

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO

**EFEITO DA ADIÇÃO METACAULINITA E TIJOLO
MOÍDO QUEIMADO NA DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS ARGAMASSA-FIBRA DE SISAL**

DISSERTAÇÃO

JOÃO DE FARIAS FILHO

Campina Grande – Paraíba
NOVEMBRO – 1999



F224e Farias Filho, João de.
Efeito da adição metacaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa-fibra de sisal / João de Farias Filho. - Campina Grande, 1999.
109 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho, Prof. Dr. Marcelo S. Rabello".
Referências.

1. Argamassa - Fibra de Sisal. 2. Fibra de Sisal - Agregado de Cimento. 3. Metacaulinita e Tijolo - Compósitos - Durabilidade. 4. Dissertação - Engenharia Agrícola. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Rabello, Marcelo S. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 666.971.11(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

JOÃO DE FARIAS FILHO

Título: "Efeito da adição metalcaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa fibra de sisal".

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho-Orientador

APROVADO

Prof. Dr. Marcelo S. Rabello-Orientador

APROVADO

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa-Examinador

APROVADO

Prof. Dr. Joseph Kuruvilla-Examinador

APROVADO

Campina Grande, 12 de novembro de 1999

DEDICATÓRIA

A minha esposa Netinha que tanto me incentivou neste período, sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis dando o seu apoio e, acima de tudo, pelo carinho com minhas filhas, na minha ausência, e pela sua fé em Deus.

As minhas filhas Tiê, Talina e Tatielly que suportaram as saudades na minha ausência, pela paciência e carinho que tiveram comigo. Sempre estivemos juntos em orações pedindo forças e coragem para o término desta minha dissertação. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado coragem, entusiasmo e determinação.

Aos meus pais João Farias e Maria da Paz por terem me dado o existir, pois tudo que sou devo a eles. Ao meu pai também pela colaboração com seu trabalho, deixando seu merecido repouso nos feriados e finais de semanas para ajudar-me na continuidade do intemperismo.

Aos meus orientadores Professores Dr. Romildo Tolêdo Filho e Dr. Marcelo Rabello que sempre me indicaram onde buscar as fontes de pesquisas para a busca dos conhecimentos que serviram de fundamentos, desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Romildo Tolêdo, um agradecimento especial, nele encontrei um irmão de fé que todo momento sempre me incentivou e buscou melhores condições para que eu pudesse continuar e concluir este curso.

A Joselma Rolim, pela fundamental colaboração na moldagem, realização dos ensaios e análise dos resultados para avaliação de resistência à compressão simples das argamassas estudadas neste trabalho.

Aos meus irmãos que direta ou indiretamente me ajudaram, principalmente você Adriana que fez tudo por mim e Socorro pelo seu incentivo para que fizesse este curso.

Aos companheiros Juâres Gomes e Altair Padilha que sempre me ajudaram e que sempre estivemos juntos nesta batalha, estabelecendo-se um verdadeiro sentimento de parceria e companheirismo.

Ao meu cunhado Roberval Correia pela colaboração e ajuda em diversos momentos que estive realizando este curso.

A todos os funcionários dos Laboratórios de Solos I, Solos II, Solos III e LaCRA que de alguma forma colaboraram para execução desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jackson do DEM/UFPB Campus I, pelo apoio dado na realização dos ensaios de difração de raio-x e utilização da Ploter x-y-t.

Ao Dr. Rainer do CETEM/UFRJ pela discussão da difratometria de raio-x.

Ao Prof. Dr. Marcos Antônio dos Santos pelo seu apoio na utilização da MTS, na realização dos ensaios mecânicos.

Ao amigo Sandro, pela grande colaboração na realização dos ensaios de difratometria de raio-x.

Ao Prof. Paulo Roberto Lopes do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, pela análise dos ensaios termogravimétricos.

A Lúcia, laboratorista do Laboratório de Termoquímica Departamento de Engenharia Química da UFPB, Campus I, pela realização dos ensaios termogravimétricos.

A Itapessoca Agroindustrial S/A, a Cemarisa e Cipresa Ltda pelo fornecimento das matérias primas utilizadas nesta pesquisa.

A CAPES e ao BNB pelo apoio financeiro que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

“É preciso passarmos pelo nada, para obtermos o tudo”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
-----------------------------	---

2.1 Sisal	4
-----------------	---

2.1.1 Importância sócio-econômica	4
---	---

2.1.2 Botânica e morfologia do sisal	7
--	---

2.1.3 Clima e Solo	8
--------------------------	---

2.1.4 Cultivo	9
---------------------	---

2.1.5 Colheita	10
----------------------	----

2.1.6 Propriedades das fibras de sisal	13
--	----

2.1.6.1 Micro estrutura da fibra de sisal	13
---	----

2.2 Matriz a base de cimento	16
------------------------------------	----

2.3 Uso de fibras naturais no reforço de materiais compósitos a base de cimento	17
---	----

2.3.1 Propriedades dos compósitos	17
---	----

2.3.2 Degradação das fibras naturais em meios alcalinos	19
---	----

2.3.3 Métodos usados para redução da degradação das fibras e dos compósitos	20
---	----

2.4 Aditivos minerais	23
-----------------------------	----

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS	27
--------------------------	----

