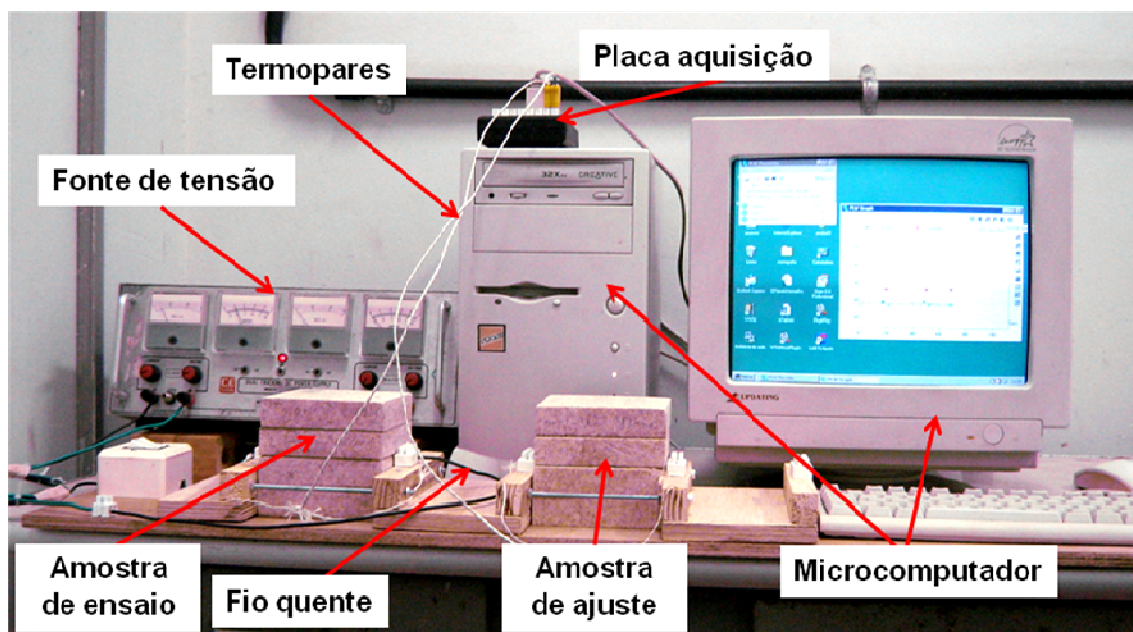


Figura 3.4 Arranjo utilizado para execução do ensaio de condutividade térmica.

- Fonte de tensão variável permitindo operação na faixa de 0 - 30 V e corrente na faixa de 0 - 5 A;
- Sistema digital de aquisição de dados (TC 08 da PICO Technology), com 8 canais de entrada, compensação automática da temperatura ambiente e software específico para aquisição dos dados via microcomputador;
- Fio de resistência níquel-cromo (Nikrothal 80/20) com diâmetro de 0,25 mm para ser utilizado como fio quente;
- Termopares tipo K com diâmetro de 0,25 mm para as medidas de temperatura no sistema do fio quente;
- Multímetro digital para medida de corrente e voltagem elétricas, permitindo operação na faixa de 0 - 5 V e corrente na faixa de 0 - 10 A;

O tempo de duração de cada ensaio foi de 3600 segundos. Valores de temperatura foram coletados com uma amostragem de 1 ponto por segundo. Para o cálculo da condutividade térmica, foi escolhido o mesmo intervalo para todos os corpos de prova.

Os valores de condutividade térmica foram calculados pela Equação 2.10, conforme metodologia apresentada no item 2.10.1.1 da revisão bibliográfica, sendo que foi utilizado 10 termos para calcular a série de potências.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise granulométrica das partículas de madeira

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os dados da análise granulométrica das partículas vegetais utilizadas para os ensaios de calor de hidratação e confecção de corpos de prova respectivamente; onde observa-se uma distribuição granulométrica que se encontra na faixa da zona 4 (grossa), conforme a norma NBR 7217 [47].

Tabela 4.1 Análise granulométrica aplicada sobre as partículas utilizadas para os testes de calor de hidratação.

Abertura de Peneira (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Peso retido (%) acumulado	Peso passante acumulado (%)
2,00	0,00	0,00	0,00	100
1,40	104,05	26,04	26,04	73,96
1,19	52,55	13,17	39,21	60,79
1,00	96,23	24,06	63,27	36,73
0,84	46,71	11,71	74,98	25,02
0,71	29,56	7,41	82,39	17,61
0,59	25,76	6,39	88,78	11,22
0,50	28,03	7,02	95,80	4,20
0,30	17,11	4,20	100,00	0,00
Total	398,85	100	-	-

Embora ambas as amostras apresentem-se como material grosso, é importante observar que os seus valores limites e sua distribuição de tamanhos são bem diferentes.

Verifica-se ainda da Tabela 4.1, que 73,96% das partículas utilizadas nos ensaios de calor de hidratação encontram-se entre as peneiras de abertura 1,4 e 0,30 mm. Já na Tabela 4.2 observa-se que 71,48% das partículas

utilizadas na confecção de corpos de prova encontra-se acima da peneira de abertura 1,4 mm e abaixo da peneira de abertura 2,4 mm.

Tabela 4.2 Análise granulométrica aplicada sobre as partículas utilizadas para a confecção dos corpos de prova.

Abertura de Peneira (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Peso retido (%) acumulado	Peso passante acumulado (%)
2,8	0,00	0,00	0,00	100
2,4	71,28	28,52	28,52	71,48
2,00	45,28	18,12	46,64	53,36
1,68	51,38	20,56	67,2	32,8
1,4	82,00	32,80	100	0,00
Total	249,94	100	-	-

A diferença nos limites granulométricos utilizados para os ensaios de calor de hidratação e para a confecção dos corpos de prova é devido a fato de partículas menores propiciarem uma condição mais severa de inibição. Reporta-se que quanto mais finas são as partículas de madeira, mais tempo leva para a cura do compósito cimento-madeira [51]. Reporta-se também que faixas granulométricas contendo maiores teores de finos diminuem a trabalhabilidade da mistura dificultando o processo de moldagem [52]. A partir destas informações, foram adotados os limites granulométricos utilizados para a confecção dos corpos de prova caracterizados neste trabalho.

Os limites granulométricos utilizados para a confecção dos corpos de prova associado com a metodologia utilizada para a mistura dos componentes da argamassa, propiciou uma boa trabalhabilidade, melhorando o processo de moldagem dos corpos de prova.

4.2 Teor de umidade das partículas de madeira

A Tabela 4.3 apresenta a umidade média das partículas vegetais, que foi de 10,3%. Tal parâmetro é importante, pois afeta a absorção de água destas partículas, que por sua vez afeta a relação água/cimento das misturas.

Tabela 4.3 Teor de umidade das partículas de madeira.

Tempo de ensaio (h)	Amostras / Massa (g)		
	1	2	3
0	100	100	100
24	91	90	91
Teor de umidade (%)	9,89	11,11	9,89
Teor de umidade Médio (%)/Desvio padrão	10,30 ± 0,70		

4.3 Absorção de água das partículas de madeira

A Figura 4.1 mostra a absorção de água das partículas de madeira.

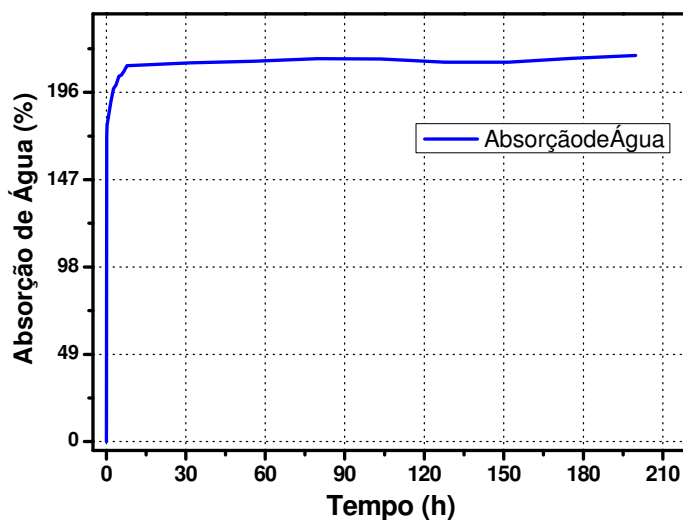


Figura 4.1 Absorção de água pelas partículas vegetais.

Observa-se que as partículas vegetais têm grande capacidade de absorção de água, em média 217%, sendo que esta absorção ocorre nos instantes iniciais (em 5 minutos este valor é cerca 170% em relação ao peso seco das mesmas) como pode ser visto na Tabela G1 do APÊNDICE G.

Esta grande capacidade de absorção de água deve ser considerada pois ela influencia a relação água/cimento, a homogeneização da mistura cimento-madeira-água. Também esta grande capacidade de absorção de água pode promover a segregação do aglomerante durante a prensagem das placas, devido à expulsão desta água absorvida. Tal fato nos levou a modificar a seqüência de mistura das matérias primas previamente estabelecida.

4.4 Construção do Sistema para Medidas do Calor de Hidratação

A Figura 3.1 no item 3.2.4 mostra o sistema construído para realização das medidas de calor de hidratação. Este sistema, como já mencionado, foi constituído de calorímetros, termopares tipo K, os quais foram acoplados a uma sistema digital de aquisição de dados (TC 08 da PICO Technology), com 8 canais de entrada, compensação automática da temperatura ambiente e software específico para aquisição dos dados via microcomputador.

Os calorímetros foram construídos a partir das especificações da NBR 12006 [36], utilizando-se tubos de PVC, poliuretano como isolante térmico e tampas de isopor para isolar a mistura ensaiada do meio exterior.

Estes calorímetros possuem um sistema de regulação do volume interno onde a mistura é acondicionada. Esta regulação é feita pelas tampas de isopor, as quais podem se deslocar pelo eixo do calorímetro. Este deslocamento das tampas é necessário devido à necessidade de regulação do volume, para garantir que quantidades maiores de material possam ser ensaiadas, além de garantir um controle no posicionamento do termopar, uma vez que os dados são influenciados pelo posicionamento deste termopar.

4.5 Calor de Hidratação

Valores de temperatura de pico ($T_{\max}$), tempo de hidratação para atingir a temperatura de pico, ($t_{\max}$) e índice de inibição para as condições estudadas são apresentados na Tabela 4.4. Os índices de inibição mostrados nesta Tabela 4.4, indicam, tendo por base a Tabela 2.4, que a espécie vegetal empregada é de baixa inibição, sendo desta forma compatível com os dois tipos de cimento (CP II Z 32 RS e CP IV 32 RS) empregados nesta pesquisa.

Tabela 4.4 Dados de temperatura, tempo de hidratação e índice de inibição para as condições estudadas.

Tipo Cimento	Condição	Temperatura Máxima (°C)	ΔT (°C)	Δt (h)	$S_{\max}$ ($\Delta T/\Delta t$) °C/h	Índice de Inibição
	C	54,16	28,28	8,17	3,46	
	CAREIA	49,81	23,13	8,92	2,59	
	CM	50,42	22,94	10,68	2,15	0,81
	CMA ₁	60,67	32,89	4,02	8,19	-8,34
	CMA ₂	57,62	26,45	3,45	7,67	-4,48
	CMA ₃	49,89	22,95	6,55	3,5	0,02
	CMTA ₁	51,68	23,76	6,45	3,68	0,06
	CMTA ₁ A ₁	60,33	31,01	3,65	8,49	-9,16
CP II	CMTA ₁ A ₂	54,52	26,24	4,28	6,13	-0,25
	CMTA ₁ A ₃	51,64	24,51	5,47	4,48	0,45
	CMTA ₂	51,31	25,51	7,28	3,5	0,01
	CMTA ₂ A ₁	59,1	31,98	4,08	7,83	-5,75
	CMTA ₂ A ₂	55,88	31,07	3,88	8	-2,19
	CMTA ₂ A ₃					
	CMTA ₃	48,67	22,97	8,58	2,68	0,12
	CMTA ₃ A ₁	57,93	31,04	3,4	9,13	-6,66
	CMTA ₃ A ₂					
	CMTA ₃ A ₃	49,91	22,9	5,98	3,83	0,22

continuação Tabela 4.4 Dados de temperatura, tempo de hidratação e índice de inibição para as condições estudadas

	C	50,68	24,97	12,72	1,96	
	CAREIA	45,29	20,24	12,85	1,58	
	CM	43,27	16,06	17,22	0,93	2,72
	CMA ₁	57,71	31,13	8,4	3,71	-4,17
	CMA ₂	43,81	16,8	5,02	3,35	5,79
	CMA ₃	39,72	11,23	7,22	1,56	-1,94
	CMTA ₁	46,34	19,25	12,32	1,56	-0,06
	CMTA ₁ A ₁	59,23	31,48	7,37	4,27	-8,35
CP IV	CMTA ₁ A ₂	43,88	18,95	6,85	2,77	2,53
	CMTA ₁ A ₃	38,65	16,49	7,13	2,31	1,85
	CMTA ₂	46,87	20,19	9,13	2,21	0,27
	CMTA ₂ A ₁	58,22	29,86	6,72	4,45	-8,86
	CMTA ₂ A ₂	45,98	16,09	7,07	2,28	0,66
	CMTA ₂ A ₃					
	CMTA ₃	45,1	20,84	12,77	1,63	0,01
	CMTA ₃ A ₁	50,12	21,84	4,88	4,47	0,87
	CMTA ₃ A ₂					
	CMTA ₃ A ₃	37,88	13,41	9,97	1,35	-1,72

C - cimento-água, CAREIA - cimento-areia-água, CM - cimento-madeira-água, A₁ - Aditivo cloreto de cálcio, A₂ - Aditivo cloreto de alumínio, A₃ - Aditivo cloreto de ferro, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₂ - cimento-madeira-água mais aditivo A₂, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₂ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₂, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₂ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₂-água, CMTA₂A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₂-água mais aditivo A₁, CMTA₂A₂ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₂-água mais aditivo A₂, CMTA₂A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₂-água mais aditivo A₃, CMTA₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₂ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₂, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Observa-se da Figura 4.2 que a evolução do calor de reação do cimento CP II foi mais intensa que as do cimento CP IV. Isto pode ser atribuído à composição mineralógica de ambos os cimentos. Este resultado indica uma maior adequação do cimento CP II em relação ao CP IV.

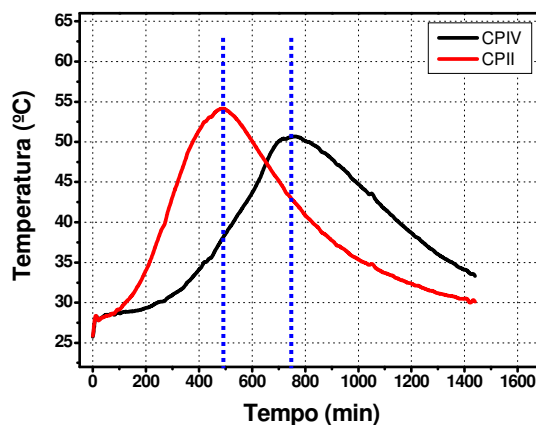


Figura 4.2 Evolução do calor de hidratação para os cimentos CP IV e CP II.

Observa-se ainda a ocorrência de um pequeno pico seguido por um período de dormência antes do início do segundo pico, os quais, segundo a literatura, estão associados com a hidratação do C_3A (aluminato tricálcico) e C_3S (silicato tricálcico) respectivamente [21]. Porém, as misturas cimento-água, e, cimento-madeira-água, apresentam massas diferentes, o que poderia causar diferenças na propagação do calor.

Para avaliar o comportamento do cimento puro numa situação mais próxima à mistura de cimento-madeira-água, utilizou um agregado inerte (areia), na mesma proporção que se utilizou as partículas de madeira, como mostra a Figura 4.3.

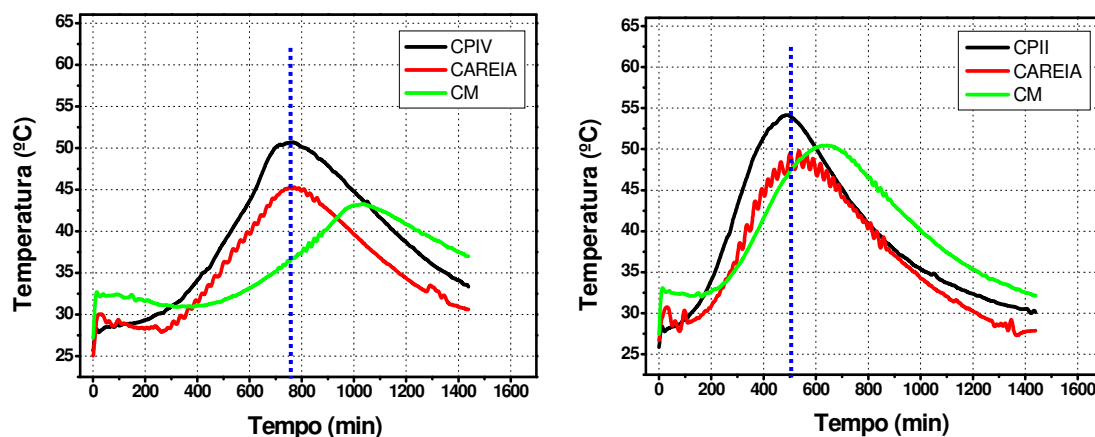


Figura 4.3 Efeito da presença de areia e partículas de madeira no comportamento de hidratação dos cimentos CP IV e CP II.

Verifica-se que quando se utilizou areia, a curva de hidratação não se alterou em relação ao tempo. Já a presença de partículas de madeira provocou um retardamento da cura de ambos os tipos de cimento, demonstrando assim o efeito inibidor que estas partículas exercem sobre as reações de hidratação do cimento.

Embora não exista ainda um consenso sobre esta inibição, reporta-se que tal fato pode ser atribuído ao encapsulamento das partículas do cimento pelos extrativos contidos nas mesmas [20].

A Figura 4.4 apresenta o efeito da presença de tratamentos químicos, com solução aquosa de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

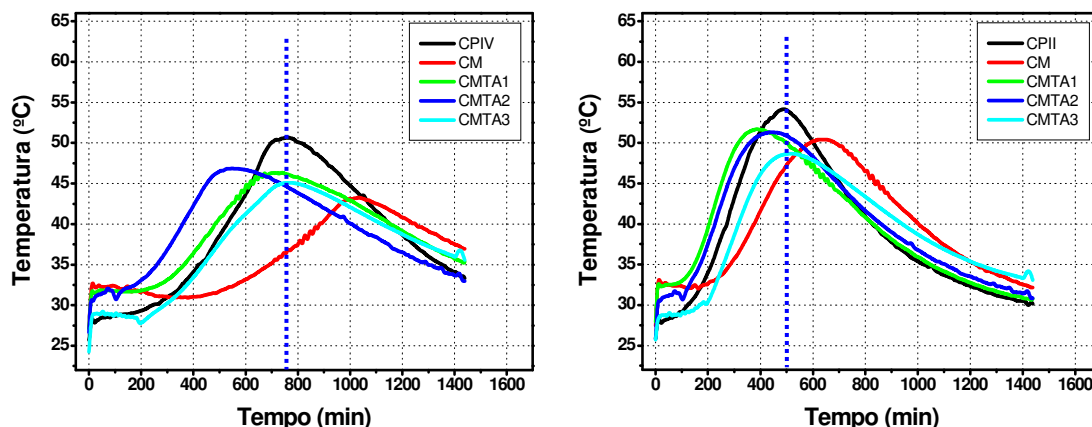


Figura 4.4 Efeito da presença de tratamentos químicos com solução de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

Nesta Figura 4.4, observa-se que os tratamentos químicos aplicados às partículas de madeira proporcionaram uma redução no tempo de pico ($t_{\text{máx}}$), o que mostra uma cura mais acelerada em comparação com a mistura cimento-madeira-água.

Reporta-se que devido ao comportamento altamente hidrofílico das partículas vegetais, soluções de tratamento ficam retidas nas partículas, afetando a cura do cimento na interface cimento-partícula, formando rapidamente uma fina casca de cimento que dificultaria a liberação subsequente de tais extrativos na mistura cimento-madeira-água.

Acredita-se também que estas soluções podem formar uma fina camada sobre as partículas de madeira, as quais, além de criarem uma barreira física para a liberação dos extrativos remanescentes, provocam uma aceleração na cura do cimento na interface cimento-madeira, formando também uma fina casca de cimento que dificultaria a liberação subsequente de tais extrativos na mistura cimento-madeira-água.

Também algumas soluções aquosas agem através da desativação do caráter inibidor dos extrativos da madeira, como é o caso para soluções de tratamentos contendo íons trivalentes, como AlCl_3 e FeCl_3 , que promovem a

quelação dos extrativos da madeira, deixando-os insolúveis em solução aquosa [24] e consequentemente inativos para a mistura cimento-água. Em tais casos observa-se a aceleração da cura apenas para misturas contendo partículas de madeira, sem apresentar ação aceleradora em misturas de cimento puro [24].

Da Figura 4.5 que mostra a influência de aditivos químicos no comportamento de hidratação da mistura cimento-madeira-água, observa-se, que para ambos os tipos de cimentos, as reações de hidratação ocorreram com maior velocidade quando comparadas com aquelas que não continham aditivos, promovendo desta forma um significativo efeito na velocidade de hidratação e pega do cimento, independente do aditivo considerado.