3.1 MATERIAL	27
--------------------	----

3.1.1 Fibras de sisal	27
-----------------------------	----

3.1.2 Cimento Portland	28
------------------------------	----

3.1.3 Tijolo queimado moído	28
-----------------------------------	----

3.1.4 Metacaulinita	29
3.1.5 Areia	29
3.1.6 Água	29
3.2 MÉTODOS	30
3.2.1 Desenvolvimento da matriz de baixa alcalinidade	30
3.2.1.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio das argamassas mistas	30
3.2.1.2 Resistência mecânica das argamassas de cimento portland-pozolana	32
3.2.2 Método de produção dos compósitos	36
3.2.3 Programa experimental usado no estudo da durabilidade dos compósitos	37
3.2.4 Parâmetros usados para se avaliar a durabilidade dos compósitos	39
CAPÍTULO 4	
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1 Caracterização do material	41
4.1.1 Cimento portland	41
4.1.2 Tijolo queimado moído	42
4.1.2.1 Metacaulinita	44
4.1.3 Atividade pozolânica da metacaulinita e do tijolo moído com o cimento portland	46
4.2 Desenvolvimento de matriz de baixa alcalinidade	46
4.2.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio das argamassas mistas	46
4.3 Resistência mecânica das argamassas de cimento portland-pozolana	57
4.3.1 Resistência à compressão simples	57
4.3.1.1 Variação ao longo do tempo	60
4.3.1.2 Modelo matemático	62
4.3.2 Resistência à flexão	63
4.4 Durabilidade dos compósitos	64
4.4.1 Envelhecimento natural	64
4.4.1.1 Compósitos com tijolo moído	67
4.4.1.2 Compósitos com metacaulinita	73
4.4.2 Envelhecimento acelerado	80
4.4.2.1 Teor de hidróxido de cálcio das misturas	80
4.4.2.2 Compósitos com tijolo moído	88
4.4.2.3 Compósitos com metacaulinita	91

CAPÍTULO 5	
CONCLUSÃO	96
CAPÍTULO 6	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXO I	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Planta de sisal	8
FIGURA 2.2: Máquina Paraibana para desfibramento das folhas de sisal	12
FIGURA 2.3: Máquina automática Nova Floresta para desfibramento das folhas de sisal	13
FIGURA 2.4: Colocação da fibra de sisal em varais para secar	13
FIGURA 2.5: Seção transversal da fibra de sisal	15
FIGURA 2.6: Exemplos de curvas carga-deslocamento para compósitos de argamassa reforçada com fibras de sisal	18
FIGURA 3.1: Molde utilizado na produção dos corpos-de-prova de flexão	33
FIGURA 3.2: Esquema do ensaio de resistência à flexão em quatro pontos	33
FIGURA 3.3: Desenho fatorial estabelecido para se avaliar a influência da adição de material pozolânico na resistência à compressão das argamassas de cimento portland	35
FIGURA 3.4: Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão na MTS	37
FIGURA 3.5: Sistema utilizado para transporte das espécimes submetidas a ciclos de molhagem e secagem	38
FIGURA 4.1 – Difratoograma de raio-x do tijolo queimado moído	43
FIGURA 4.2 – Difratoograma de raio-x da metacaulinita	45
FIGURA 4.3: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 20% de tijolo moído após 28 dias de cura em água	49
FIGURA 4.4: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 40% de tijolo moído após 28 dias de cura em água	50
FIGURA 4.5: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 50% de tijolo moído após 28 dias de cura em água	51
FIGURA 4.6: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 20% de metacaulinita após 28 dias de cura em água	52
FIGURA 4.7: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 40% de metacaulinita após 28 dias de cura em água	53

FIGURA 4.8: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 50% de metacaulinita após 28 dias de cura em água	54
FIGURA 4.9 - Difratoograma de raio-x das amostras com 20%, 40% e 50% de tijolo moído – 28 dias	55
FIGURA 4.10: Difratoograma de raios-x das amostras com 20%, 40% e 50% de metacaulinita – 28 dias	56
FIGURA 4.11 - Influência da metacaulinita e do tijolo moído no consumo de hidróxido de cálcio	57
FIGURA 4.12: Valores médios dos ensaios de resistência à compressão	59
FIGURA 4.13: Desenvolvimento da resistência à compressão simples	61
FIGURA 4.14: Evolução do módulo de ruptura das argamassa com o tempo após envelhecimento natural da argamassa de cimento portland e as mistas.....	64
FIGURA 4.15: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural	67
FIGURA 4.16: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural	68
FIGURA 4.17: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural	69
FIGURA 4.18: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural	70
FIGURA 4.19: difratoograma de raio-x da pasta com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído, curado em água até 28 dias e após esse período 90 dias exposto ao ar	72
FIGURA 4.20: Evolução da tenacidade (FT) com o envelhecimento natural, compósitos, com tijolo queimado moído	73
FIGURA 4.21: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural ...	74
FIGURA 4.22: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural ...	75
FIGURA 4.23: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural ...	76

FIGURA 4.24: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural ...	77
FIGURA 4.25: Difratoograma de raio-x de amostras com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita, curado em água por 28 dias e após esse período 90 dias exposto ao ar	79
FIGURA 4.26: Evolução da tenacidade, FT, com o envelhecimento natural: compósitos com metacaulinita	80
FIGURA 4.27: Curva termogravimétrica da amostra com 20% de tijolo moído após 94 ciclos de molhagem e secagem	82
FIGURA 4.28: Curva termogravimétrica da amostra com 40% de tijolo moído submetida após 94 ciclos de molhagem secagem	83
FIGURA 4.29: Curva termogravimétrica da amostra com 20% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem	84
FIGURA 4.30: Curva termogravimétrica da amostra com 40% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem	85
FIGURA 4.31: Curva termogravimétrica da amostra com 50% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem	86
FIGURA 4.32: Difratoograma de amostras com metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem	87
FIGURA 4.33: Difratoograma de amostras com tijolo moído após 94 ciclos de molhagem e secagem	87
FIGURA 4.34: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento acelerado .	88
FIGURA 4.35: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento acelerado .	89
FIGURA 4.36: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído - envelhecimento acelerado ..	90
FIGURA 4.37: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento acelerado	92
FIGURA 4.38: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento acelerado	93
FIGURA 4.39: Curva carga x deflexão, dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita - envelhecimento acelerado	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1- Resultados da resistência à compressão simples, para determinação do índice de atividade pozolânica do tijolo queimado moído e da metacaulinita	46
TABELA 4.2 - Teor de hidróxido de cálcio nas pastas mistas após 28 dias de cura em água	47
TABELA 4.3 - Análise de variância	59
TABELA 4.4 - Desenvolvimento da resistência à compressão simples (RCS - MPa)	61
TABELA 4.5 - Coeficientes de regressão obtidos para cada desenho fatorial	62
TABELA 4.6 - Resultados experimentais de tijolo moído e previstos pelo modelo	63
TABELA 4.7 - Módulo de ruptura (σ_b) das argamassas de cimento portland e mistas após 28 dias de cura em água e após exposição ao ambiente natural	63
TABELA 4.8 - Índices σ_b , T_{JCI} , FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por tijolo moído, submetidos ao envelhecimento em ambiente natural	70
TABELA 4.9 - Índices σ_b , T_{JCI} , FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por metacaulinita, submetidos ao envelhecimento natural	77
TABELA 4.10 - Teor de hidróxido de cálcio em misturas sujeitas a 94 ciclos de molhagem-secagem	81
TABELA 4.11 - Índices σ_b , T_{JCI} , FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por tijolo moído, submetidos ao envelhecimento acelerado através de ciclos alternados de molhagem e secagem	90

TABELA 4.12 - Índices σ_b , T_{JCI} e FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por metacaulinita, submetidos ao envelhecimento acelerado através de ciclos alternados de molhagem e secagem

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Produção mundial da fibra de sisal e principais países produtores (em 1.000t)	5
QUADRO 2.2: Propriedades físicas e mecânicas da fibras de Sisal	15
QUADRO 3.1 - Programa experimental usado no estudo da durabilidade dos compósitos	39
QUADRO 4.1 - Composição química e finura do cimento portland utilizado ...	41
QUADRO 4.2 – Composição químicas e propriedades físicas do tijolo moído utilizado	42
QUADRO 4.3 – Composição química e propriedade física da metacaulinita	44
QUADRO 4.4 – Dados climatológicos médios verificados no periodo de agosto/98 a março/99	66

FARIAS FILHO, João de. **Influência da Metacaulinita e Tijolo Queimado Moído na Durabilidade de Compósitos Fibra de Sisal-Argamassa**. Campina Grande, 1999. 109p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba.