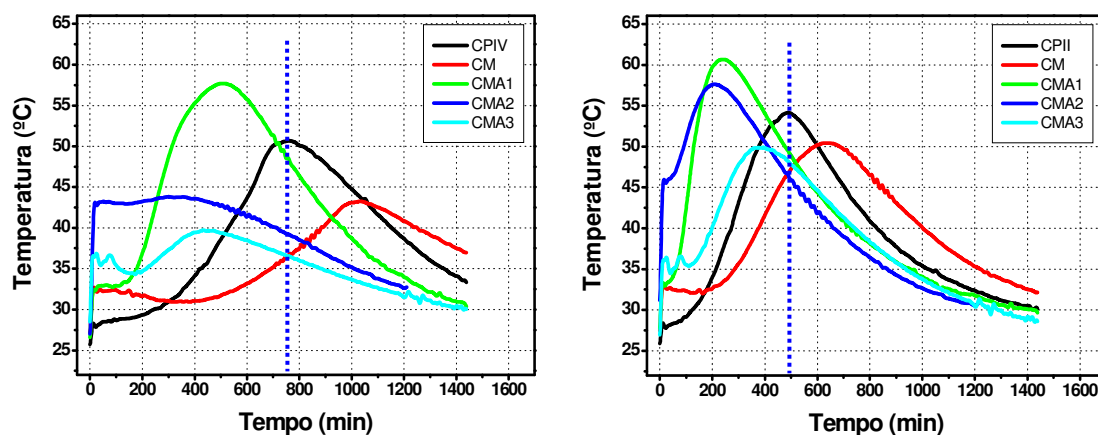


Figura 4.5 Efeito da presença de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

Essa ação pode ser atribuída ao fato que os íons cloretos primeiro reagem com C_3A no cimento, formando hidrocloroaluminato de cálcio ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$), sendo que a solubilidade deste em água torna-se maior que para etringita ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) [21].

Além disso alguns cloretos causam um aumento nos álcalis dissolvidos no cimento. Acredita-se que isso levou a acelerar a precipitação do sulfoaluminato de cálcio, provavelmente acompanhado pela precipitação de

cloroaluminato resultando na hidratação acelerada do cimento; isso leva a um aumento nítido na liberação de calor [21].

Pode-se observar também que o aditivo A_2 proporcionou uma reação de hidratação muito rápida, eliminando praticamente o tempo de dormência da reação de hidratação, devendo ter causado uma sobreposição do primeiro estágio com o segundo estágio de hidratação. Paralelamente o aditivo A_2 provocou perda de fluidez e trabalhabilidade nos dois tipos de cimentos estudados, fato este corroborado pela literatura [53].

No entanto, considerando os resultados posteriores sobre os efeitos de quantidades equivalentes de cátions em misturas de cimento-madeira, sugere-se um estudo do calor de hidratação deste aditivo (A_2) em diversas dosagens inferiores a 4% em peso de cimento, para se obter uma dosagem de aditivo que possa ser empregada sem que a reação se desenvolva de forma muito rápida, para não causar perda de trabalhabilidade.

Uma condição potencialmente adequada seria a condição onde a reação de hidratação das misturas cimento-madeira-água mais aditivo apresentasse valores de $t_{\max}$ próximos a valores de $t_{\max}$ da mistura cimento-água.

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram que tanto o uso de partículas de madeira tratadas em soluções aquosas contendo aditivos, bem como o uso direto de aditivos em misturas cimento-madeira proporcionaram uma aceleração na reação de pega do cimento.

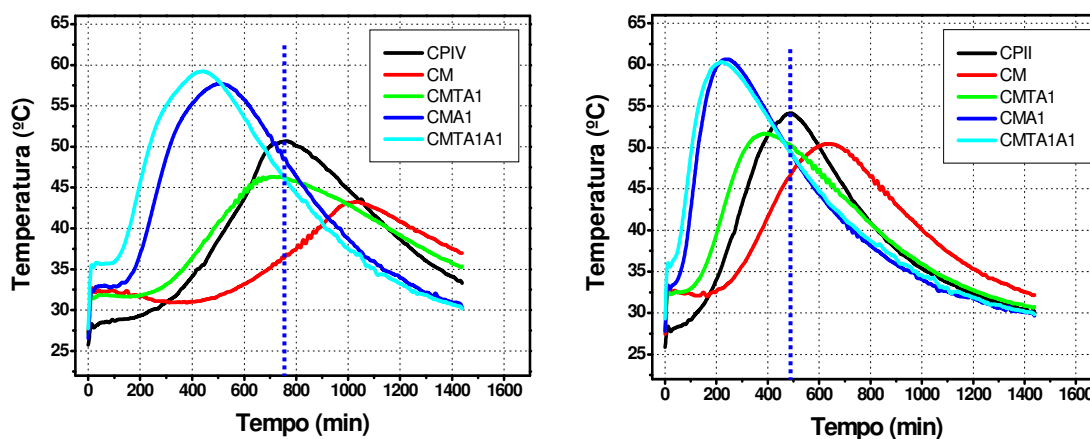


Figura 4.6 Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A_1 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

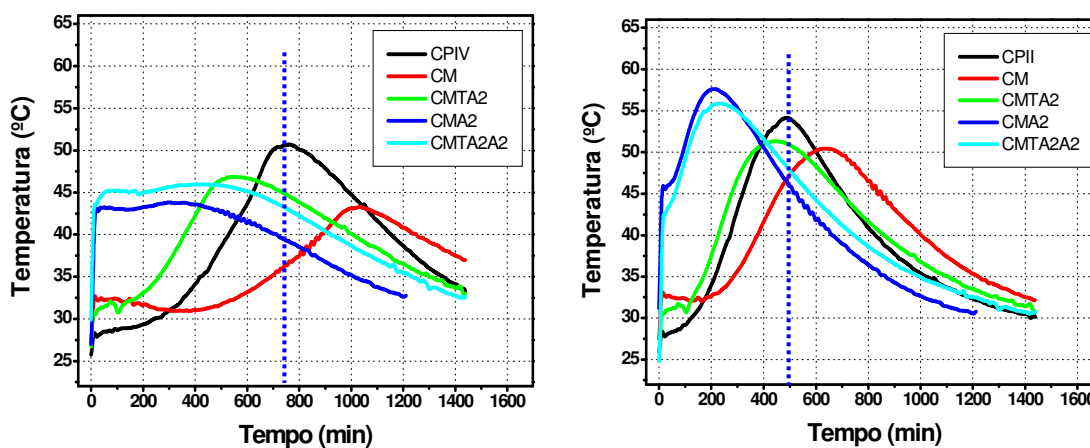


Figura 4.7 Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

O uso direto de aditivo proporcionou uma aceleração mais intensa que o efeito do tratamento das partículas de madeira. Tal fato, como será mostrado posteriormente, é devido a diferenças em quantidades de aditivos disponíveis nos dois processos para as condições aqui utilizadas.

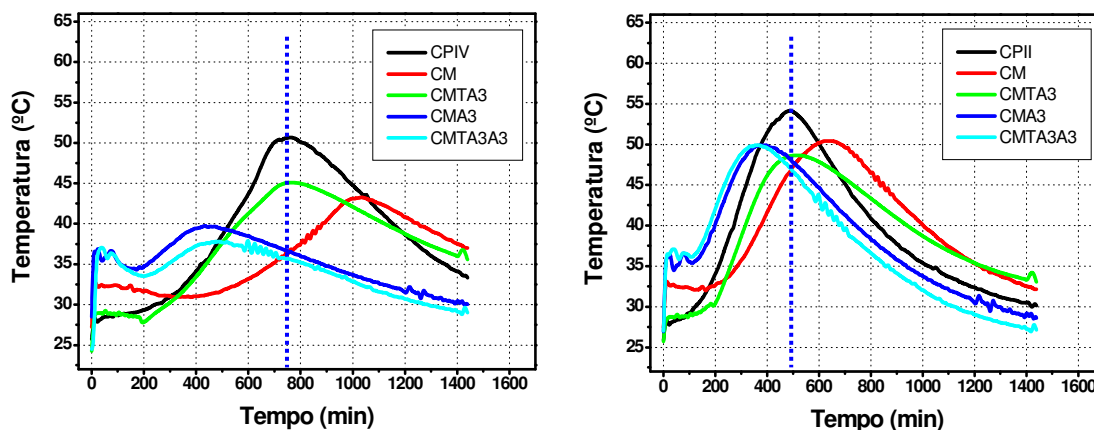


Figura 4.8 Efeito comparativo da presença de tratamento químico, de aditivo químico, e de tratamento químico combinado com aditivo químico, para o aditivo A₃, no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água, para os cimentos CP IV e CP II.

Nestas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, pode-se observar também que o uso simultâneo de partículas de madeira tratadas com a adição de aditivos na mistura cimento-madeira, usando-se em ambos casos os mesmos sais, provocou apenas um ligeiro aumento na hidratação do cimento em comparação com a mistura cimento-madeira-aditivo, o que indica, que para as condições aqui utilizadas, o efeito do aditivo foi dominante sobre o efeito do tratamento das partículas de madeira.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam o efeito do tipo de aditivo sobre a hidratação de misturas cimento-madeira tratada com solução de aditivo químico-água. Observa-se nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 que a utilização dos aditivos químicos, independente do tipo de tratamento realizado proporcionou uma reação de hidratação mais acelerada para estas misturas (cimento-madeira tratada com solução de aditivo químico-água), o que nos permite dizer

que houve a influencia dos aditivos químicos sobre as reações de hidratação destas misturas.

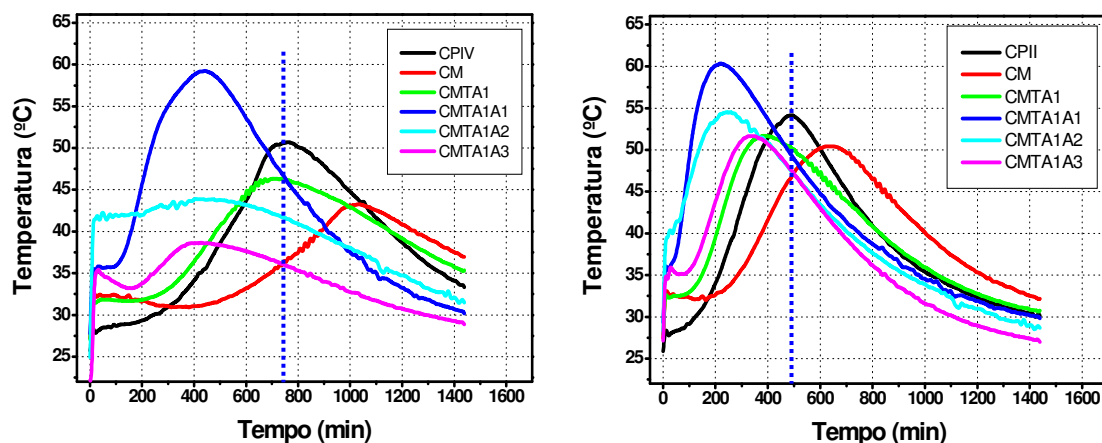


Figura 4.9 Efeito da presença de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratada com solução de aditivo A_1 -água, para os cimentos CP IV e CP II.

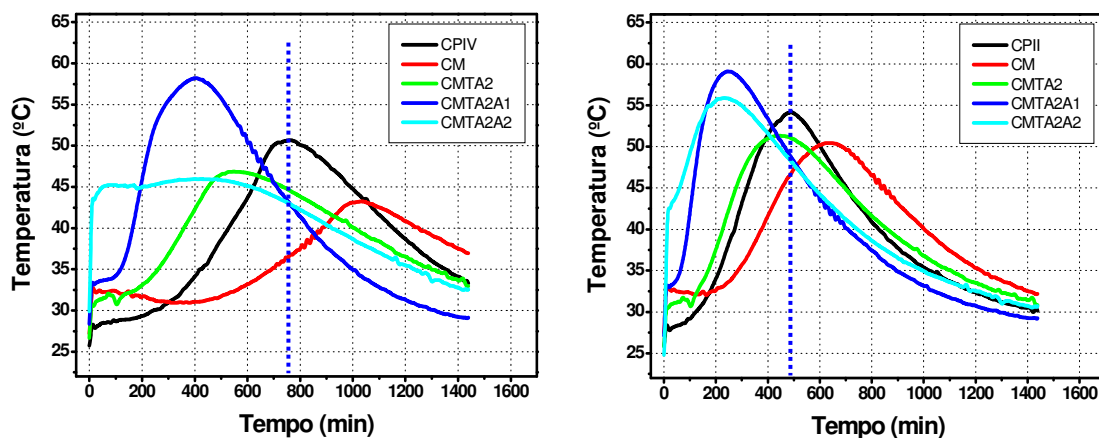


Figura 4.10 Efeito da presença de aditivos químicos A_1 e A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratadas com solução de aditivo A_2 -água, para os cimentos CP IV e CP II.

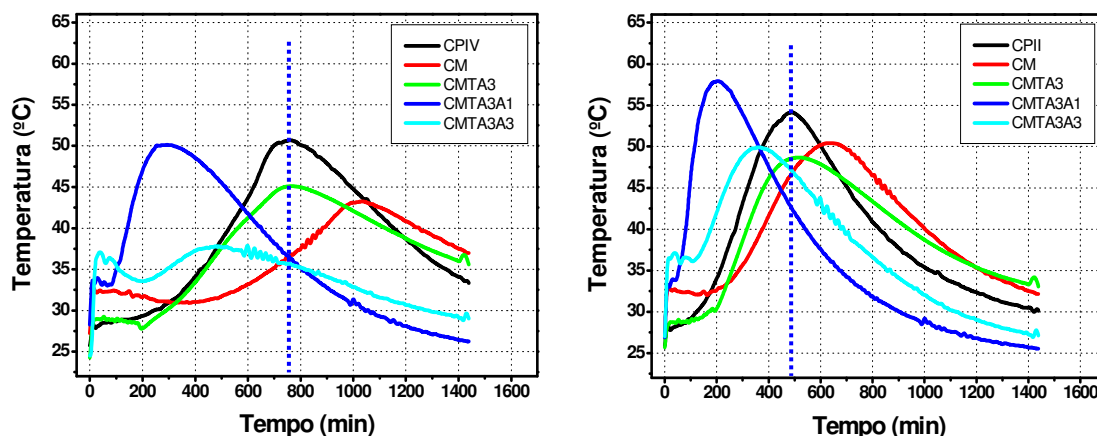


Figura 4.11 Efeito da presença de aditivos químicos A_1 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira tratadas com solução de aditivo A_3 -água, para os cimentos CP IV e CP II.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, mostram o efeito da presença de partículas de madeira tratadas com soluções aquosas, no comportamento de hidratação de misturas cimento-madeira-água mais aditivo. Nestas Figuras, pode-se verificar que as reações de hidratação praticamente não sofreram alteração na velocidade de reação, indicando que houve pouca influencia dos tratamentos das partículas de madeira sobre as reações de hidratação destas misturas (cimento-madeira-água mais aditivo).

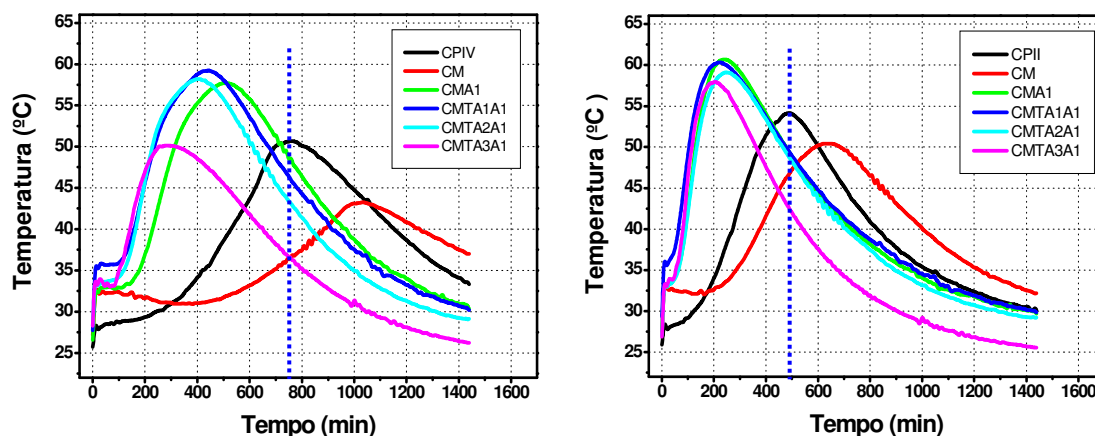


Figura 4.12 Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 , A_2 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_1 , para os CP IV e CP II.

Diante desses resultados pode-se constatar que a ação dos aditivos foi maior que a dos tratamentos, independente dos aditivos utilizados. Conforme já mencionado, tal fato deve-se, nas condições aqui utilizadas, a uma quantidade de sais significativamente maior quando se emprega o aditivo diretamente sobre a mistura cimento-madeira.

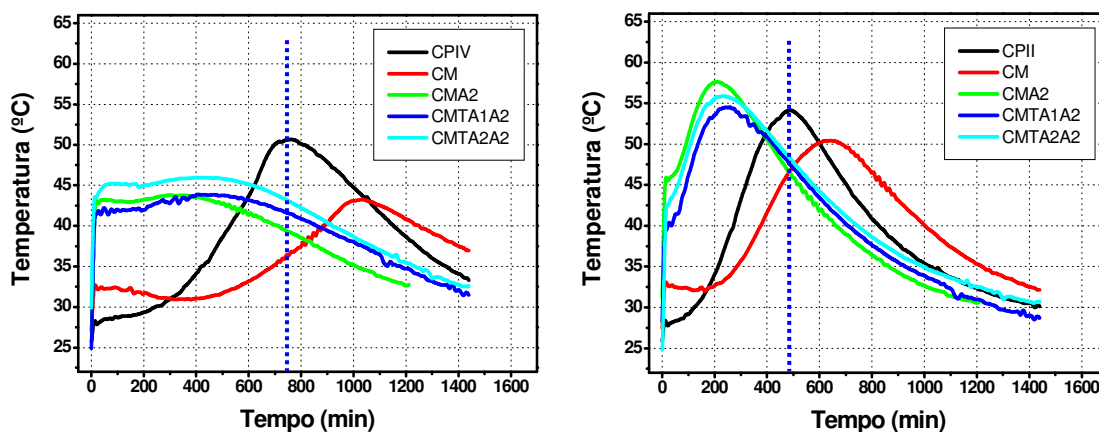


Figura 4.13 Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 e A_2 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_2 , para os cimentos CP IV e CP II.

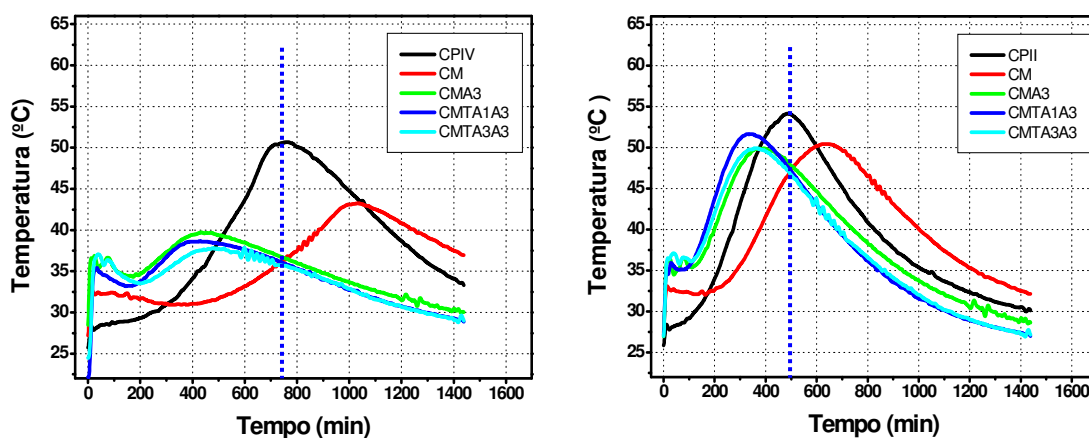


Figura 4.14 Efeito da presença de tratamentos com solução de aditivos químicos A_1 e A_3 , no comportamento de hidratação da mistura, cimento-madeira-água mais aditivo A_3 , para os cimentos CP IV e CP II.

A fim de entender melhor o efeito do tipo de aditivo nas misturas cimento-madeira, misturas contendo a mesma quantidade de cátions foram investigadas. A Figura 4.15 mostra o efeito do tipo de aditivo sobre a hidratação de misturas cimento-madeira, quando se utiliza dosagens que forneçam quantidades equivalentes de cátions.

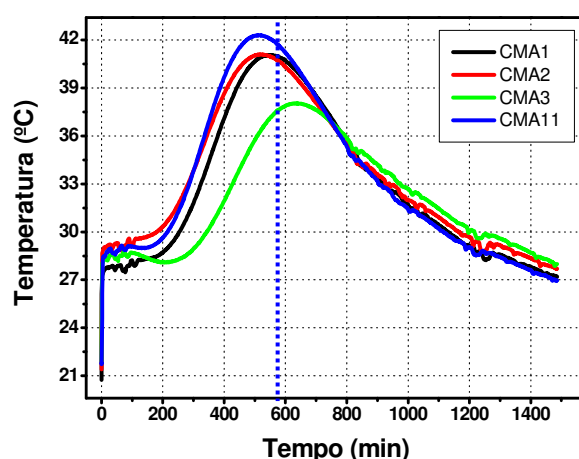


Figura 4.15 Efeito do tipo de aditivo sobre a hidratação de misturas cimento-madeira-água, quando se utiliza dosagem que forneça quantidades equivalentes de cátions e ânions.

Nas condições CMA_1 , CMA_2 e CMA_3 , mostradas na Figura 4.15, tem-se quantidades de cátions (Ca, Al, Fe) equivalentes para as 3 (três) condições, já nas condições CMA_1 , CMA_2 , CMA_3 e CMA_{11} , mostradas nesta mesma Figura, tem-se quantidades de ânions (Cl) iguais para as 4 (quatro) condições. As abreviações CMA_1 , CMA_2 e CMA_3 , já foram definidas anteriormente, já a abreviação CMA_{11} , significa uma mistura cimento-madeira-água mais aditivo A_1 , com quantidades de ânions (Cl) equivalentes às demais condições.

Nessas condições não foram observadas diferenças significativas no comportamento da hidratação do cimento. Apenas o aditivo A_3 causou um efeito menor na reação de hidratação quando comparado com o aditivo A_1 e A_2 . Isto pode ser atribuído ao fato de que o cátion Fe^{+3} atuou apenas como um

agente quelador das espécies iônicas originadas dos extrativos vegetais, desativando assim o seu efeito inibitório da pega do cimento, sem, no entanto acelerar a reação de cura da pasta cimentícia. Assim não se nota diferenças no comportamento das curvas de hidratação de misturas cimento-madeira-água quando se utiliza os aditivos A_1 e A_2 ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ respectivamente). As diferenças de comportamento observadas na Figura 4.5, onde se utilizou as mesmas quantidades mássicas de aditivo, foi na realidade, devido a diferentes quantidades de cátions presentes nestas condições.

Para melhor entender as possíveis diferenças entre o uso de aditivo direto na pasta cimentícia e o uso do tratamento das partículas de madeira em soluções aquosas contendo aditivos, pesquisou o efeito destes através de condições que propiciassem quantidades equivalentes de cátions. Para isso considerou-se a quantidade de cátions presentes na solução de tratamento que ficava retida nas partículas de madeira, e então, procedeu-se o cálculo da quantidade mássica de aditivo que proporcionava uma quantidade molar equivalente de cátions conforme item 3.2.4. A Figura 4.16 mostra as curvas de hidratação com quantidades equivalentes de cátions fornecidas tanto pela adição direta de aditivos como pelo uso de soluções de tratamentos.

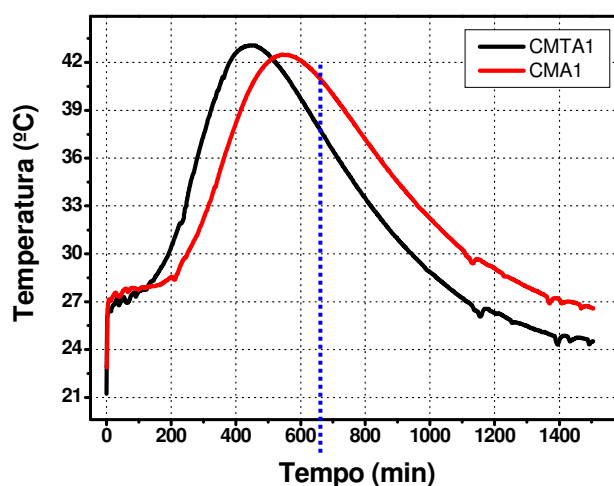


Figura 4.16 Efeito de quantidades equivalentes de cátions fornecido tanto pelo uso direto de aditivo químico quanto pelo uso de soluções aquosas de tratamentos das partículas de madeira.

Nessas condições o uso de soluções de tratamentos contendo quantidades molares equivalentes de aditivos apresentou um pequeno aumento na velocidade de reação da pasta cimentícia, quando comparada com a adição direta de aditivo. Isto pode ser devido ao fato de que todo o aditivo disponível fica retido nas cavidades das partículas de madeira, enquanto que na adição direta de aditivos, este fica distribuído sobre toda pasta cimentícia.

Desta forma, por razões ambientais, considerando-se a pequena diferença observada entre o uso de soluções de tratamento para partículas de madeira e o uso direto de aditivos na pasta cimentícia, deve-se preferir esta última forma, pois no primeiro caso, será produzido um resíduo químico (solução de tratamento) que necessitará ser descartado após utilização.

Para entender melhor o efeito do caráter fortemente hidrofílico das partículas de madeira, foi investigado o efeito destas partículas parcialmente saturadas com água, em misturas cimento-madeira-água mais aditivo comparando-as com misturas preparadas com partículas secas, com adição de quantidade extra de água, equivalente a quantidade que seria retida pelas partículas de madeira parcialmente saturadas como mostra a Figura 4.17.

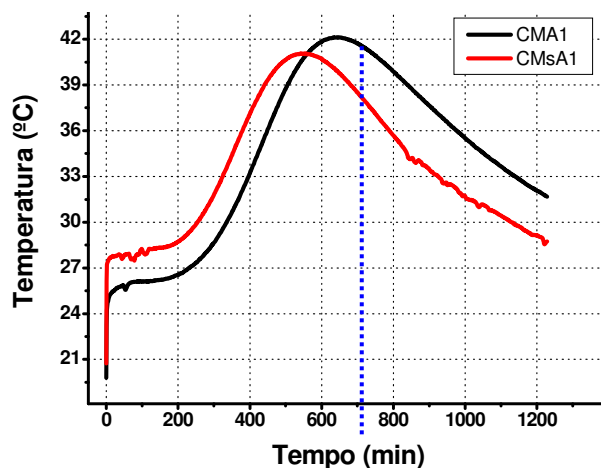


Figura 4.17 Efeito da saturação das partículas de madeira em misturas cimento-madeira-água mais aditivo.

Conforme pode ser visto na Figura 4.17, misturas contendo partículas de madeira parcialmente saturadas com água CM_sA_1 exibiram na curva de hidratação uma liberação de calor ligeiramente mais rápida. Tal fato pode estar ligado à redução dos extrativos pela lavagem durante a saturação das partículas em água ou ainda pela retirada das partículas muito finas.

4.6 Parâmetros de processamento

Na Figura 4.18 observa-se que, nas metodologias de mistura das matérias-primas testadas nesta pesquisa, [(cimento + partículas secas) + água] ou [(cimento + 50% de água em relação ao peso do cimento) + partículas saturadas com 150 e 120% de água], houve uma tendência à decantação do aglomerante na parte inferior do molde. Tal decantação poderia levar a uma menor resistência do material, devido uma distribuição não uniforme do ligante no material moldado. Já para a metodologia onde se utilizou partículas parcialmente saturadas com 80% de água [(cimento + 50% de água em relação ao peso do cimento) + partículas saturadas com 80% de água], não se percebeu esta tendência de decantação do ligante, fato este que nos levou a adotar esta metodologia para a produção do material a ser investigado nesta pesquisa.

Para a definição dos traços adotados nesta pesquisa (1:0,66 e 1:1), foi levado em consideração a minimização da quantidade do ligante (cimento Portland) que é um dos insumos de maior custo neste material.

Cabe ainda mencionar observando a Figura 4.18, que para materiais produzidos na metodologia de mistura das matérias-primas seguinte: [(cimento + partículas secas) + água], observou-se nestes, uma porosidade maior que para aqueles materiais produzidos na metodologia onde as partículas de madeira eram primeiramente saturadas, [(cimento + 50% de água em relação ao peso do cimento) + partículas saturadas com 150, 120 e 80% de água], além do que a homogeneização se tornou mais trabalhosa.

Tais constatações podem ser explicadas pela grande capacidade de absorção de água das partículas de madeira como mostrado na Figura 4.1.

Pode-se também observar na Figura 4.18 que o emprego de partículas secas de madeira propiciou um aspecto típico, com vazios não preenchidos pelo ligante.

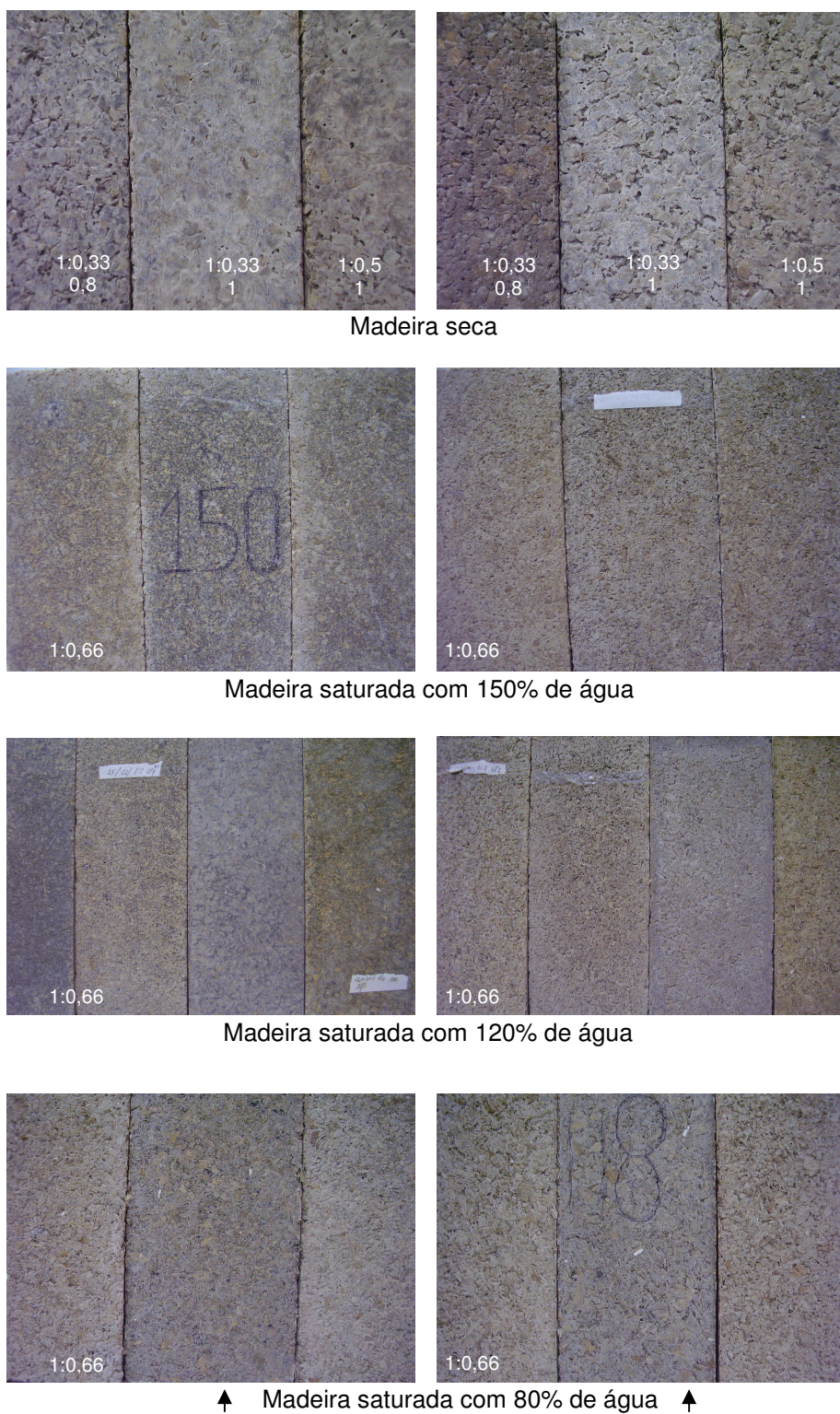


Figura 4.18 Aspecto visual de algumas peças produzidas nos testes iniciais. As Figuras do lado esquerdo referem-se à parte inferior do molde e as do lado direito, à parte superior do molde.

4.7 Massa específica aparente

A Tabela 4.5 apresenta os valores de massa específica aparente média para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II.

Tabela 4.5 Massa específica aparente média para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II.

	TRAÇO	Cimento	CONDIÇÃO							
			CM A ₁	CM A ₃	CMT A ₁	CMT A ₃	CMTA ₁ A ₁	CMTA ₁ A ₃	CMTA ₃ A ₁	CMTA ₃ A ₃
MEA (g/cm ³)	1:0,66	CP IV	0,90	-	-	-	0,91	0,91	0,92	0,90
		CP II	0,90	0,89	0,89	0,87	0,91	0,89	0,89	0,92
	1:1	CP IV	0,80	-	-	-	0,80	0,78	0,79	0,80
		CP II	0,82	-	-	-	0,79	0,80	0,81	0,81

MEA - massa específica aparente, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água, CMTA₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Verifica-se que o traço influenciou a massa específica aparente do material, como era de se esperar. A redução na massa específica do material pode ser atribuída a um somatório de fatores [54], tais como: presença de maior volume de fração menos densa (fibras) na composição das misturas, aumento da porosidade pela incorporação de ar pelas fibras etc.

Das Tabelas 4.5 e 4.6 não foi verificado a influencia do tipo de cimento e condição de tratamento, na massa específica aparente do material. Um fator que contribuiu para a variação desta propriedade foi a carga de prensagem. Quanto maior foi esta carga, maior foi a massa específica do material, tal fato pode estar relacionado com a diminuição do volume e consequentemente da porosidade.

Tabela 4.6 Massa específica aparente média para corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm², nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II.

	TRAÇO	Cimento	CONDIÇÃO							
			CM A ₁	CM A ₃	CMT A ₁	CMT A ₃	CMTA ₁ A ₁	CMTA ₁ A ₃	CMTA ₃ A ₁	CMTA ₃ A ₃
MEA (g/cm ³)	1:0,66	CPIV	1,10	-	-	-	1,09	1,09	1,10	1,06
		CP II	1,08	1,07	1,07	1,10	1,08	1,11	1,13	1,08
	1:1	CPIV	0,95	-	-	-	-	-	0,94	0,92
		CP II	0,96	0,94	-	-	0,96	0,94	-	0,96

MEA - massa específica aparente, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água, CMTA₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

4.8 Resistência à compressão axial

Os dados de resistência à compressão provenientes de corpos de prova confeccionados com cimento CP IV e CP II no traço 1:0,66, estão apresentados na Tabela 4.7 e 4.8 respectivamente.

Apenas para o cimento CP II (que apresentou uma reação de hidratação menos afetada pela presença de partículas de madeira, conforme visto na Figura 4.3) foram ensaiadas amostras produzidas com a mistura cimento-madeira-água (sem o uso de aditivos ou tratamento das partículas vegetais), para servir de comparação.

Observa-se que o uso de aditivos e/ou tratamentos químicos das partículas de madeira forneceram valores superiores aos obtidos em corpos de prova, confeccionados apenas com cimento-madeira-água mostrados na Tabela 4.8, com cimento CP II no traço 1:0,66, independente do tipo de aditivo ou do tipo de tratamento dado às partículas de madeira. Ou seja, independente do tipo de cimento empregado, o uso de aditivos e/ou tratamentos químicos

das partículas de madeira sempre proporcionaram valores superiores àqueles observados para a condição onde se tinha apenas cimento-madeira-água.

Tabela 4.7 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², no traço 1:0,66 e com cimento CP IV.

Cimento CP IV - TRAÇO 1:0,66						
Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO					
	CM 2,72	CMA ₁ -4,17	CMTA ₁ A ₁ -8,35	CMTA ₁ A ₃ 1,85	CMTA ₃ A ₁ 0,87	CMTA ₃ A ₃ -1,72
Resistência (MPa)	Cp1	-	5,00	4,82	4,61	4,22
	Cp2	-	4,74	4,52	4,71	4,82
	Cp3	-	5,56	4,81	4,87	4,66
	Cp4	-	5,45	3,91	4,75	4,66
	Cp5	-	-	4,68	4,90	-
	Média/ Desvio padrão	-	5,19 / 0,38	4,55 / 0,37	4,77 / 0,12	4,59 / 0,26

CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Observa-se também que o emprego do aditivo A₃ (FeCl₃), tanto na forma de aditivo como também quando usado isoladamente na forma de solução de tratamento, causou um aumento na resistência a compressão, sem no entanto ter causado significativas alterações no índice de inibição. Tal fato pode estar relacionado, conforme já mencionado no item 4.5, com a ação do FeCl₃ diretamente sobre os extrativos vegetais, sem, no entanto acelerar a reação de hidratação da pasta cimentícia.

Tabela 4.8 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², no traço 1:0,66 e com cimento CP II.

Cimento CP II - TRAÇO 1:0,66											
Resistência à Compressão (MPa)	Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO									
		CM 0,81	CMA ₁ -8,34	CMA ₃ 0,02	CMTA ₁ 0,06	CMTA ₃ 0,12	CMTA ₁ A ₁ -9,16	CMTA ₁ A ₃ 0,45	CMTA ₃ A ₁ -6,66	CMTA ₃ A ₃ 0,22	CMTA ₂ A ₁ -5,75
	Cp1	3,52	5,87	6,73	4,88	4,88	4,50	4,76	4,64	4,92	4,78
	Cp2	4,01	5,99	6,07	4,15	5,47	4,18	4,44	4,23	5,42	4,60
	Cp3	3,91	5,61	7,08	5,27	5,27	4,23	4,20	4,01	4,57	5,69
	Cp4	4,34	5,01	7,39	4,50	5,63	4,29	4,20	4,61	4,99	4,07
	Cp5	3,92	-	-	-	-	3,97	-	4,35	-	-
	Média/ Desvio padrão	3,94 ±0,29	5,62 ±0,44	6,82 ±0,57	4,70 ±0,48	5,31 ±0,32	4,23 ±0,19	4,40 ±0,26	4,37 ±0,26	4,98 ±0,35	4,79 ±0,67

CM - cimento-madeira-água, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água, CMTA₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃, CMTA₂A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₂-água mais aditivo A₁.

Nas condições avaliadas, o uso do aditivo A_2 ($AlCl_3$) como aditivo, conforme já mencionado, causou uma reação de hidratação muito intensa, causando assim uma perda de trabalhabilidade da pasta cimentícia, motivo pelo qual não foi investigado.

No entanto, considerando os resultados posteriores sobre os efeitos de quantidades equivalentes de cátions em misturas de cimento-madeira, como já mencionado, sugere-se um estudo do calor de hidratação deste aditivo que forneça a dosagem de aditivo A_2 ($AlCl_3$) que possa ser empregada sem que a reação se desenvolva de forma muito rápida, para não causar perda de trabalhabilidade da pasta cimentícia.

Considerando-se apenas o uso de partículas de madeira tratadas, observa-se que o uso de soluções contendo aditivo A_3 ($FeCl_3$) proporcionaram os melhores resultados de resistência a compressão quando comparadas com amostras que utilizaram partículas de madeira tratadas em soluções contendo aditivo A_1 ($CaCl_2$). No entanto um estudo mais conclusivo sobre o efeito destes tratamentos poderá ser obtido através do uso de soluções de tratamentos que forneçam quantidades molares equivalentes dos cátions avaliados.

Considerando o uso de aditivos isoladamente, observa-se também na Tabela 4.8, que o aditivo A_3 ($FeCl_3$), quando comparado com o aditivo A_1 ($CaCl_2$) proporcionou os melhores resultados de resistência a compressão, sem no entanto ter causado significativa alterações no índice de inibição.

Como verificado, as condições que contem o aditivo A_3 como tratamento ou aditivo, que apresentaram em geral os piores índices de inibição, nos ensaios de compressão apresentaram valores em geral melhores que às aquelas condições com melhores comportamentos de índice de inibição. Tal fato confirma a importância de se fazer os ensaios mecânicos mesmo para condições de inibição potencialmente desfavoráveis.

Cabe mencionar que para maioria das condições, apresentadas nas Tabelas 4.7 e 4.8 como ilustra a Figura 4.19, e as Figura de H1 a H7 no APÊNDICE H, a resistência a compressão no regime elástico do material atingiu um mínimo de 2 MPa, valor este superior ao valor mínimo (1 MPa) estabelecido pela NBR 7171 [55], para blocos de vedação comuns (classe 10).