O interesse pelo uso de fibras de sisal como reforço de matrizes a base de cimento tem crescido em todo o mundo nos últimos anos. O principal obstáculo para o uso generalizado dessas fibras como elemento de reforço de matrizes a base de cimento está relacionado com sua baixa durabilidade no meio alcalino. No presente estudo procurou-se reduzir a alcalinidade da matriz utilizando-se materiais pozolânicos. As pozolanas estudadas foram a metacaulinita e restolhos de tijolo queimado moído. A percentagem de substituição, em peso, de cimento portland por material pozolânico variou de 20 a 50%. Determinou-se a influência desses teores de substituição nas resistências à compressão e à flexão das argamassas mistas e o consumo de hidróxido de cálcio das pastas de cimento hidratadas. Compósitos fibras de sisal-matrizes mistas foram submetidos ao intemperismo natural e ao envelhecimento acelerado através da realização de ciclos de molhagem e secagem. Ensaios de flexão foram realizados nos compósitos após 28 dias de cura em água, após 90, 135 e 180 dias de envelhecimento natural e após 62, 94 e 125 ciclos de molhagem e secagem. Os resultados indicaram que misturas com teores de metacaulinita de 40% e 50% consumiram praticamente todo o hidróxido de cálcio mantiveram a tenacidade e aumentaram a resistência do compósito após 180 dias de exposição natural ou 94 ciclos de molhagem e secagem. As misturas com 40% de tijolo moído aumentaram a módulo de ruptura do compósito mas apresentaram uma redução de cerca de 11% na tenacidade após 94 ciclos de molhagem e secagem.

FARIAS FILHO, João de. **Influence of Metakaolin and crushed waste fired clay brick on the durability of sisal fibre-mortar composite.** Campina Grande, 1999. 109p. Msc. Dissertation. Federal University of Paraiba.

In the last few years it has been observed a crescent interest in the use of sisal fibres as reinforcement in cement based composites. However the main concern for its use is related with the durability of the fibres in the alkaline pore water of concrete. In this study the alkalinity of the matrix was reduced using pozzolanic materials such as metakaolin and crushed waste fired clay bricks. The percentage of cement replacement, in weight, ranged from 20% to 50%. It was studied the influence of the pozzolanic materials in the compression and flexure strength of the blended cement mortars and the consume of calcium hydroxide in the hydrated cement pastes. Sisal fibre-blended mortar composites were submitted to the natural weather and to accelerated ageing through cycles of wetting and drying. Flexural tests were carried out in the composites after 28 days of cure in water, after 90, 135 and 180 days of ageing in the open air and after 62, 94 and 125 cycles of wetting and drying. The results indicated that the mixes with 40 and 50% of metakaolin consumed nearly all calcium hydroxide and kept the toughness of the composites after 180 days in the open air or submitted to 94 cycles of wetting and drying. The mixes with 40% of crushed fired clay bricks presented a reduction of about 11% in the toughness after 94 cycles of wetting and drying.

INTRODUÇÃO

O conceito de materiais compósitos não é novo ou recente. A própria natureza apresenta inúmeros exemplos onde a idéia dos compósitos está presente. A madeira, por exemplo, é um compósito de fibras de celulose embebidas numa matriz de lignina. O osso, outro exemplo de um compósito natural, consiste de fibras de colágeno, curtas e leves, embebidas em uma matriz mineral chamada apatite. Com relação aos compósitos artificiais, o mais antigo deles é, provavelmente o "adobe". O adobe é um compósito de matriz frágil (argila) reforçado com palha ou capim e é usado nas construções civis desde os primórdios da civilização.

Apesar do uso milenar, somente nos últimos vinte e cinco anos os princípios relativos a utilização de fibras como reforço de matrizes frágeis, nas quais estão incluídas as pastas, argamassas e concreto, começou a ser compreendido. Com a adição de fibras, a fissuração da matriz frágil é reduzida uma vez que as fissuras são interligadas pelas fibras e como resultado há um aumento na tenacidade, na resistência ao impacto e na capacidade de suporte pós-fissuração.

Para reforço dessas matrizes frágeis têm-se lançado mãos de diversos tipos de fibras, quais sejam: metálicas, poliméricas, minerais ou naturais. As fibras quando adicionadas às matrizes podem atuar como reforço primário ou secundário. Elas exercem o papel de reforço primário quando utilizadas em produtos de pequena espessura com o objetivo de aumentar tanto a resistência como a ductibilidade do compósito.

Nos países em desenvolvimento fibras vegetais tais como: sisal, juta, bambu, etc., constituem uma excelente alternativa para reforçar matrizes a base de cimento e, assim, produzir materiais de baixo custo e consumo de energia para uso na construção de habitações populares, rurais, etc.

No caso específico do uso de fibras de sisal como reforço de argamassas para produção de laminados visando aplicação na construção civil, outras vantagens podem ser enumeradas, quais sejam:

- a) incrementar o cultivo do sisal no Estado da Paraíba fazendo uso de áreas de baixa precipitação e de solos de baixa fertilidade, onde o cultivo de outras culturas se torna muito difícil. Como o mercado da construção civil é muito grande, espera-se com isso aumentar a área plantada, modernizar a cultura do sisal, gerar empregos e fixar o homem ao campo reduzindo o êxodo rural;
- b) incrementar a infra-estrutura das propriedades rurais usando materiais locais na produção de elementos construtivos que possam vir a suprir as necessidades de infra-estrutura física (moradias, instalações para criação de animais, lazer, etc.) das propriedades rurais nordestinas.
- c) substituir as fibras de asbestos que têm encontrado restrições cada vez maiores como elemento de reforço em compósitos, por serem consideradas danosas à saúde dos seres humanos e animais.