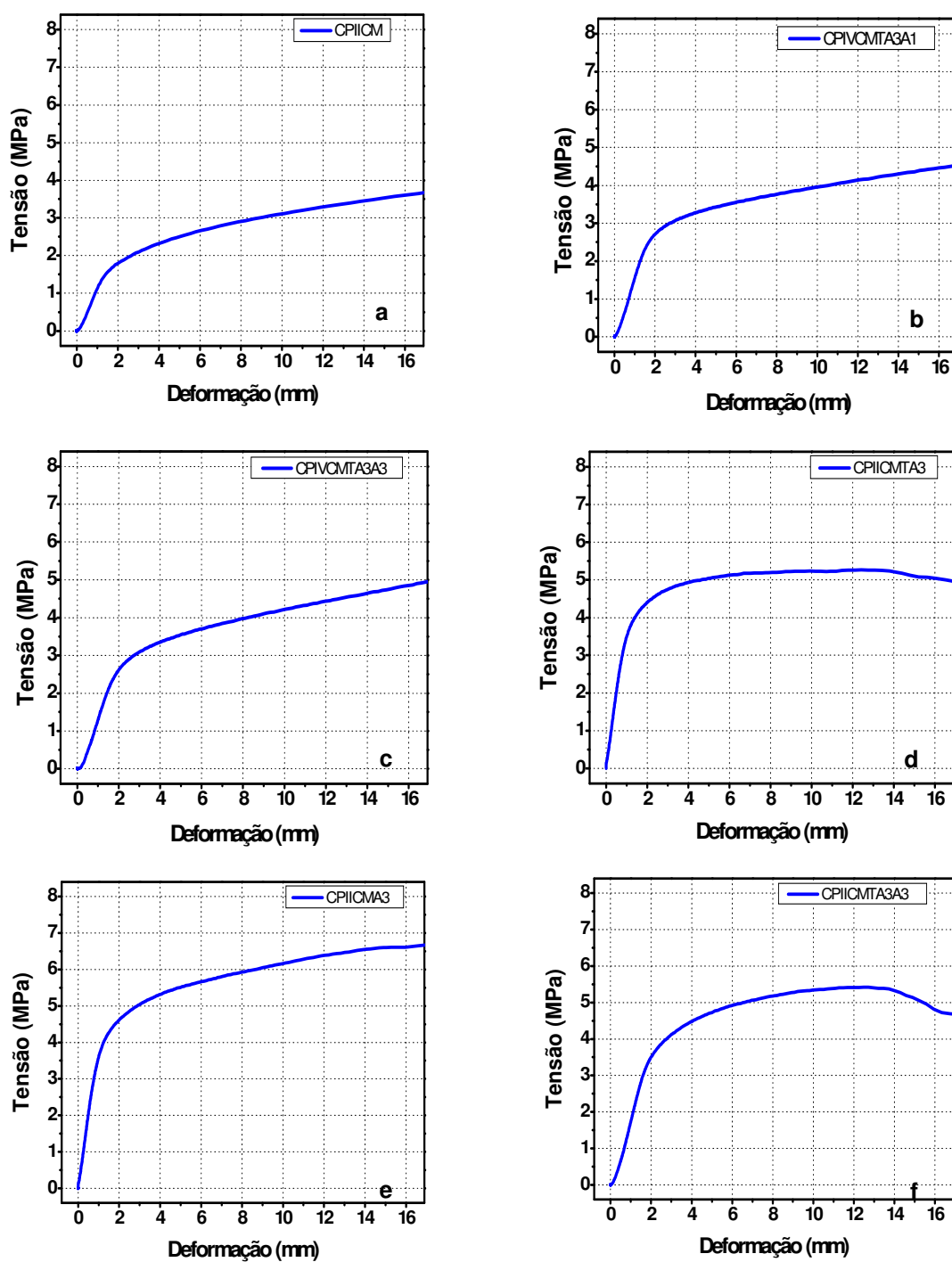


Figura 4.19 Resistência à compressão para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm^2 , nas condições: **a**-(CM / CP II / 1:0,66); **b**-(CMTA₃A₁ / CP IV / 1:0,66); **c**-(CMTA₃A₃ / CP IV / 1:0,66); **d**-(CMTA₃ / CP II / 1:0,66); **e**-(CMA₃ / CP II / 1:0,66); **f**-(CMTA₃A₃ / CP II / 1:0,66).

As constatações verificadas para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66, foram também verificadas para corpos de prova confeccionados no traço 1:1, apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 sendo que a resistência diminuiu. Cabe ainda mencionar, que para a maioria das condições, a resistência a compressão no regime elástico também diminuiu, quase não ultrapassando 1 MPa, sendo que para o cimento CP II este valor foi melhor, chegando a ultrapassar 1,5 MPa como observado na Figura 4.20, e nas Figuras de H7 a H11 mostradas no APÊNDICE H. Tal fato já era esperado, uma vez que a resistência desse material é de responsabilidade do aglomerante, e esta varia diretamente proporcional a quantidade deste.

Tabela 4.9 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², no traço 1:1 e com cimento CP IV.

Cimento CP IV - TRAÇO 1:1						
Resist ência (MPa)	Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO				
		CMA ₁ -4,17	CMTA ₁ A ₁ -8,35	CMTA ₁ A ₃ 1,85	CMTA ₃ A ₁ 0,87	CMTA ₃ A ₃ -1,72
	Cp1	3,78	3,92	3,88	3,78	3,78
	Cp2	3,67	4,00	4,25	4,17	3,98
	Cp3	4,51	3,98	4,26	3,58	3,70
	Cp4	3,91	4,10	4,08	3,69	-
	Cp5	-	3,94	4,34	-	-
	Média/ Desvio padrão	3,97 / 0,37	3,99 / 0,07	4,16 / 0,18	3,80 / 0,26	3,82 / 0,14

CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Tabela 4.10 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 kgf/cm², no traço 1:1 e com cimento CP II.

Cimento CP II - TRAÇO 1:1						
Resist ência (MPa)	Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO				
		CMA ₁ -8,34	CMTA ₁ A ₁ -9,16	CMTA ₁ A ₃ 0,45	CMTA ₃ A ₁ -6,66	CMTA ₃ A ₃ 0,22
	Cp1	4,00	3,68	3,75	4,01	4,55
	Cp2	3,69	3,56	3,60	4,61	4,68
	Cp3	4,10	3,72	3,91	4,28	4,63
	Cp4	3,99	3,51	3,73	4,57	4,93
	Cp5	-	3,72	3,80	4,39	5,04
	Média/ Desvio padrão	3,95 / 0,18	3,64 / 0,09	3,72 / 0,11	4,37 / 0,24	4,77 / 0,21

CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

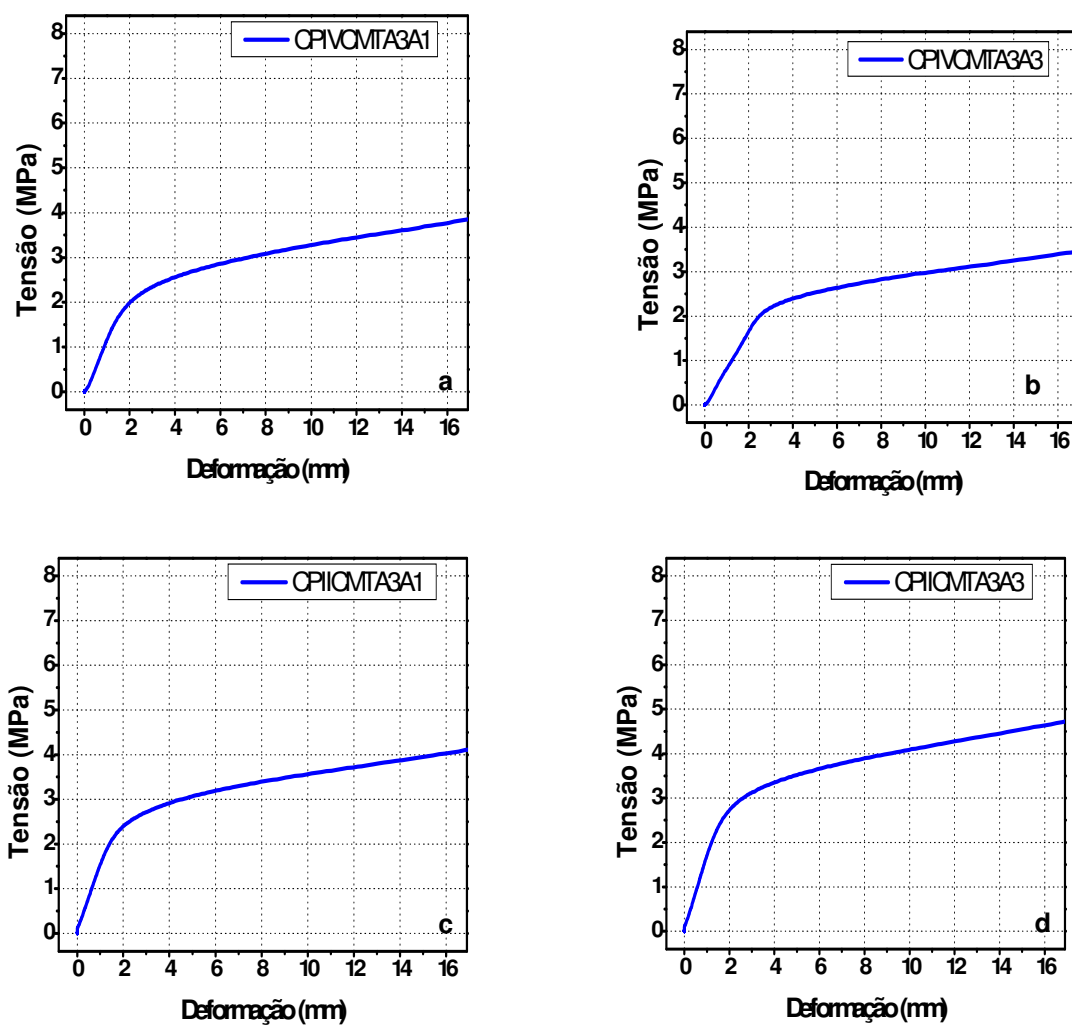


Figura 4.20 Resistência à compressão para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kg/cm^2 , nas condições: **a**-(CMTA₃A₁ / CP IV / 1:1); **b**-(CMTA₃A₃ / CP IV / 1:1); **c**-(CMTA₃A₁ / CP II / 1:1); **d**-(CMTA₃A₃ / CP II / 1:1).

4.9 Resistência à flexão

As Tabelas 4.11 e 4.12 mostram os valores de resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66 para os cimentos CP IV e CPII respectivamente.

Tabela 4.11 Resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66 e com cimento CP IV.

Cimento CP IV - TRAÇO 1:0,66					
	Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO			
		CMTA ₁ A ₁	CMTA ₃ A ₁	CMTA ₁ A ₃	CMTA ₃ A ₃
		-8,35	0,87	1,85	-1,72
Resistência à Flexão (MPa)	Cp1	8,00	8,38	7,81	7,23
	Cp2	7,71	8,54	7,62	6,80
	Cp3	8,72	7,32	8,70	6,30
	Cp4	7,88	7,50	7,68	6,50
	Média/Desvio padrão	8,08 / 0,44	7,94 / 0,61	7,95 / 0,50	6,71 / 0,40

CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Comparando os dados das Tabelas 4.11 e 4.12, verifica-se um ligeira aumento na resistência a flexão para corpos de prova confeccionados com cimento CP II. Fato este que vem corroborar com os testes de calor de hidratação, uma vez que o cimento CP II sempre proporcionou melhores resultados.

Assim como para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66, percebeu-se que o cimento CP II também proporcionou os melhores resultados para corpos de prova confeccionados no traço 1:1 mostrados na Tabela 4.13, porém estes valores foram bastantes diferentes quando comparados com os do cimento CP IV.

Tabela 4.12 Resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:0,66 e com cimento CP II.

Cimento CP II - TRAÇO 1:0,66					
Resistência à Flexão (MPa)	Corpo de prova	CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO			
		CMTA ₁ A ₁ -9,16	CMTA ₃ A ₁ -6,66	CMTA ₁ A ₃ 0,45	CMTA ₃ A ₃ 0,22
	Cp1	7,30	8,63	9,28	7,85
	Cp2	6,80	7,70	8,56	7,70
	Cp3	7,30	8,87	7,75	8,17
	Cp4	7,36	7,71	8,02	6,66
	Média/Desvio padrão	7,20 / 0,26	8,23 / 0,61	8,40 / 0,67	7,59 / 0,65

CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Tabela 4.13 Resistência à flexão para corpos de prova confeccionados no traço 1:1 e com cimentos CP IV e CP II.

TRAÇO 1:1					
Resistência à Flexão (MPa)	Corpo de prova	CP IV		CP II	
		CONDIÇÃO - ÍNDICE DE INIBIÇÃO			
		CMTA ₃ A ₁ 0,87	CMTA ₃ A ₃ -1,72	CMTA ₁ A ₁ -8,35	CMTA ₁ A ₃ 1,85
	Cp1	6,04	3,58	9,66	8,03
	Cp2	5,46	3,69	8,05	6,90
Cp3	5,16	3,55	8,02	7,07	
Cp4	5,42	3,70	7,93	7,98	
Média/Desvio padrão	5,52 / 0,37	3,63 / 0,08	8,42 / 0,83	7,49 / 0,59	

CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Percebeu-se também, que o aumento do teor de partículas de madeira, diferentemente dos testes de compressão, não proporcionou diferenças significativas nos valores de resistência à flexão dos corpos de prova confeccionados com cimento CPII. Porém tal fato não foi observado em corpos de prova confeccionados com cimento CP IV, que apresentaram valores de resistência à flexão bem inferior com o aumento do teor de partículas.

Finalmente a correlação entre os valores de resistência a flexão e valores de resistência a compressão, e os tipos de aditivos e tratamentos utilizados não puderam ser bem estabelecidos devido a diferenças das quantidades de cátions presentes nas diferentes condições ensaiadas

4.10 Absorção de água dos corpos de prova

A Figura 4.21 indica a absorção de água dos corpos de prova.

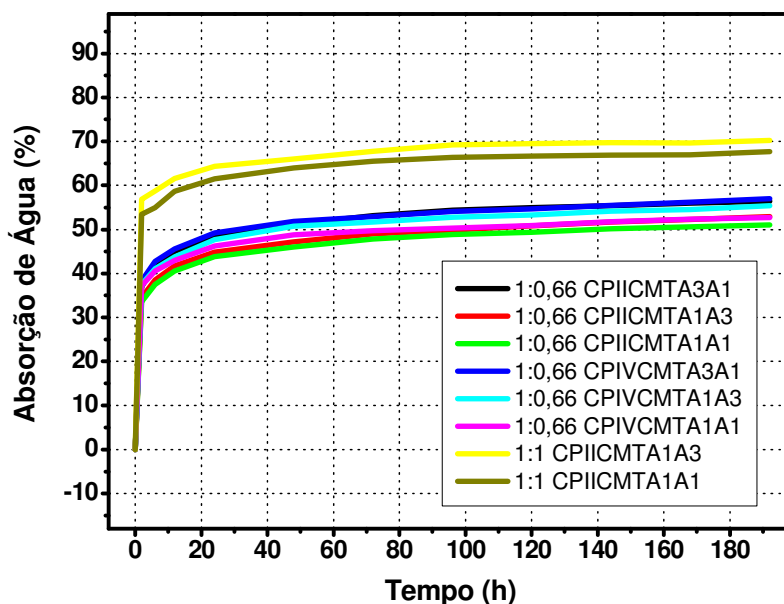


Figura 4.21 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados nos traços 1:0,66 e 1:1. Maiores valores de absorção de água referem-se ao traço 1:1.

Verifica-se que o presente material é altamente higroscópico tendo absorvido um valor mínimo de 51,07% após 192 h de imersão, para o traço 1:0,66 e um valor máximo, 70,2% para o traço 1:1. Tal fato pode ser explicado pela grande capacidade de absorção de água das partículas vegetais, como mostrado na Tabela G1 no APÊNDICE G, associado a uma porosidade aberta.

Observou-se que não houve variação significativa, quando se observou um mesmo traço, independente da condição empregada. Porém, quando se alterou o traço, verificaram-se mudanças significativas no comportamento de absorção de água (Figura 4.21) e Tabelas de I1 a I8 no APÊNDICE I, fato este também reportado por outros pesquisadores [12,56]. Tal fato está relacionado, tanto com o aumento da fase de menor densidade (partículas de madeira), bem como com a redução da camada de aglomerante formada sobre as partículas vegetais, o que as deixariam mais expostas à ação da água.

A velocidade de absorção de água pelo compósito foi extremamente rápida independente da condição avaliada, tendo sido observado um valor mínimo de absorção de 33,60% (condição CMTA₁A₁ / CP II / 1:0,66) para as primeiras 2 h; e um valor máximo de absorção de 56,82% (condição CMTA₁A₃ / CP II / 1:1), no mesmo intervalo de tempo, mostrando desta forma a natureza higroscópica do material.

Os resultados indicaram que a condição CMTA₁A₁ proporcionou melhor comportamento em relação à absorção de água, ou seja, foi a condição que menos absorveu água, já a condição CMTA₃A₁ proporcionou o pior comportamento de absorção de água, sendo esta a que mais absorveu água.

Os valores de absorção de água obtidos na literatura [12], em corpos de prova confeccionados com menores teores de partículas de madeira (traço 1:0,5:1,53), foi em média de 83,8%, valor este superior aos valores de absorção de água observados no presente trabalho, para corpos de prova confeccionados com maiores teores de partículas de madeira (traços 1:0,66 e 1:1). Tal fato pode estar relacionado à carga de prensagem utilizada para confecção dos corpos de prova ou ainda a composição granulométrica das

partículas utilizadas para a confecção destes corpos, fato este último corroborado pela literatura [51].

4.11 Condutividade térmica

Assim como para o ensaio de calor de hidratação, foi construído um sistema para realização de medidas de condutividade térmica pela técnica do fio quente paralelo.

A Figura 3.4 no item 3.2.7.4 mostra uma visão geral deste sistema, o qual foi constituído por uma fonte de tensão contínua variável, elemento resistivo de nikrothal, utilizado como fio quente, Termopares tipo K, que foram acoplados a um sistema digital de aquisição de dados (TC 08 da PICO Technology), com 8 canais de entrada, compensação automática da temperatura ambiente e software específico para aquisição dos dados via microcomputador. Este sistema consistia em dois arranjos idênticos, uma para ajustar os parâmetros de ensaio (tensão e correntes a serem utilizadas) e outro para se efetuar as medidas propriamente ditas. Um sistema de switch permitia passar de um arranjo para outro sem causar nenhuma alteração no sistema. No sistema de ajuste era monitorada a temperatura do fio quente durante os ensaios.

A Tabela 4.14, mostra os valores médios de condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica, para corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm², nos traços 1:0,66 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II. Nas Tabelas J1 e J2 do APÊNDICE J, estão os dados brutos para estas propriedades (condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica).

Nesta Tabela 4.14, observa-se que os valores de condutividade térmica exibiram uma dependência com relação aos traços utilizados, apresentando valores inversamente proporcionais ao conteúdo de partículas de madeira empregadas. Ou seja, quanto maior a quantidade de madeira, menor a condutividade térmica do material.

Tabela 4.14 Valores médios de condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico para corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm², nos traços 1,5:1 e 1:1 e com cimentos CP IV e CP II.

CONDIÇÃO	Condutividade térmica (k) (W/mK)		Difusividade térmica (α) (m ² /s)		Calor específico (Cp) (J/kgK)		Densidade (kg/m ³)	Coeficiente de correlação R ²
	MÉDIA	SD	MÉDIA	SD	MÉDIA	SD		MÉDIA
1 : 1 CII CMA1	0,2045	0,00060	2,2973E-7	0,09807E-7	928,40	42,36	960	0,9992
1 : 1 CII CMTA1A1	0,2354	0,01900	2,1677E-7	0,12198E-7	1130,18	30,69	960	0,9992
1 : 1 CII CMA3	0,2398	0,00904	3,0520E-7	0,09037E-7	822,72	0,58	960	0,9991
1 : 1 CII CMTA3A3	0,2268	0,00520	2,4703E-7	0,24331E-7	969,65	58,97	960	0,9997
1 : 1 CII CMA1	0,2453	0,00001	3,8346E-7	0,16454E-7	674,57	39,46	950	0,9993
1,5:1 CII CMA1	0,2874	0,02216	3,8442E-7	0,24280E-7	721,44	55,14	1100	0,9991
1,5:1 CII CMA1	0,3084	0,01377	3,5489E-7	0,35472E-7	802,52	38,18	1080	0,9988
1,5:1 CII CMA3	0,2829	0,01226	2,8985E-7	0,25873E-7	960,61	47,48	1070	0,9992

k - condutividade térmica, α - difusividade térmica, Cp - calor específico, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Pode-se ainda observar, que para um mesmo traço, independente da condição, os valores médios sofreram pouca variação demonstrando assim que não houve influencia dos outros parâmetros (tipo de cimento, aditivos etc).

O decréscimo da condutividade térmica com o aumento do conteúdo de madeira está ligado ao aumento na porosidade do material conferida pela madeira, e também a baixa condutividade térmica da madeira [39].

Da Tabela 4.14, foi verificado que os valores de calor específico demonstraram uma tendência de aumento com o aumento do conteúdo de madeira. Já para a difusividade térmica mostrada na Tabela 4.14 a tendência foi de redução com o aumento do conteúdo de madeira. Tais fatos não têm sido reportados pela literatura, cabendo maiores estudos para se chegar a uma conclusão.

Para se fazer uma estimativa da qualidade dos ajustes mostrados na Figura 4.22, e Figuras de K1 a K4 no APÊNDICE K, estão mostrados na Tabela 4.14 os coeficientes de correlação para cada condição. Sabendo-se que a correlação perfeita corresponde a $R = 1$, conclui-se que os resultados são bastante confiáveis.