É preciso, entretanto, aprofundar pesquisas sobre a incorporação do sisal como reforço de matrizes a base de cimento, principalmente no que se refere a sua durabilidade e a dos produtos resultantes. Uma das maiores preocupações está relacionada com a redução na tenacidade dos compósitos com o tempo. Sabe-se, da revisão bibliográfica, que o meio alcalino degrada as fibras e que a solução do problema está relacionada com a proteção superficial das fibras ou com a redução da alcalinidade da matriz.

No presente estudo optou-se pela utilização de materiais pozolânicos visando melhorar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras de sisal. As pozolanas estudadas foram o tijolo queimado moído e a metacaulinita. Assim, espera-se criar um ambiente mais favorável à preservação das propriedades das fibras de sisal utilizando-se materiais de baixo custo e baixo consumo de energia.

A presente dissertação está dividida em seis capítulos:

Capítulo I - esse capítulo apresenta uma introdução geral à área de interesse desse trabalho e define os objetivos do trabalho de pesquisa.

Capítulo 2 - nesse capítulo faz-se uma revisão bibliográfica sobre a fibra de sisal, descrevendo suas características botânicas, cultivo, comercialização e industrialização, suas propriedades físicas e mecânicas, sua utilização como reforço de

matrizes a base de cimento, o processo de fragilização no meio alcalino e os possíveis tratamentos para reduzir esse efeito.

Capítulo 3 - são apresentados o material e os métodos usados no desenvolvimento do presente estudo.

Capítulo 4 - nesse capítulo faz-se a apresentação e análise dos resultados.

Capítulo 5 - esse capítulo apresenta as conclusões obtidas da presente investigação.

Capítulo 6 - apresenta as referências bibliográficas citadas na dissertação.

Anexo I - o anexo I apresenta uma análise teórica e experimental de termogramas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sisal

2.1.1 Importância sócio-econômica

Os primeiro bulbilhos de sisal foram introduzidos no Brasil no início do Século XX trazidos da Flórida, Estados Unidos. Inicialmente a cultura foi introduzida no Estado da Bahia, por volta de 1903, e mais tarde, no final da década de 30, foram trazidas as primeiras mudas para o Estado da Paraíba. Posteriormente o sisal foi introduzido nos Estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco (SERRA SILVA, 1952 e MARQUES, 1978, citados por BARROS et al. 1999).

Em virtude das condições edafoclimáticas favoráveis, o Estado da Paraíba tornou-se o maior produtor nacional da fibra de sisal e, em 1951, o Brasil já ocupava a segunda posição mundial na produção dessa fibra. Na década de 60 a Paraíba perdeu a hegemonia para a Bahia e, atualmente, a Bahia, com 78,4%, e a Paraíba, com 19,53% respondem por 95% da produção nacional (SILVA, 1996a).

Uma das grandes vantagens da cultura do sisal é que a mesma pode ser cultivada em áreas cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis à exploração de outras culturas que venham a oferecer resultados econômicos satisfatórios. Isto é, é uma cultura bem adaptada à áreas de baixa precipitação pluviométrica e solos de baixa fertilidade, caso da região semi-árida do Nordeste (SANTOS, 1991).

Em termos mundiais, o sisal é produzido na maioria dos países tropicais, quase todos coincidentemente subdesenvolvidos, constituindo importante fonte geradora de renda interna, empregos e receitas cambiais (BAHIA, 1991). A produção mundial dessa fibra no período de 1990 a 1996 é apresentado no Quadro 2.1.

QUADRO 2.1 – Produção mundial da fibra de sisal e principais países produtores (em 1.000t)

Continente/País	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
África	95,8	94,4	76,7	84,4	83,3	75,0	73,5
Quênia	39,6	39,8	34,1	34,4	33,0	27,9	25,8
Madagascar	16,2	12,2	9,8	13,8	12,6	13,6	13,6
Tanzânia	33,4	36,0	24,3	29,6	30,2	26,2	26,8
América Latina	242,1	237,3	192,7	192,8	205,2	186,1	187,3
<i>Brasil</i>	<i>225,0</i>	<i>220,0</i>	<i>175,4</i>	<i>176,5</i>	<i>188,9</i>	<i>167,8</i>	<i>169,0</i>
Haiti	8,5	8,5	8,5	8,8	8,0	8,0	8,0
Venezuela	8,3	8,5	8,5	8,0	8,0	10,0	10,0
Ásia	25,0	30,0	32,0	32,0	32,0	40,0	40,0
China	25,0	30,0	32,0	32,0	32,0	40,0	40,0
Produção mundial	362,9	361,7	301,4	309,2	320,5	301,1	300,8

Fonte: FAO (1996), segundo BARROS et al., 1999.

A partir do Quadro 2.1 observa-se que o Brasil é o principal produtor mundial da fibra de sisal, embora deva-se destacar o declínio de produção de cerca de 25% observado no período de 1990-1996. No mesmo período a produção mundial caiu apenas 17%. Em termos de área plantada, dados estatísticos referentes ao ano de 1982 indicavam uma área plantada no Brasil de 340.000ha enquanto que em 1996 a área cultivada foi de apenas 120.000ha (LEAL et al, 1997). Esse fato pode vir a agravar o problema da erosão e dessertificação já observado no semi-árido nordestino.

Uma das razões para o declínio mundial da produção de sisal está relacionada com o aparecimento no mercado das fibras sintéticas. O polipropileno, por exemplo, pode ser produzido a preços mais baixos e com qualidade compatível ou mesmo superior, para a maioria dos fins a que são destinadas as fibras duras naturais, que a fibra de sisal (SILVA, 1996b). No Brasil, a baixa rentabilidade da cultura (em alguns casos prejuízo - o custo de produção do quilo de fibra bruta de sisal em 1997 atingiu R\$ 0,39 enquanto o preço pago ao produtor foi de apenas R\$ 0,33); a baixa produtividade (em torno de 800 Kg/ha contra 2.000Kg/ha dos países africanos); a ausência de uma política agrícola que garanta assistência técnica, creditícia e apoio à comercialização; e o êxodo rural são

importantes fatores que explicam a decadência das principais áreas produtoras (BARROS et al., 1999).

O Brasil exporta cerca de 62% da produção de sisal em forma de fibras e manufaturados tendo obtido receita de cerca de 90-100 milhões de dólares em 1996. Os principais importadores de fios agrícolas industrializados (baler e blinder twine) são os Estados Unidos, Europa, Canadá e Irã. O restante da produção brasileira é consumida na fabricação de fios, cordoalhas, mantas e tapetes, (MAGALHÃES, 1993, citado por BARROS et al., 1999).

Embora o sisal tenha pouca representatividade no valor total das exportações brasileiras e na renda agrícola do país, a sua cultura tem grande importância socio-econômica para a região Nordeste. Tal fato pode ser evidenciado pelos seguintes aspectos: (i) possibilita a ocupação de uma extensa área de solos pobres da região semi-árida onde vivem algumas das comunidades rurais mais pobres do Brasil; (ii) gera atividade econômica em regiões marginais para lavouras de subsistência as quais poderiam tornar-se inaproveitadas ou sujeitas a erosão e a desertificação devido a movimentação periódica dos solos; (iii) importante agente de fixação do homem na região semi-árida nordestina representando fonte de renda e emprego para um contingente de aproximadamente um milhão de pessoas. Infelizmente são empregos que geram renda familiar inferior a US\$ 50/mês e fazem uso de mão-de-obra infantil.; (iv) trata-se de cultura ecológica, visto que inexistem uso de defensivos e adubos químicos; (v) constitui fonte geradora de renda e emprego, durante o período da entressafra; (vi) fonte geradora de divisas para os Estados produtores uma vez que essa cultura faz parte da pauta de exportação; (vii) constitui de atividade de apoio à pecuária, nas fazendas do semi-árido, quer pela utilização da planta na alimentação ou como pastagem nas áreas exploradas com a cultura, (LEAL, 1997).

Existe, portanto, uma grande necessidade de se aumentar a área plantada, a produção e a produtividade dos campos de sisal. Acredita-se que a utilização da fibra na produção de produtos manufaturados de maior valor comercial tais como carpetes, tecidos, revestimentos para paredes e geotêxteis, polpa e papel, fios de qualidade, e, principalmente, na produção de materiais compósitos com matrizes a base de cimento e poliméricas para uso na construção civil possa vir a fomentar o agro-negócio do sisal em nosso país.

2.1.2 Botânica e morfologia do sisal

O sisal pertence à classe monocotiledônea, série Liliiflôrea, família Agavaceae, subfamília Agavoidea, gênero *Agave*, espécie *A. sisalana*. O gênero acha-se subdividido em dois subgêneros, distintos segundo as características do escapo floral: *Littaea* e *Euagave*. No primeiro as plantas apresentam escapo floral especiforme, com flores agrupadas em fascículos de 2 a 8 na axila das brácteas ao longo do pendúnculo florífero (MOREIRA et al. 1999). Esse subgênero abarca 80 espécies, (BERGER, 1915, citado por MOREIRA et al. 1999), no segundo, o escapo floral é do tipo paniculado, com ramificação em forma de candelabro, esse subgênero comporta 170 espécies (MEDINA, 1954). No segundo gênero, as poucas espécies de interesse comercial para a produção de fibras fazem parte da seção *Rigidea* e do subgênero *Euagave* (MOREIRA, et al. 1999).