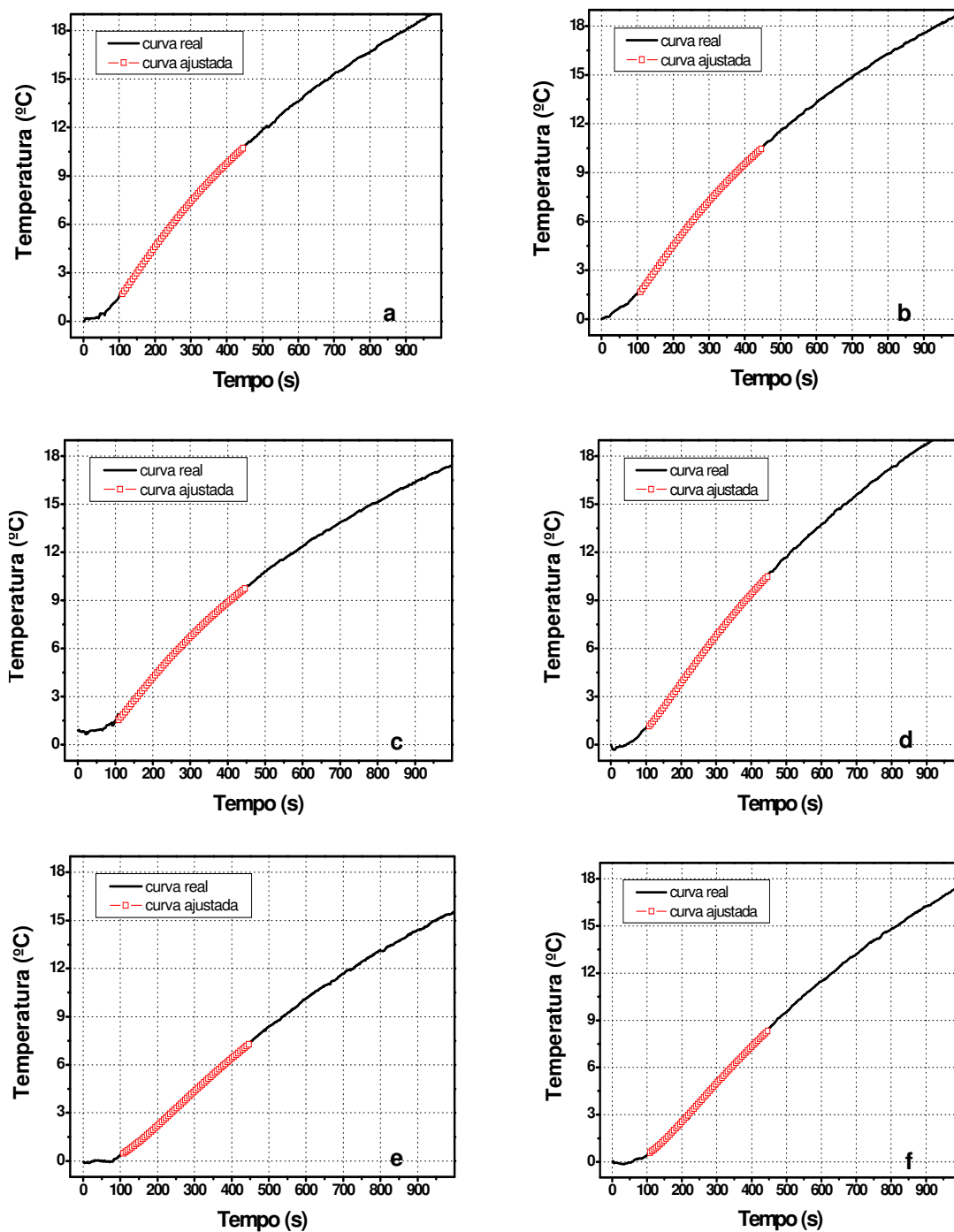


Figura 4.22 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², nas condições: **a**-(CMA₁ / CP IV / 1:0,66); **b**-(CMA₁ / CP II / 1:0,66); **c**-(CMTA₁A₁ / CP II / 1:0,66); **d**-(CMA₁ / CP IV / 1:1); **e**-(CMTA₁A₁ / CP II / 1:1); **f**-(CMTA₃A₃ / CP II / 1:1).

5 CONCLUSÕES

A Madeira *Ficus* sp - Moraceae pode ser uma fonte alternativa para produção de compósitos cimento-madeira. Foi demonstrado que a resistência à compressão desse compósito não está diretamente relacionado com o índice de inibição proposto por Hosftrand, conclusão esta também reportada por outros pesquisadores.

No presente trabalho foi obtido compósito cimento-madeira utilizando-se o traço de 1:1 ou seja, (50% de madeira e 50% de cimento, em peso) com propriedades mecânicas adequadas para aplicações em moradias, dentre outras possíveis aplicações. Cabe ressaltar que não há informações na literatura sobre a obtenção de tais compósitos com a proporção de madeira utilizada no presente trabalho.

O material compósito obtido apresentou características adequadas para o uso como material de construção. Sua boa condição de acabamento superficial aliada à baixa condutividade térmica apresentada, permite o seu uso para placas de revestimento, tanto para fins estéticos, como para fins de isolamento térmica em moradias, e em aplicações na indústria moveleira.

Apesar da resistência a compressão destes compósitos não estarem diretamente relacionados com o índice de inibição obtidos em medidas de calor de hidratação, estas medidas podem ser utilizadas para se estimar as dosagens de aditivos a serem empregadas. Neste caso a dosagem utilizada deve ser o suficiente para causar um $t_{\max}$ igual ou inferior ao valor de $t_{\max}$ medido para a pasta de cimento puro.

Os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos usando FeCl_3 e CaCl_2 tanto como aditivo acelerador (adicionando direto na pasta cimentícia) como na forma de solução aquosa de tratamento para as fibras de madeira.

Quando comparados os efeitos do uso de aditivos nas misturas cimentícias com o uso de partículas de madeira tratadas em soluções aquosas contendo tais aditivos, adotando-se as dosagens frequentemente encontradas na literatura, o efeito da adição direta de aditivos foi dominante sobre o efeito

do uso de soluções químicas para tratamento das fibras de madeira, o que foi atribuído ao fato de nas condições adotadas, as soluções de tratamentos forneciam uma quantidade de espécies iônicas bem inferiores à quantidade disponibilizada pela adição direta de aditivos.

Quando comparados o uso de aditivos com o uso de soluções químicas de tratamentos das partículas de madeiras, onde ambas as condições continham quantidades molares equivalentes de cátions, apenas uma ligeira diferença foi observada em favor do uso de soluções de tratamentos. Tal fato foi atribuído ao fato de que com o uso de tratamento das partículas, todos os íons estão presentes nas cavidades das partículas de madeira ou em sua superfície; enquanto que com a adição direta de aditivos na pasta cimentícia, as espécies iônicas se distribuem sobre toda a massa envolvida.

Considerando a pequena diferença observada entre o uso de aditivos ou de soluções aquosa para os tratamentos das partículas de madeira, ambas contendo quantidades equivalentes de cátions, por razões ambientais, deve-se optar pelo o uso direto do aditivo sobre a pasta cimentícia, visto que neste caso não há o resíduo das soluções de tratamentos que necessitam de cuidados especiais para serem descartadas.

Devido a grande capacidade para absorção de água das partículas de madeira, é necessário trabalhar o processamento destas nas condições parcialmente saturadas com água, a fim de se estabelecer uma razão água/cimento constante. Embora as medidas de calor de hidratação não detectaram diferenças significativas entre o uso de partículas saturadas de água ou o uso de uma quantidade adicional de água para compensar a água a ser absorvida pela madeira, do ponto de vista prático, este ultimo procedimento, dificulta a homogeneização da mistura cimentícia.

Quando comparados o efeito de diferentes tipos de aditivos estes devem ser realizados considerando-se quantidades equivalentes das espécies iônicas envolvidas.

Apesar do índice de inibição poder indicar a compatibilidade cimento-madeira, testes mecânicos são necessários para determinar as condições mais adequadas de processamento de compósito cimento-madeira. Isto se deve ao

fato da mistura cimento-madeira-água mais aditivo poder apresentar valores de $t_{\max}$ bem próximos aos valores de $t_{\max}$ da mistura cimentícia pura, o que acarretaria um índice de inibição não muito expressivo, conforme observado para o caso do aditivo FeCl_3 . Tal situação é possível de ocorrer quando o aditivo age diretamente desativando os extrativos vegetais, sem necessariamente acelerar a reação de cura da pasta cimentícia.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Verificar qual a menor adição de aditivo, que atua de forma eficaz proporcionando boas propriedades mecânicas;
2. Avaliar influência da distribuição de tamanho de partículas nas propriedades do compósito;
3. Avaliar a influência da prensagem nas propriedades destes compósitos;
4. Investigar a evolução das fases formadas durante a hidratação de misturas cimento-madeira por medidas in situ de difração de raios-X;
5. Estabelecer relação entre pressão de trabalho e quantidade de madeira na densidade das placas;
6. Estudar a durabilidade destes compósitos;
7. Por razões ambientais, pesquisar aglomerantes hidráulicos minerais que permitam o processamento destes compósitos, minimizando ou eliminando, o uso do cimento Portland;
8. Avaliar outras fontes de fibras vegetais;

7 REFERENCIAS

- 1 HERMANSSON, Lars-Anders. Cement-bonded straw slabs: a feasibility Study. **Building Issues**, v.5, n.2, p. 3-17, 1993.
- 2 PEHANICH, J. L. et al. Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 59-65, 2004.
- 3 SEMPLE, K. E. et al. Compatibility of eight temperate Australian *Eucalyptus* species with portland cement. **Holz als Roh un Werkstoff**, n. 58, p. 315-316, 2000.
- 4 LOPES, Y. L. V. et al. Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 111-122, abr. 2005.
- 5 JORGE, F. C. et al.. Wood cement composites: a review. **Holz Roh Werkst**, n. 62, p. 370-377, 2004.
- 6 JOHANSSON, E. Woodwool Slabs: manufacture, properties and use. **Building Issues**, v.6, n.3, p. 3-26, 1994.
- 7 SMITH, W. F. **Princípio de ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. Portugal: Mc Graw-Hill, 1998, 883 p.
- 8 ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. 3. th ed. Boston: PSW Publishing company, 1994, 813 p.
- 9 ALVES, J. D. **Materiais de construção**. 5. ed. São Paulo: Nobel, 1980. 327p.

- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo: 2002. 28p.
- 11 CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de ativação dos concretos**: experimentação e modelagem. 2002. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programas de Pós-graduação de Engenharia , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro..
- 12 GRANDI, L. A. C. **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra**. 1995. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.
- 13 YOUNGQUIST, J. A. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 10 - Wood-based Composites and Panel Products, 1999. 463f.
- 14 KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. rev. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005.
- 15 SILVA, A. N. et al. Biomassa vegetal para uso em chapas de cimento-madeira. **Revista Universidade Rural**, v. 22, n.2, p. 199-203, 2002, Suplemento.
- 16 SEMPLE, K. E.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. The suitability of five Western Australian mallee eucalypt species for wood-cement composites, **Industrial Crops and Products**, v. 16, p. 89-100, 2002.
- 17 ALMEIDA, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TEIXEIRA, D. E. Utilization of the coconut shell of babaçu (*Orbignya* sp.) to produce cement-bonded particleboard. **Bioresource Technology**, v.85, p. 159-163, 2002.

- 18 LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S.; LELIS, R. C. C. Efeito Inibidor de Cinco Espécies Florestais sobre a Cura do Compósito Cimento-Madeira. **Floresta e Ambiente**, v.6, n.1, p.75-82, jan./dez. 1999.
- 19 BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito eucalyptus grandis-cimento portland. **Scientia Forestalis**, n.68, p. 150-161, jun. 2004.
- 20 SANDERMANN, W.; PREUSSER, H. J.; SCHWIENS, W. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. **Holzforschung**, v.14, n.3, p. 70-77, 1960.
- 21 WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Japan Wood Research Society**, v.46, p. 444-451, 2000.
- 22 TEIXEIRA, D. E. et al. Características de chapas de cimento-madeira com partículas de seringueira (*hevea brasiliensis* Müell. arg.) tratadas com CCA. **Floresta e Ambiente**, v.8, n.1, p. 18-26, jan./dez. 2001.
- 23 OKINO, E. Y. A. et al. Chapa aglomerada de cimento-madeira de hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore**, v.28, n.3, p. 451-457, 2004.
- 24 SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of portland cement by the heartwood of *Acácia mangiun*. **Proceedings of Wood Cement Composites in the Asia-Pacific Region Australia**, v.1, p. 29-38, ed. P. D. EVANS, December 2000.
- 25 BATISTA, A. M. A Influencia do tratamento em compósitos de cimento madeira. **Projeções**, v. 19/20, p. 1-3, jan./dez. 2001/2002.

- 26 LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Efeito do tratamento das partículas de *Eucalyptus dunnii* (Maid), da variação da relação madeira-cimento e do uso de aditivos sobre as propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira-cimento. **Cerne**, v.6, n.1, p. 68-76, 2000.
- 27 OLORUNNISOLA, A. O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundi.orum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. **Cement & Concrete Composites**, v.30, p. 37-43, 2008.
- 28 BLANKENHORN, P. R. et al. Effects of fiber surface treatments on mechanical properties of wood fiber cement composites. **Cement and Concrete Research**, V.31, p. 1049-1055, 2001.
- 29 WEI, Y. M.; TOMITA, B. Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards. **Japan Wood Research Society**, v.47, p. 437-444, 2001.
- 30 COATANLEM, P.; JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F. Lightweight wood chipping concrete durability. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 776–781, November, 2005.
- 31 SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites**, v.21, p. 49-57, 1999.
- 32 BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Minas Gerais: LTC, 2000. 447p.
- 33 JERGA, J. Phisico-mechanical properties of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v.18, p. 645-652, 2004.

- 34 SIMATUPANG, M. H. et al. Investigations on the influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composite. **Cement & concrete composites**, v.17, p. 187-197, 1995.
- 35 QI, H.; COOPER, P. A.; WAN, H. Effect of carbon dioxide injection on production of wood cement composite from waste medium density fiberboard (MDF). **Waste Management**, v.26, p. 509-515, 2006.
- 36 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12006 - **Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant - Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 1990.
- 37 EVANS, P. D. Summary: An Introduction to wood-cement composites. **Proceedings of Wood Cement Composites in the Asia-Pacific Region Australia**, v.1, p. 7-10, ed. P. D. EVANS, December 2000.
- 38 SUDIN, R.; SWAMY, N. bamboo and wood fiber cement composites for sustainable infrastructure regeneration. **Journal Materials Science**, v.41, p. 6917-6924, 2006.
- 39 RIM, K. A. et al. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. **Cement & Concrete Composite**, v.21, p. 269-276, 1999.
- 40 MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

- 41 EPEX LTDA. Climatex - Placa Cimentícia de Madeira Mineralizada. Disponível em: <<http://www.climatexforros.com.br/>>. Acesso em: 27 set. 2007.
- 42 FAN, M. Z. et al. Dimensional instability of cement-bonded particleboard mechanisms of deformation of CBPB. **Cement and Concrete Research**, v.29, p. 923-932, 1999.
- 43 BLANKENHORN, P. R. et al. Temperature and moisture effects on selected properties of wood fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, v.29, p. 737-741, 1999.
- 44 FAN, M. Z. et al. Dimensional instability of cement-bonded particleboard: The effect of surface coating. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1189-1197, 2004.
- 45 SANTOS, W. N. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, v.48, n.306, p. 86-91, abr/mai/jun 2002.
- 46 SANTOS, W. N. **Contribuição ao estudo da condutividade térmica do material cerâmico concreto refratário utilizando a técnica de fio quente com ajuste por regressão não linear**. 1988. 149f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.
- 47 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 - **Agregado, Determinação da composição granulométrica. Especificação**, Rio de Janeiro-RJ, 1987.
- 48 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939 - **Agregados, determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Especificação**, Rio de Janeiro-RJ, 1987.

- 49 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 - **Concreto, determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão - Método de ensaio**, Rio de Janeiro-RJ, 1987.
- 50 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 - **Cimento Portland, determinação da resistência à compressão. Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 1996.
- 51 ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.
- 52 STANCATO, A. C. **Determinação da Condutividade Térmica e da Resistência Mecânica em Argamassa Leve**. 2000. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.
- 53 WEI, Y. M. et al. Hydration behavior and compressive strength of cement mixed with exploded wood fiber strand obtained by the water-vapor explosion process. **Japan Wood Research Society**, v.49, p. 317-326, 2003.
- 54 SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 55 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7171 - **Bloco cerâmico para alvenaria**, Rio de Janeiro-RJ, 1992.

- 56 MARTINS, S. C. F. **Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu**. 2002. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

APÊNDICE A

Figura A1 Processo de produção e classificação das partículas de madeira.

APÊNDICE B



Figura B1 Etapas do ensaio de absorção de água das partículas de madeira.

APÊNDICE C



Figura C1 Peças produzidas nos testes iniciais, que serviram para determinação dos parâmetros de processamento do compósito produzido nesta pesquisa.

APÊNDICE D



Figura D1 Rompimento de corpos de prova em compressão.

APÊNDICE E



Figura E1 Rompimento de corpos de prova em flexão.

APÊNDICE F

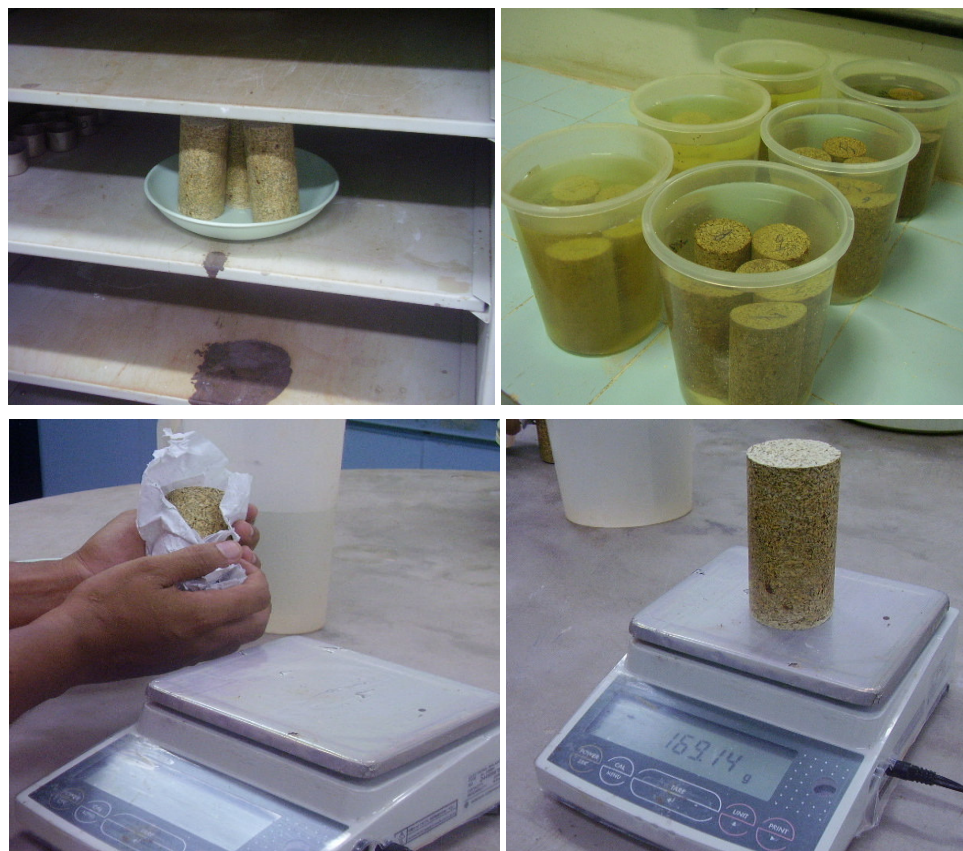


Figura F1 Etapas do ensaio de absorção de água dos corpos de prova.

APÊNDICE G

Tabela G1 Absorção de água das partículas de madeira.

Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)				Absorção instantânea (%) /Desvio padrão
	1	2	3	4	
0	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
0,083	272,28	275,21	270,06	268,16	171,43 ± 3,03
0,25	280,16	278,45	278,02	273,25	177,47 ± 2,96
0,75	281,15	282,08	284,30	280,39	181,98 ± 1,69
1,75	289,03	300,91	288,28	285,13	190,84 ± 6,92
2,75	294,29	302,04	295,71	300,09	198,03 ± 3,64
3,75	298,92	306,08	295,68	300,15	200,21 ± 4,34
4,75	305,66	307,75	303,30	302,86	204,89 ± 2,26
5,75	307,42	312,33	304,19	298,79	205,68 ± 5,68
6,75	306,18	310,02	307,58	307,44	207,80 ± 1,60
7,75	310,80	312,32	308,45	312,36	210,98 ± 1,84
31,75	311,38	316,14	312,28	310,78	212,64 ± 2,41
55,75	313,26	315,91	309,99	314,68	213,46 ± 2,55
79,75	315,45	316,50	310,97	316,36	214,82 ± 2,61
103,75	315,99	316,51	312,21	314,28	214,75 ± 1,94
127,75	313,90	314,24	311,33	312,49	212,99 ± 1,34
151,75	316,62	316,53	308,89	309,98	213,01 ± 4,15
175,75	317,77	317,08	315,84	309,77	215,11 ± 3,65
199,75	318,28	319,10	314,47	314,82	216,67 ± 2,36
Absorção de Água (%)	218,28	219,10	214,47	214,82	-
Absorção de Água (%) (Média)/Desvio padrão	216,67 ± 2,36				-

APÊNDICE H

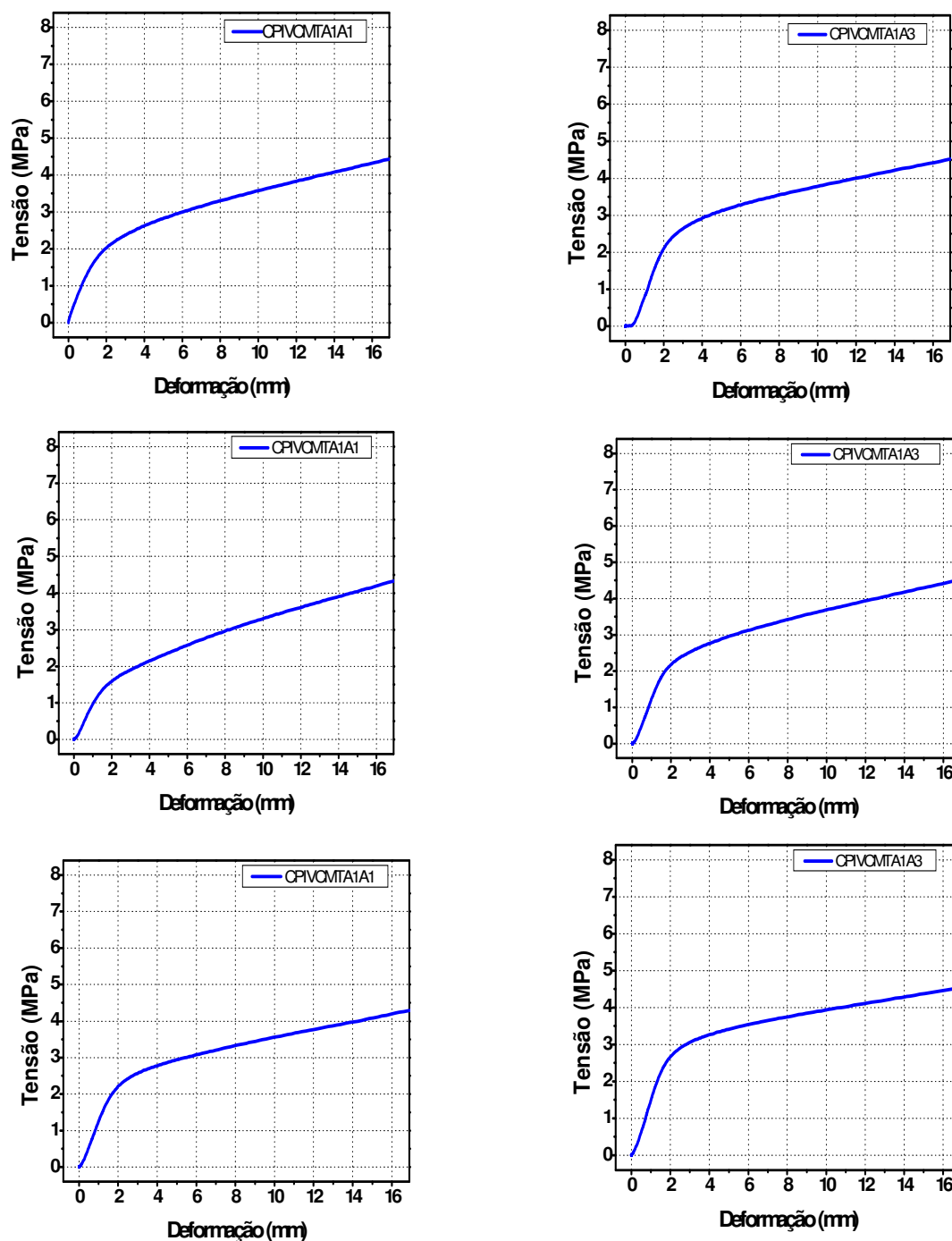


Figura H1 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:0,66, nas condições CMTA₁A₁ (esquerda) e CMTA₁A₃ (direita).