Duas espécies destacam-se no gênero por sua importância comercial a *A. sisalana* e a *A. fourcroydes*. O sisal cultivado no Nordeste do Brasil pertence a *A. sisalana*, enquanto que a segunda espécie é explorada no México para a produção de cordas e cabos para embarcações.

O sisal possui sistema radicular fibroso e em forma de tufo, as raízes brotam adventiciamente da base da escara das folhas e na superfície inferior do tronco. O sistema radicular tem aproximadamente 3,0 m de diâmetro e 1,0 a 2,0 m de profundidade. A planta não possui caule mas há, no entanto, um tronco ou eixo principal onde inserem-se as folhas e o broto terminal. A folha de sisal é lanceolada linear e destituída de pecíolo. Sua parte superior é côncava e a inferior é convexa. Quanto as dimensões, é mais comprida que larga e afunilada quando aproxima-se da extremidade que é ocupada pelo espinho. A epiderme da folha é bem desenvolvida, cutícula cerosa, que repelem água com facilidade. Entre as duas epidermes encontra-se o mesófilo interno da folha. O parenquima é esponjoso, constituído de numerosas células com paredes delgadas e diferentes quanto ao tamanho. No parenquima acham-se embebidas as fibras, que são responsáveis pelo reforço e pela rigidez das folhas (MOREIRA et al, 1999).

O sisal é um vegetal do tipo monocárpico, isto é, floresce uma vez durante o ciclo de crescimento e desenvolvimento; posteriormente a planta morre. A flor do sisal é hermafrodita e está agrupada em cachos situados no final de cada ramo da panicula. Na polinização, o pólen dos ramos superiores pode, por gravidade, cair no estigma das flores

dos ramos inferiores, no entanto, normalmente a polinização natural é realizada por insetos, principalmente as abelhas que são atraídas pela grande quantidade de líquido viscoso secretado pelo tubo de perianto, durante a ântese (MOREIRA et al., 1999). A Figura 2.1 mostra a planta de sisal.

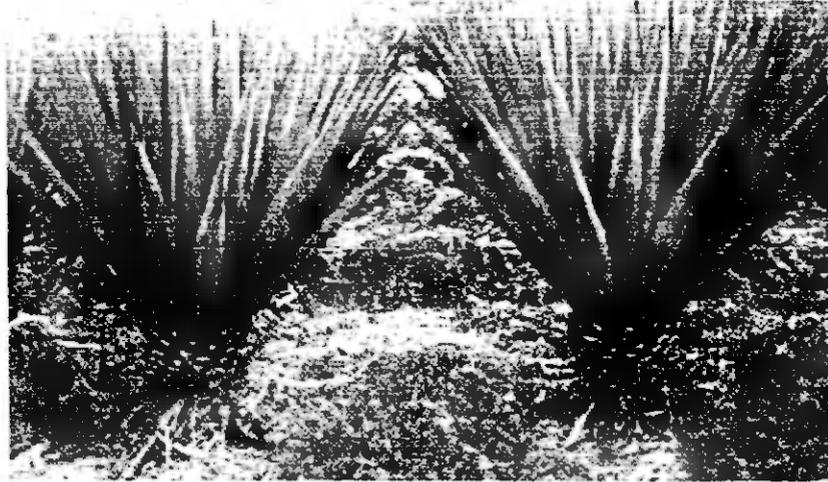


FIGURA 2.1: Planta de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

2.1.3 Clima e Solo

O sisal é uma planta que se adapta bem às regiões tropicais ou subtropicais, suportando secas prolongadas e elevadas temperatura (MARQUES, 1978). Adapta-se ao clima tropical semi-árido e às regiões de clima quente sem chuvas.

O clima ideal para o crescimento e o desenvolvimento das agaves é o quente, com temperaturas média anual entre 20 e 28°C, e grande intensidade de luz, precipitações não excessivas e regulares. Nos períodos das secas prolongadas, as folhas perdem a turgescência e pendem, recuperando-se após algumas chuvas (NETO & BELTRAO, 1999). O sisal como planta semixerófila, apresenta estrutura peculiares de defesa contra as ações da aridez, com folhas carnosas, número reduzidos de estômatos e epiderme fortemente cutinizada (MEDINA, 1959).

As regiões produtoras de sisal no Nordeste brasileiro apresentam altitude entre 209 e 1.012 m, precipitação pluvial entre 335,8 e 863,1 mm, concentradas entre 3 a 6 meses por ano. Os solos nas áreas em que se cultivam o sisal no nordeste, apresentam capacidade de armazenamento entre 50 e 125 mm, a evapotranspiração excede a precipitação anual total (NETO & BELTRÃO, 1999). O sisal adapta-se bem aos solos silicosos, silico-argilosos, soltos e profundos, dotados de bom teor de calcário. Preferem solos levemente ácidos ou alcalinos com pH variando de 5 a 8, (PRATA, 1983), produz também em solos rasos, rochosos e pobres (LUTZENBERGER, 1974), mas não adapta-se bem a terrenos úmidos (NETO & BELTRÃO, 1999), alagados com elevado teor de matéria orgânica, (GRANNER & GODOY JUNIOR, 1967).