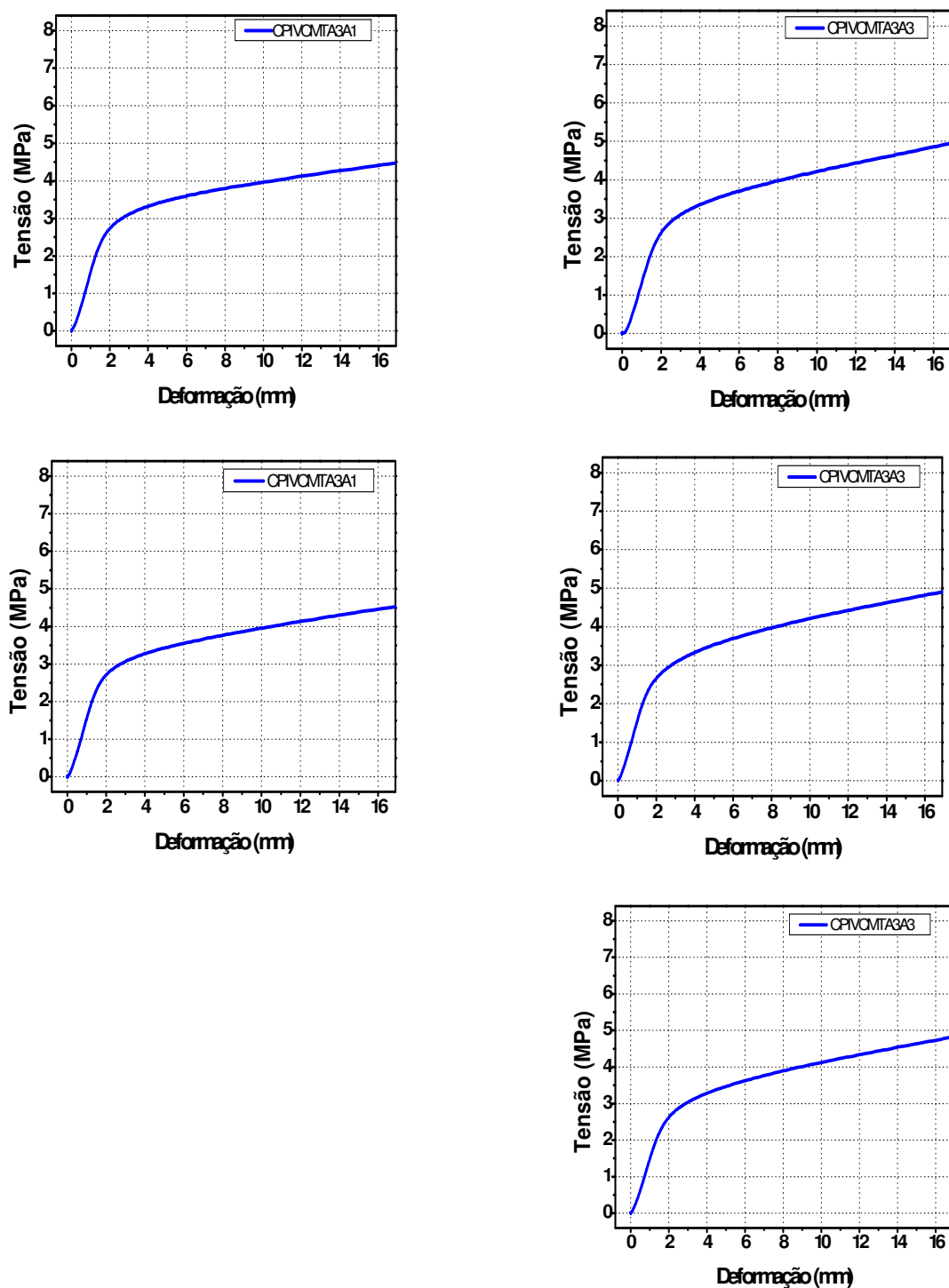


Figura H2 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:0,66, nas condições CMTA₃A₁ (esquerda) e CMTA₃A₃ (direita).

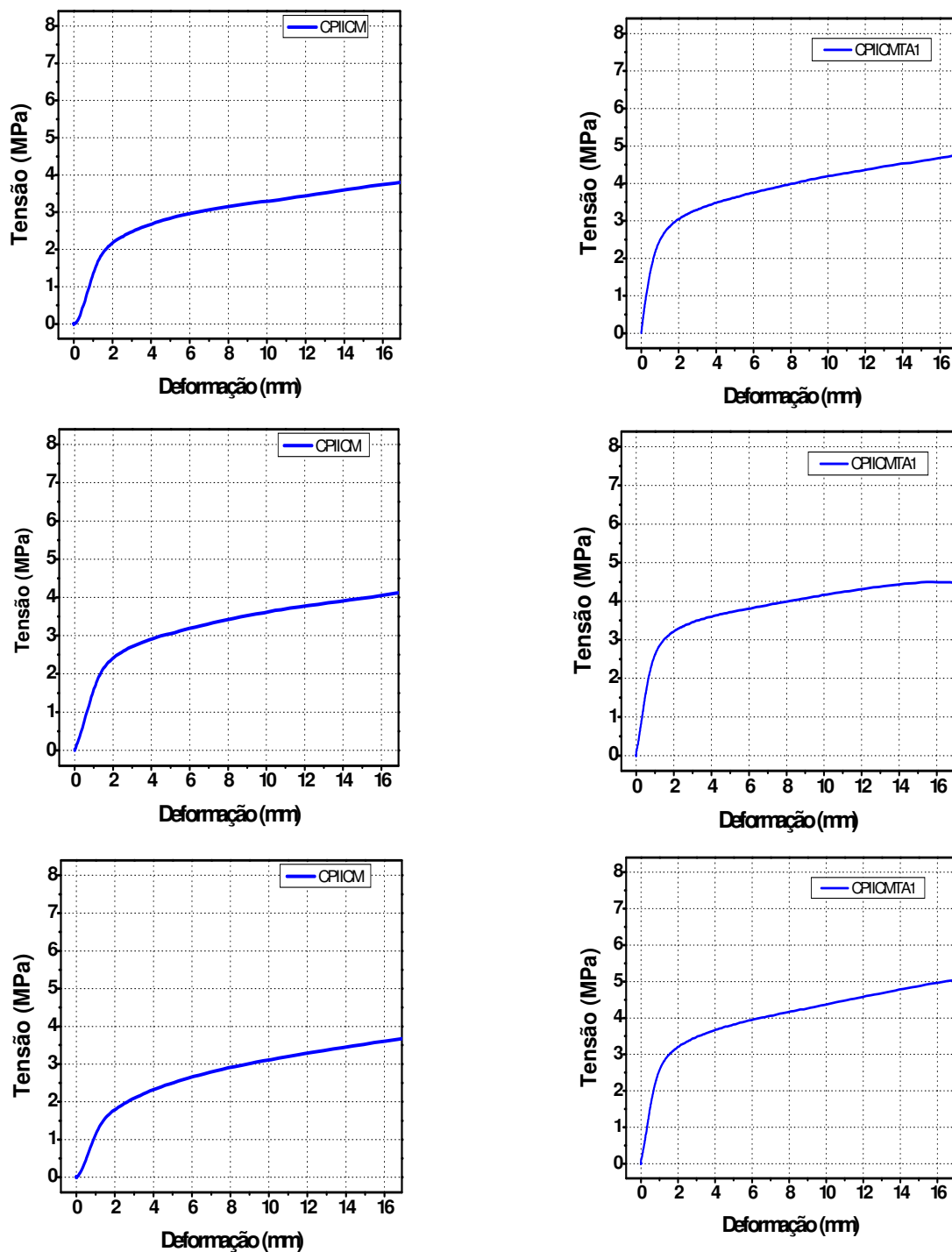


Figura H3 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm^2 , cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CM (esquerda) e CMTA₁(direita).

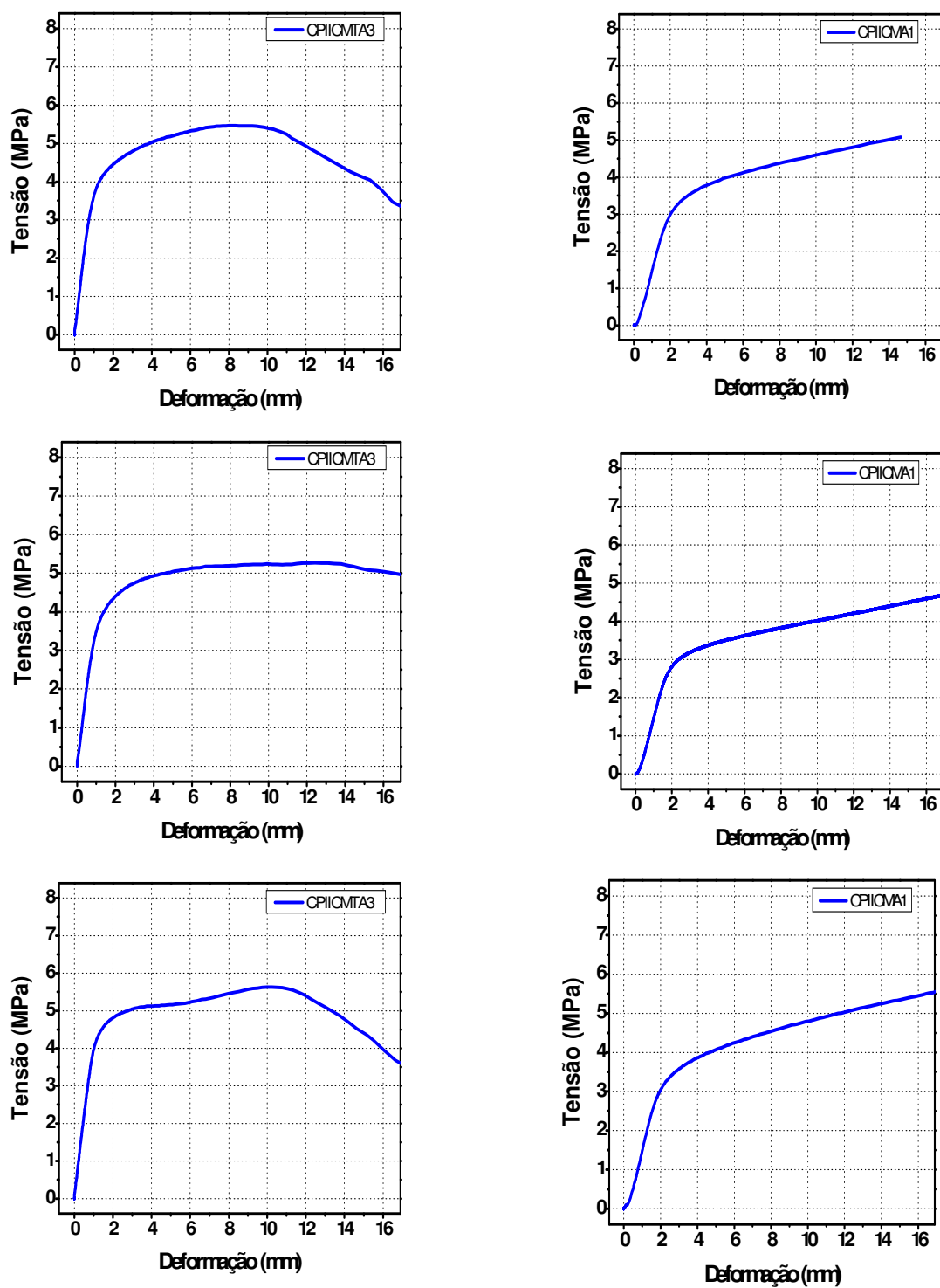


Figura H4 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA₃ (esquerda) e CMA₁ (direita).

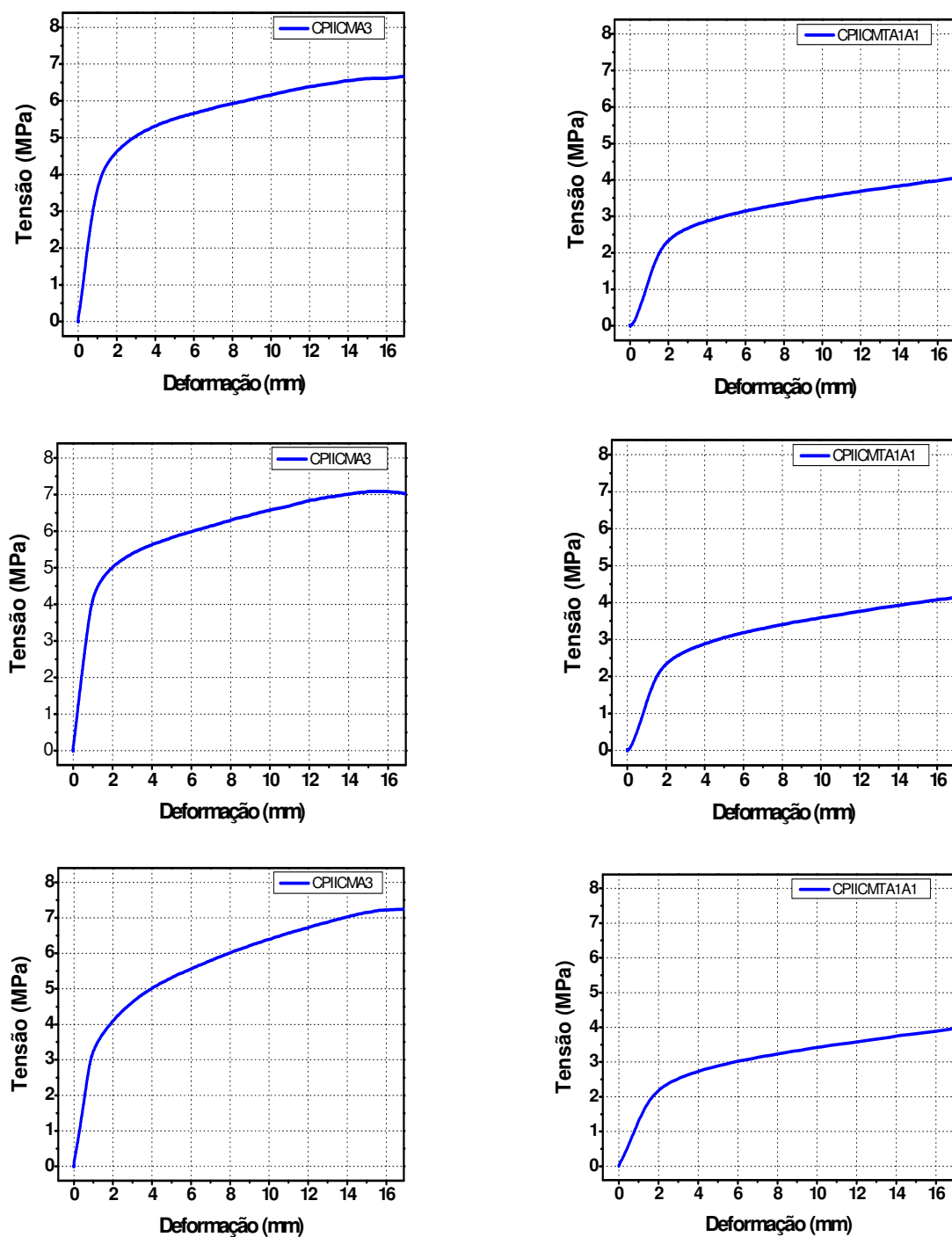


Figura H5 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMA₃ (esquerda) e CMTA₁A₁ (direita).

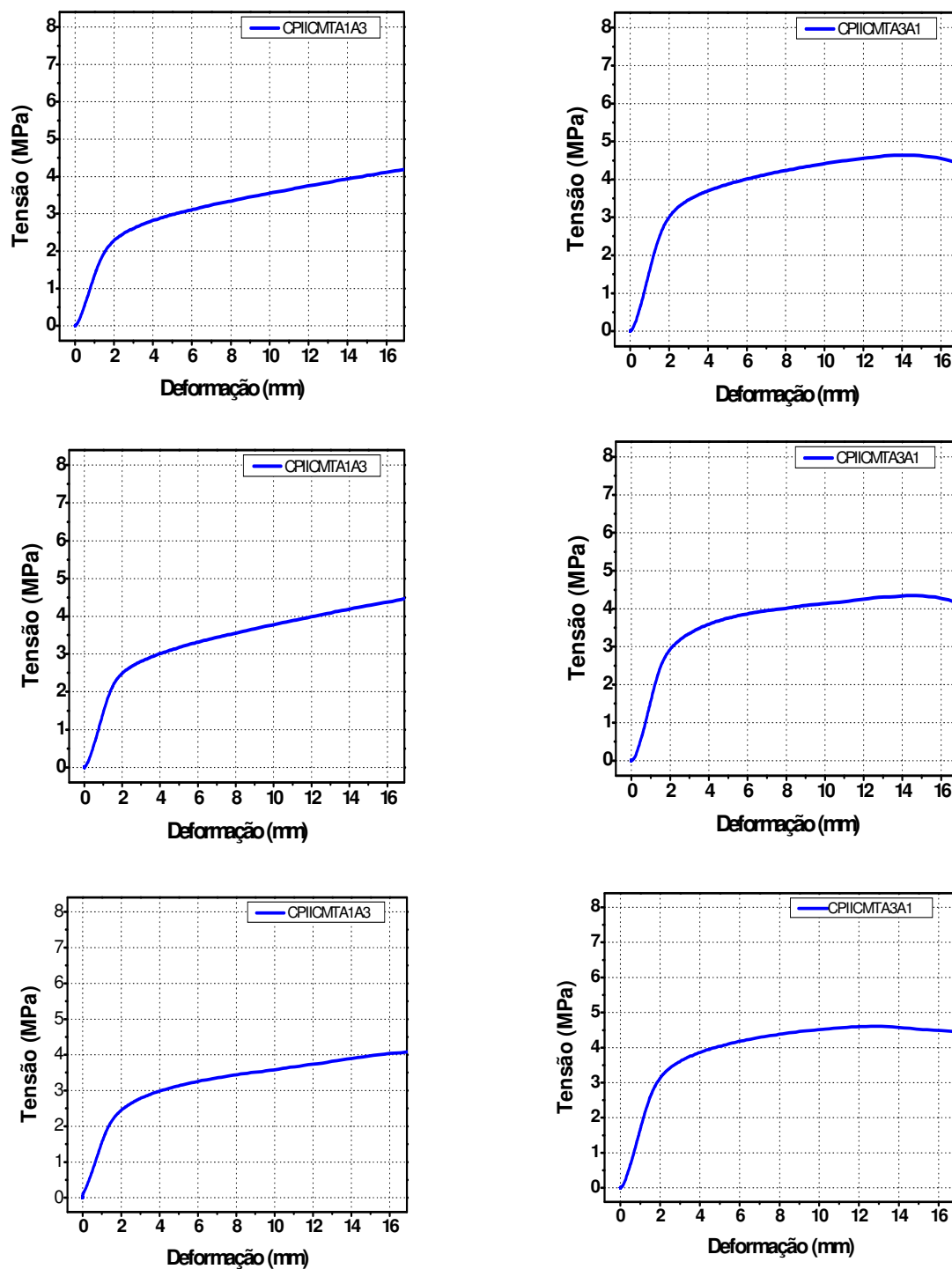


Figura H6 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA₁A₃ (esquerda) e CMTA₃A₁ (direita).

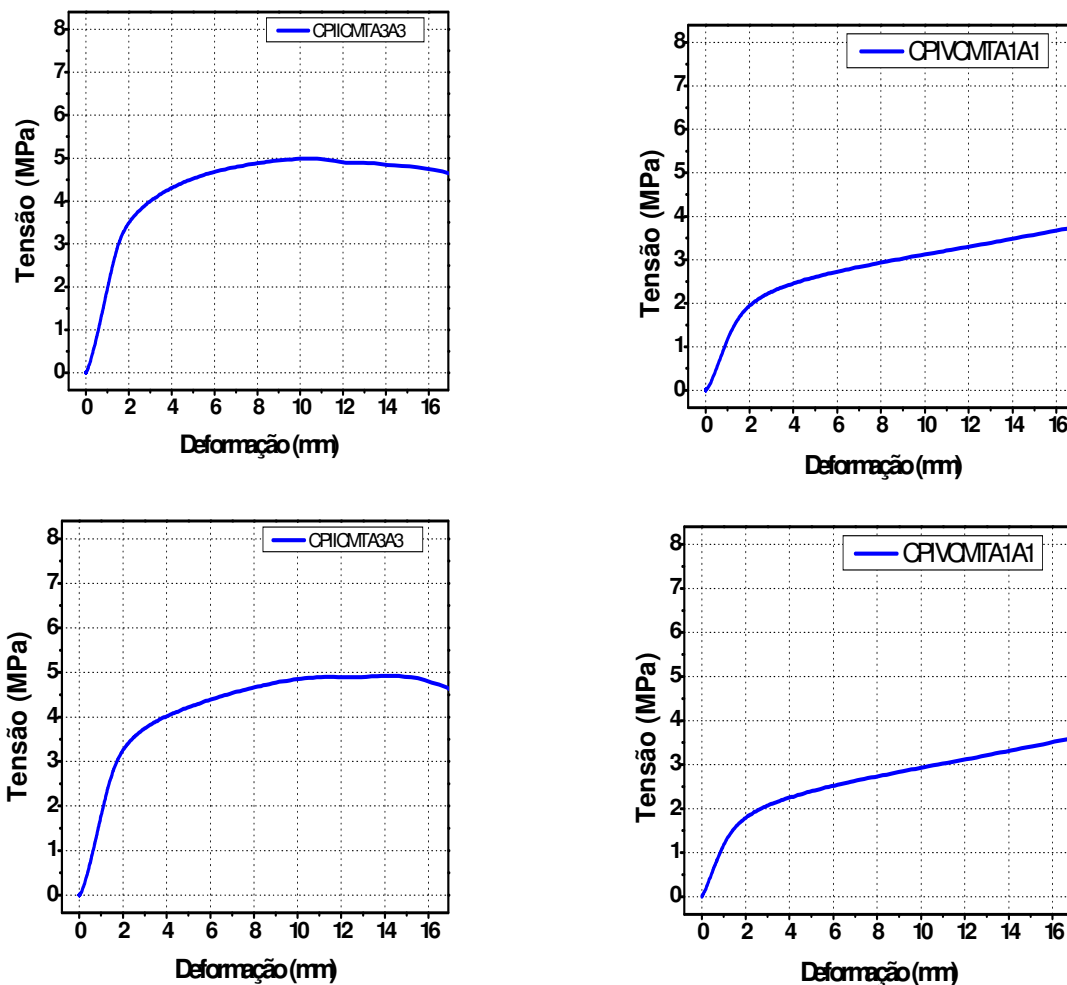


Figura H7 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:0,66, nas condições CMTA₃A₃ (esquerda) e cimento CP IV, traço 1:1, condição CMTA₁A₁ (direita).

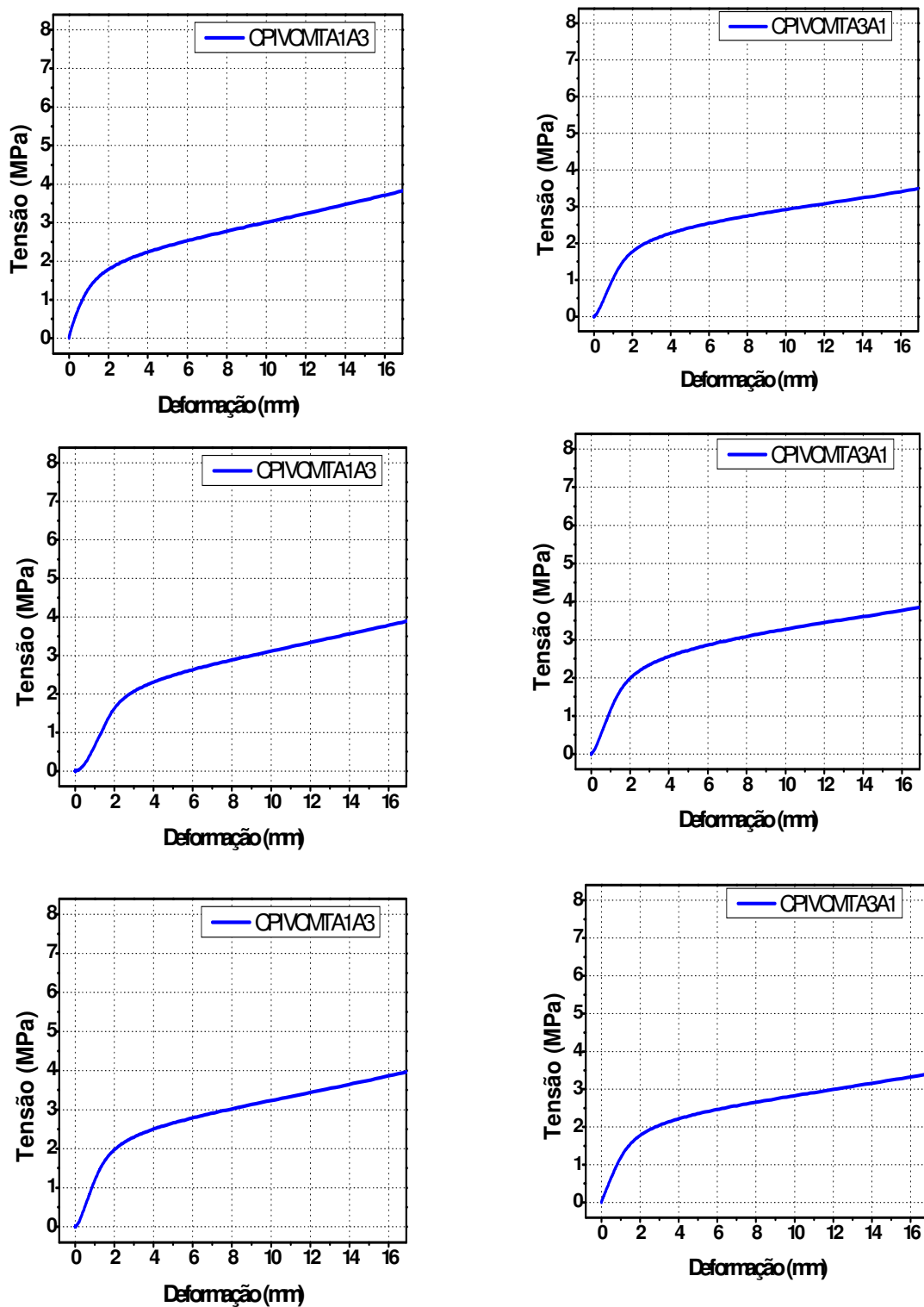


Figura H8 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₃ (esquerda) e CMTA₃A₁ (direita).

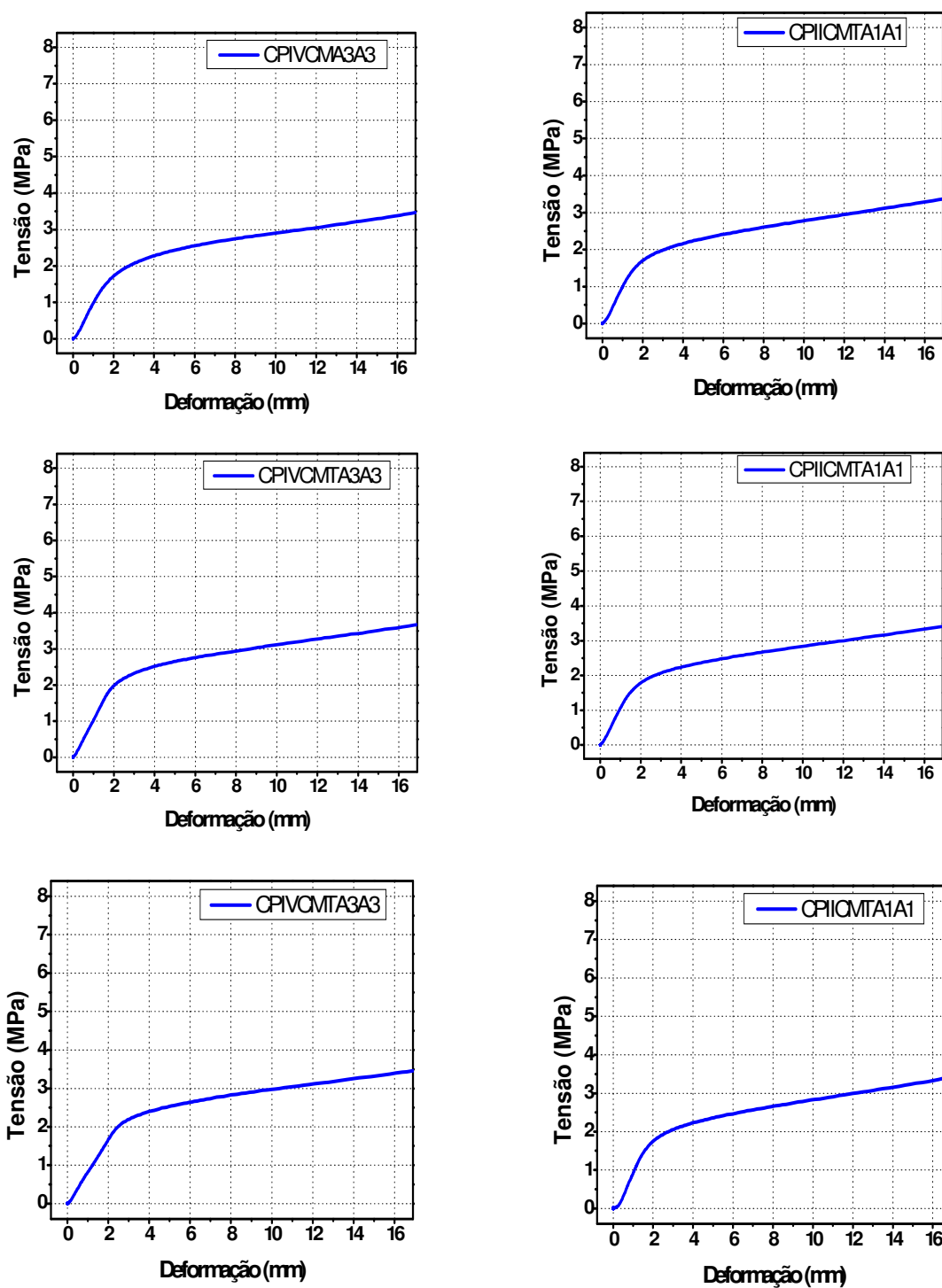


Figura H9 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:1, na condição CMTA₁A₃ (esquerda) e cimento CP II, traço 1:1, na condição CMTA₁A₁ (direita).

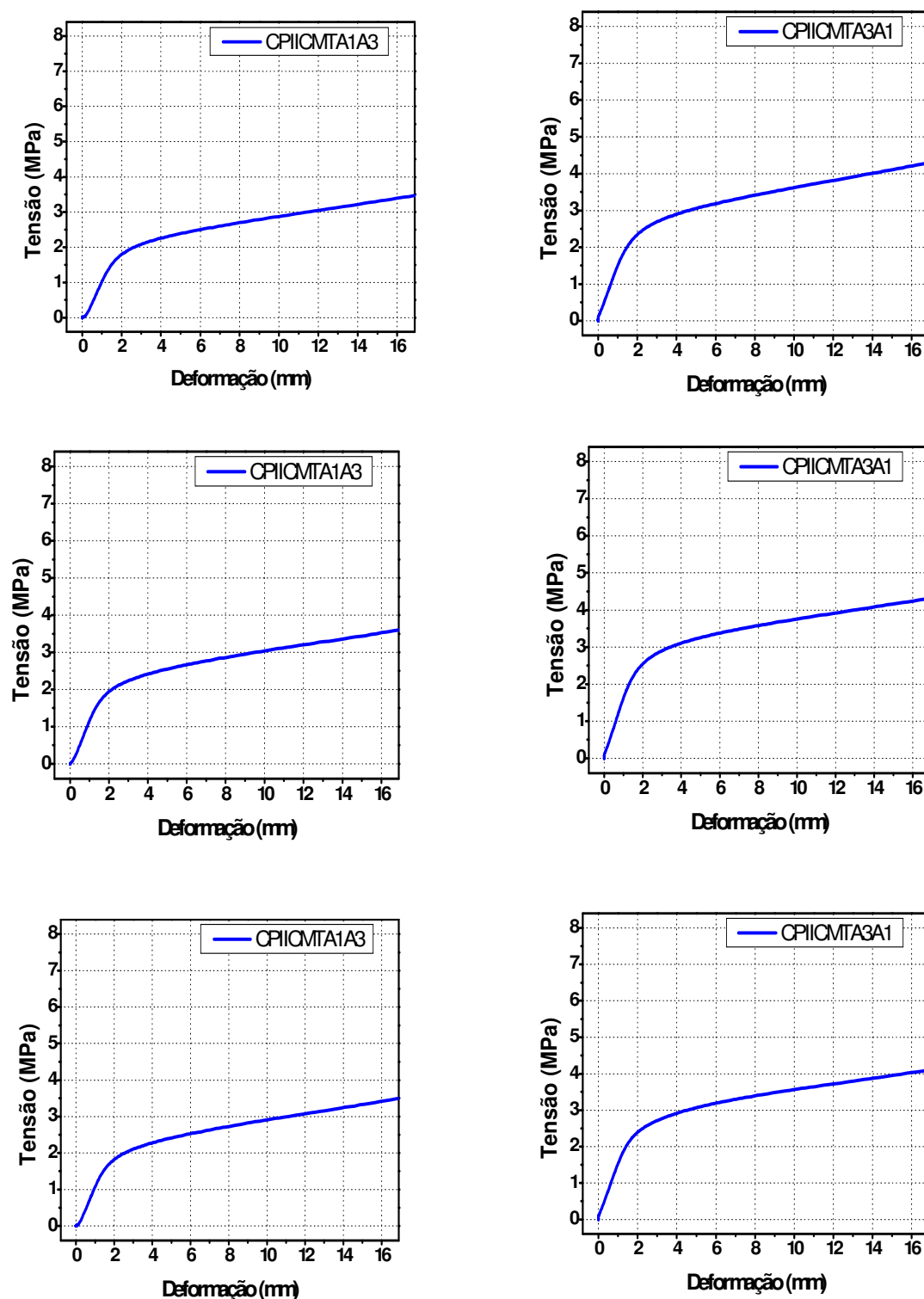


Figura H10 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₃ (esquerda) e CMTA₃A₁ (direita).

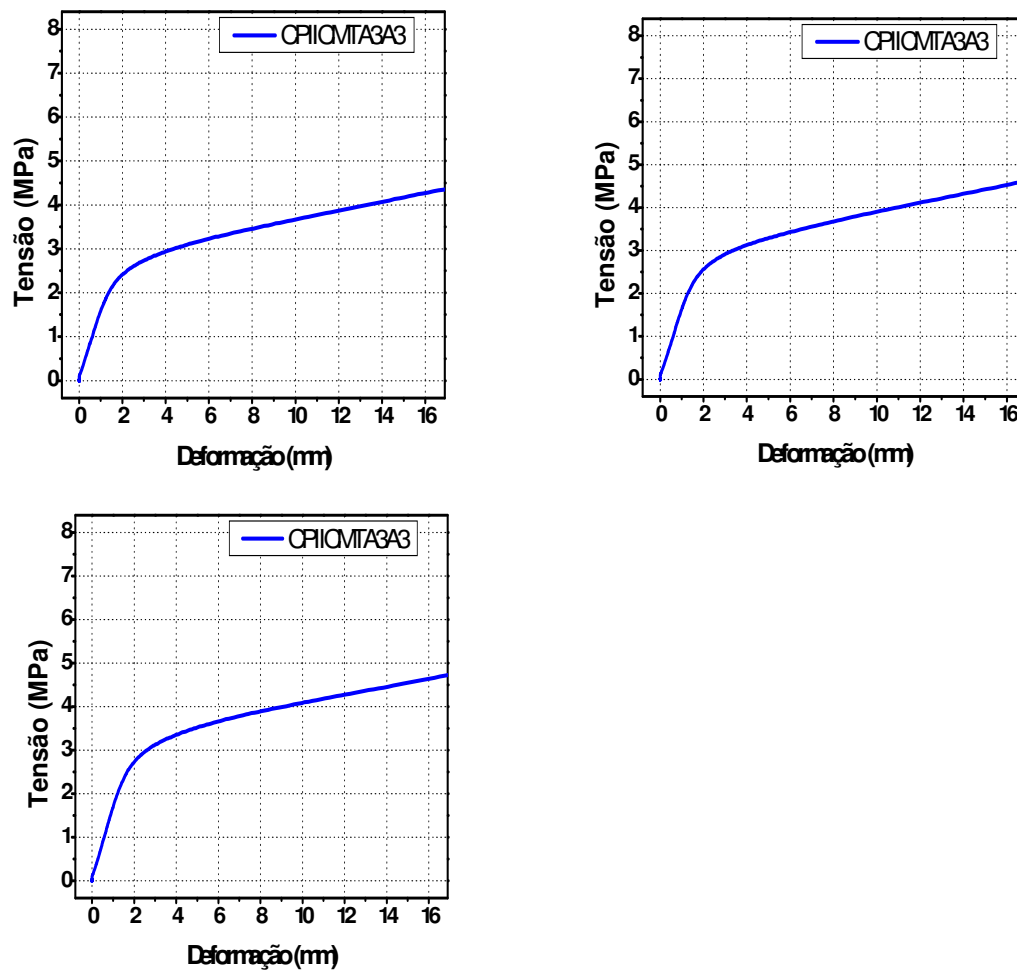


Figura H11 Resistência à compressão axial para corpos de prova confeccionados com carga de 4 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, na condição CMTA₃A₃

APÊNDICE I

Tabela I1 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₁ / CP IV / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₁ CP IV 1:0,66	0	153,50	153,20	154,09	0,00	1,09
	2	209,11	214,55	208,66	37,22 / 2,47	
	6	215,05	218,53	213,88	40,51 / 1,95	
	12	219,04	221,90	217,85	42,97 / 1,79	
	24	224,07	225,95	223,73	46,21 / 1,16	
	48	228,12	228,94	228,31	48,74 / 0,64	
	72	229,70	229,93	230,30	49,73 / 0,32	
	96	230,00	230,84	231,65	50,28 / 0,42	
	120	231,83	231,26	232,18	50,89 / 0,18	
	144	233,06	232,59	233,49	51,73 / 0,17	
	168	234,50	233,33	234,25	52,36 / 0,37	
	192	234,70	234,06	234,90	52,71 / 0,24	
Absorção de Água (%)		52,90	52,78	52,44		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		52,71 / 0,24				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo cloreto de cálcio-água mais aditivo cloreto de cálcio.

Tabela I2 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₃ / CP IV / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₃ CP IV 1:0,66	0	154,70	152,85	154,20	0,00	1,09
	2	213,30	207,96	213,52	37,47 / 1,26	
	6	218,94	214,22	218,29	41,08 / 0,80	
	12	222,95	218,68	222,26	43,78 / 0,61	
	24	228,63	225,35	228,01	47,69 / 0,23	
	48	232,55	231,03	232,36	50,71 / 0,41	
	72	233,69	232,61	233,97	51,65 / 0,56	
	96	234,81	235,12	235,48	52,77 / 1,02	
	120	235,57	235,89	236,44	53,31 / 1,03	
	144	237,07	237,12	237,67	54,16 / 0,94	
	168	237,66	237,91	238,09	54,55 / 1,02	
	192	238,76	239,62	239,34	55,44 / 1,23	
Absorção de Água (%)		54,34	56,77	55,21		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		55,44 / 1,23				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃.

Tabela I3 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₃A₁ / CP IV / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₃ A ₁ CP IV 1:0,66	0	153,18	151,39	151,83	0,00	1,10
	2	213,78	212,89	204,31	38,26 / 3,24	
	6	219,78	217,81	213,60	42,68 / 1,74	
	12	223,44	221,27	219,63	45,57 / 0,79	
	24	228,73	226,20	226,21	49,25 / 0,22	
	48	232,66	229,75	230,57	51,84 / 0,07	
	72	234,23	231,35	232,52	52,96 / 0,17	
	96	236,00	233,44	233,95	54,12 / 0,07	
	120	236,55	234,07	235,14	54,64 / 0,22	
	144	237,94	235,37	236,15	55,45 / 0,10	
	168	238,20	236,65	237,97	56,19 / 0,63	
	192	239,70	237,80	238,92	56,97 / 0,45	
Absorção de Água (%)		56,48	57,07	57,36		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		56,97/0,45				

MEA - massa específica aparente, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁.

Tabela I4 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₁ / CP II / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₁ CP II 1:0,66	0	153,77	152,41	154,84	0,00	1,08
	2	206,67	206,54	202,69	33,60 / 2,41	
	6	211,80	212,63	209,5	37,51 / 2,11	
	12	215,90	217,12	214,75	40,51 / 1,88	
	24	220,70	221,98	220,67	43,89 / 1,59	
	48	223,82	225,40	224,14	46,06 / 1,63	
	72	226,65	227,96	226,99	47,85 / 1,54	
	96	228,27	229,40	228,30	48,80 / 1,57	
	120	229,10	229,98	229,52	49,37 / 1,37	
	144	230,51	231,14	230,62	50,17 / 1,37	
	168	230,98	231,75	231,49	50,59 / 1,32	
	192	231,59	232,55	232,33	51,07 / 1,33	
Absorção de Água (%)		50,60	52,58	50,04		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		51,07 / 1,33				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁.

Tabela I5 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₃ / CP II / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₃ CP II 1:0,66	0	152,25	153,62	152,17	0,00	1,11
	2	212,43	192,69	210,98	34,51 / 7,89	
	6	217,78	200,8	215,78	38,49 / 6,79	
	12	222,10	207,36	219,43	41,67 / 5,86	
	24	225,37	214,86	223,27	44,86 / 4,38	
	48	227,44	221,76	225,02	47,20 / 2,58	
	72	229,80	226,21	226,52	49,01 / 1,85	
	96	230,59	228,78	227,24	49,90 / 1,36	
	120	231,51	231,04	228,06	50,77 / 1,14	
	144	232,60	233,20	229,03	51,70 / 1,14	
	168	233,28	234,51	229,66	52,27 / 1,19	
	192	233,87	235,84	230,64	52,89 / 1,15	
Absorção de Água (%)		53,60	53,52	51,56		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		52,89 / 1,15				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃.

Tabela I6 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₃A₁ / CP II / 1:0,66).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₃ A ₁ CP II 1:0,66	0	152,27	151,90	151,00	0,00	1,13
	2	210,56	207,56	205,45	37,00 / 1,15	
	6	218,36	215,18	212,70	41,98 / 1,30	
	12	223,20	219,13	217,64	45,00 / 1,38	
	24	229,97	223,58	222,64	48,56 / 2,15	
	48	233,10	227,67	227,3	51,17 / 1,69	
	72	234,52	231,37	231,13	53,14 / 0,85	
	96	236,04	233,32	233,37	54,39 / 0,72	
	120	236,64	234,40	234,57	55,02 / 0,62	
	144	237,08	234,96	235,40	55,42 / 0,65	
	168	237,64	236,16	236,25	56,00 / 0,49	
	192	238,11	236,95	236,93	56,43 / 0,46	
Absorção de Água (%)		56,4	55,99	56,90		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		56,43 / 0,45				

MEA - massa específica aparente, CMTA₃A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₁.

Tabela I7 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₁ / CP II / 1:1).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₁ CP II 1:1	0	134,14	131,63	133,23	0,00	0,96
	2	207,28	202,47	202,42	53,43 / 1,34	
	6	209,21	203,67	205,51	54,98 / 0,88	
	12	212,73	209,28	211,04	58,66 / 0,30	
	24	215,95	213,40	215,05	61,50 / 0,57	
	48	218,98	217,00	218,14	63,94 / 0,82	
	72	219,75	220,22	220,43	65,51 / 1,74	
	96	220,35	221,56	221,98	66,39 / 2,03	
	120	221,00	221,95	222,07	66,67 / 1,93	
	144	221,37	222,20	222,30	66,89 / 1,89	
	168	221,95	221,58	222,46	66,92 / 1,44	
	192	223,34	222,50	223,19	67,68 / 1,27	
Absorção de Água (%)		66,50	69,03	67,52		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		67,68 / 1,27				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁.

Tabela I8 Absorção de água dos corpos de prova confeccionados na condição (CMTA₁A₃ / CP II / 1:1).

Condição	Tempo Absorção (h)	Amostras / Massa (g)			Absorção instantânea (%) /Desvio padrão	MEA (g/cm ³)
		1	2	3		
CMTA ₁ A ₃ CP II 1:1	0	129,25	132,11	132,00	0,00	0,94
	2	205,16	204,28	207,42	56,82 / 2,07	
	6	207,27	206,83	210,32	58,74 / 1,97	
	12	211,22	211,18	213,24	61,59 / 1,78	
	24	214,94	214,86	216,63	64,34 / 1,84	
	48	216,60	217,20	219,17	66,00 / 1,59	
	72	219,02	220,19	220,70	67,76 / 1,48	
	96	221,03	222,09	222,27	69,16 / 1,60	
	120	221,20	222,40	223,25	69,52 / 1,44	
	144	221,29	222,74	223,59	69,72 / 1,34	
	168	221,35	223,16	222,95	69,68 / 1,35	
	192	222,62	223,16	223,68	70,20 / 1,78	
Absorção de Água (%)		72,24	68,91	69,45		
Absorção de Água (%) (Média) /Desvio padrão		70,20 / 1,79				

MEA - massa específica aparente, CMTA₁A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₃.

APÊNDICE J

Tabela J1 Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico de corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm², nos traços 1:1 e com cimentos CP IV e CP II. Valores em negrito são a média e desvio padrão.

Condição	Condutividade térmica (k) (W/mK)	Difusividade térmica (α) (m ² /s)	Calor específico (Cp) (J/kgK)	Densidade (kg/m ³)	Coefficiente de correlação R ²
1:1 CII CMA1	0,2049	2,2280E-7	958,35	960	0,9993
	0,2041	2,3667E-7	898,45	960	0,9991
	0,2045 0,00060	2,2973E-7 0,09807E-7	928,40 42,36		0,9992
1:1 CII CMTA1A1	0,2215	2,0815E-7	1108,47	960	0,9992
	0,2493	2,2542E-7	1151,88	960	0,9993
	0,2354 0,01900	2,1677E-7 0,12198E-7	1130,18 30,69		0,9992
1:1 CPIV CMA1	0,2453	3,9515E-7	646,67	950	0,9992
	0,2455	3,7183E-7	702,48	950	0,9995
	0,2453 0,00001	3,8346E-7 0,16454E-7	674,58 39,46		0,9993
1:1 CPIICMA3	0,2334	2,9881E-7	822,31	960	0,9995
	0,2462	3,1159E-7	823,13	960	0,9988
	0,2398 0,00904	3,0520E-7 0,09037E-7	822,72 0,58		0,9991
1:1 CII CMTA3A3	0,2231	2,2983E-7	1011,34	960	0,9988
	0,2305	2,6424E-7	927,95	960	0,9996
	0,2268 0,00520	2,4703E-7 0,24331E-7	969,65 58,97		0,9997

k - condutividade térmica, α - difusividade térmica, Cp - calor específico, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃, CMTA₁A₁ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₁-água mais aditivo A₁, CMTA₃A₃ - cimento-madeira tratada com solução de aditivo A₃-água mais aditivo A₃.

Tabela J2 Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico de corpos de prova confeccionados com carga de 30 kgf/cm², nos traços 1,5:1 e com cimentos CP IV e CP II. Valores em negrito são a média e desvio padrão.

Condição	Condutividade térmica (k) (W/mK)	Difusividade térmica (α) (m ² /s)	Calor específico (Cp) (J/kgK)	Densidade (kg/m ³)	Coeficiente de correlação R ²
1,5:1 CPII CMA1	0,2969	3,282E-7	822,40	1080	0,9978
	0,3047	3,4129E-7	826,66	1080	0,9994
	0,3237	3,9515E-7	758,50	1080	0,9992
	0,3084 0,01380	3,5489E-7 0,35472E-7	802,52 38,18		0,9988
1,5:1 CPIV CMA1	0,3042	3,9926E-7	705,40	1100	0,9992
	0,2957	3,9760E-7	676,10	1100	0,9994
	0,2623	3,5640E-7	782,83	1100	0,9988
	0,2874 0,02216	3,8442E-7 0,24280E-7	721,44 55,14		0,9991
1,5 :1 CPII CMA3	0,2742	3,0815E-7	927,08	1110	0,9991
	0,2916	2,7156E-7	994,19	1110	0,9993
	0,2829 0,01226	2,8985E-7 0,25873E-7	960,61 47,48		0,9992

k - condutividade térmica, α - difusividade térmica, Cp - calor específico, CMA₁ - cimento-madeira-água mais aditivo A₁, CMA₃ - cimento-madeira-água mais aditivo A₃.

APÊNDICE K

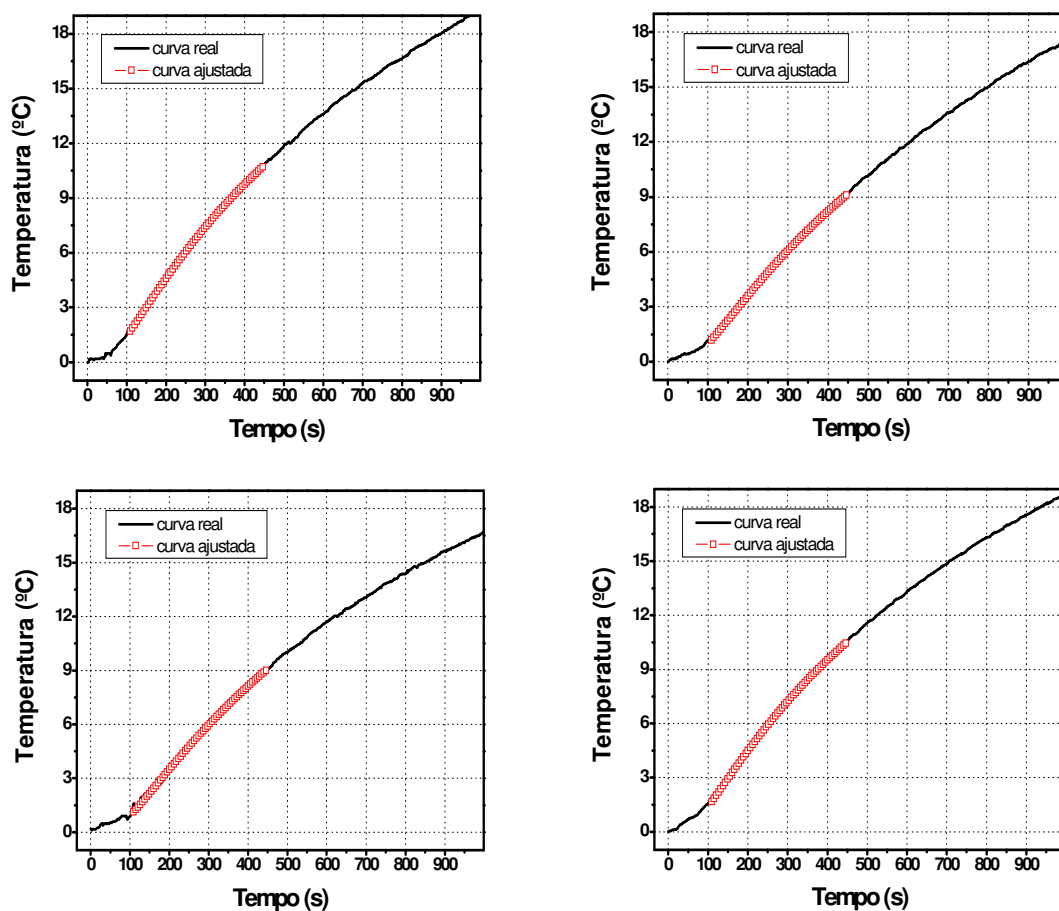


Figura K1 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP IV, traço 1:0,66, na condição CMA₁ (esquerda) e cimento CP II, traço 1:0,66, na condição CMA₁ (direita).

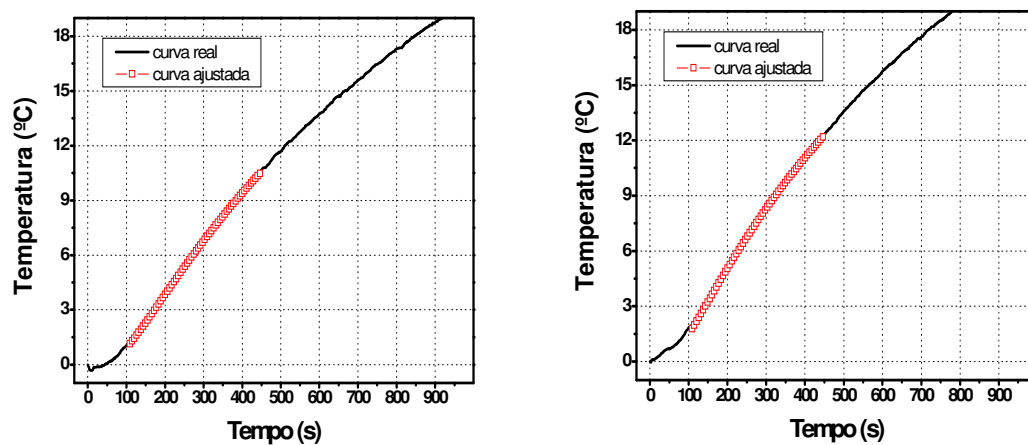


Figura K2 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², na condição (CMA₁ / CP IV / 1:1).

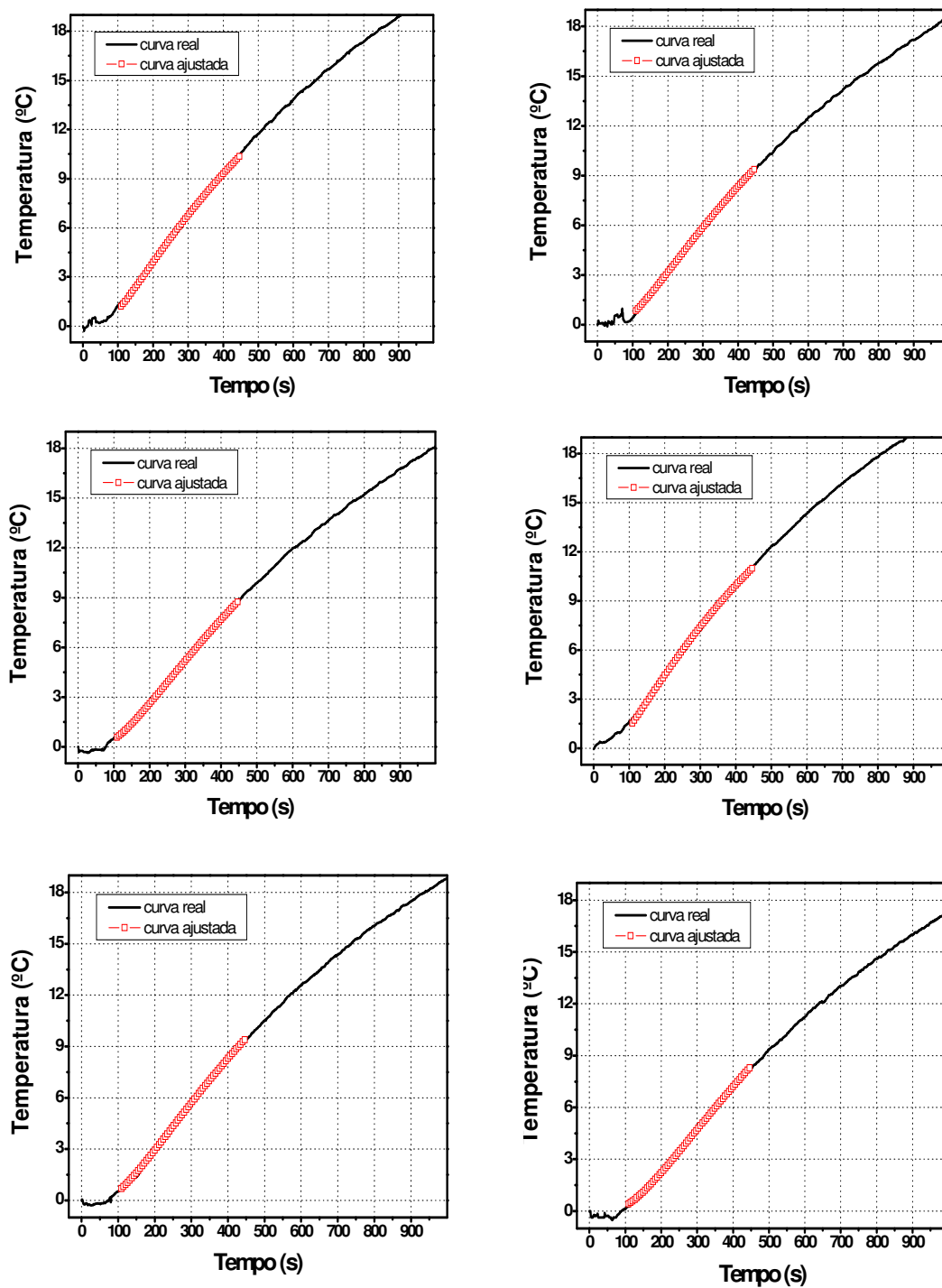


Figura K3 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMA₁ (esquerda) e CMA₃ (direita).

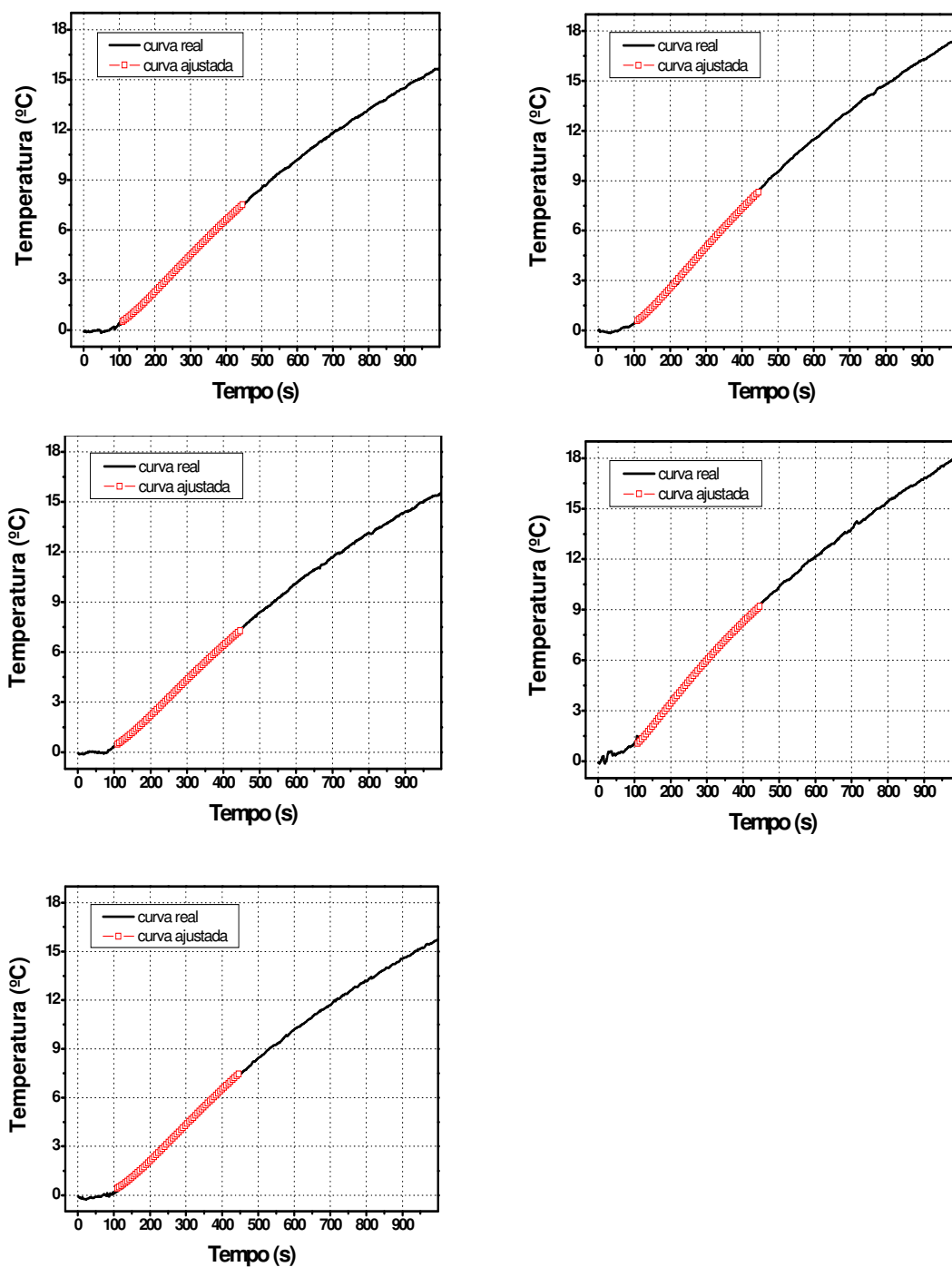


Figura K4 Curvas real e ajustada para o ensaio de condutividade térmica de corpos de prova confeccionados com carga de 30 Kgf/cm², cimento CP II, traço 1:1, nas condições CMTA₁A₁(esquerda) e CMTA₃A₃ (direita).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)