2.1.4 Cultivo

O sisal é propagado vegetativamente por bulbilhos ou por rebentões. Os bulbilhos são produzidos no escapo floral sendo necessário o produtor levar em consideração alguns pontos tais como: *i*) preparo de viveiros, os bulbilhos devem apresentar tamanho superior a 10 cm; *ii*) o porte, vigor, crescimento do pendão floral da planta mãe; *iii*) o transplante da nova planta para o local definitivo só deverá ocorrer após essa nova planta atingir 40 cm de altura. A reprodução por meio de rebentões requer os seguintes cuidados: *i*) a planta mãe em boas condições fitossanitárias e desenvolvimento vegetativo; *ii*) selecionar os rebentões quanto a idade, tamanho e diâmetro do bulbo; *iii*) evitar rebentões, da planta-mãe que tenha emitido o pendão floral; *iv*) recomenda-se para o plantio dos rebentos, mudas com 40 a 50 cm de altura, com 12 a 15 folhas. A escolha das mudas deve ser definida levando-se em consideração principalmente o fator economia, posto que não existe diferença significativa quanto a produtividade, qualidade da fibra ou longevidade das plantas, quando utilizados para o plantio do sisalais, a propagação por meio de bulbilhos ou rebentões (MEDINA, 1963 citado por SILVA et al. 1999).

No Nordeste, dois tipos de sisal têm sido utilizados pelos produtores que são: *Agave sisalana* ou sisal comum e o híbrido 11648, originário da África (SOUZA SOBRINHO et al., 1985). Como a indústria utiliza as fibras de sisal para produção de fios,

cordas e cabos, a *Agave sisalana* apresenta-se com excelência para esses fins devido ao comprimento da folhas e a resistência da fibra, apesar de apresentar menor número de folhas/planta e menor rendimento de fibra/ha, em relação ao híbrido 11648. Os híbridos apresentam como vantagens ser mais resistentes à seca, o que possibilita a colheita durante todo o ano, (BEZERRA, et al., 1991, citado por SILVA et al. 1999).

O espaçamento mais utilizado pelos produtores, principalmente os paraibanos, é o de 2 m x 1 m, em fileira simples, conseguindo-se assim uma população de 5.000 plantas/ha. Plantios que seguem recomendações técnicas, utilizam espaçamentos mais largos 2,5 x 0,80 m ou 2,80 m x 0,70 m, mantêm-se assim a mesma população, entretanto viabiliza o consórcio com culturas intercalares nos dois primeiros anos além de facilitar a mecanização principalmente no roço e transporte das folhas na época da colheita. Já o espaçamento 3 m x 1,80 m, reduz a densidade para 1.850 plantas/ha, todavia possibilita o consórcio com a pecuária bovina, caprina ou ovina, além de permitir a produção de folhas mais longas, (FERREIRA SILVA, et al., 1999).

Como outras culturas, o sisal é sensível à concorrência com ervas invasoras, especialmente nos primeiros dois anos. Recomendam-se no primeiro ano, duas a três capinas, já no segundo ano uma a duas capinas dependendo da incidência de ervas daninhas, esses tratos, dependendo do espaçamento, entretanto podem ser feitos à tração animal ou ainda mecanizada, utilizando grades leves, e complementando-se em ambos os casos com limpa manual entre as plantas.

2.1.5 Colheita

A primeira etapa consiste em corte da folhas. Na *Agave sisalana* é possível realizar o primeiro corte 36 meses após o plantio, enquanto que no híbrido 11648, em média aos 48 meses. O corte é feito manualmente. Em geral a planta de sisal é submetida a um corte por ano, não necessariamente observando-se o intervalo de 12 meses, dependendo da conjuntura do mercado, podendo o produtor antecipar ou protelar o corte. Normalmente a *Agave sisalana* apresenta uma produção média de 180 a 250 folhas/ciclo/planta, enquanto que o híbrido 11648 a produção média de 600

folhas/ciclo/planta. O ciclo da planta dura em média 8 a 10 anos, em ambas as variedades.

No processo de colheita, as operações de corte, enfeixamento, transporte e desfibramento devem ser sincronizadas, ou seja, as folhas cortadas devem ser desfibradas no mesmo dia, evitando-se assim o murchamento, pois se ocorrer esse processo irá dificultar o desfibramento, e favorecer a fermentação e depreciação da fibra.

O desfibramento do sisal é a operação mais complexa e de maior custo. No Brasil, a extração da fibra (desfibramento) utiliza-se uma máquina denominada de “motor de agave” ou “máquina Paraibana”, (Figura 2.2). Por sua simplicidade, apresenta baixa capacidade operacional (em torno de 150 a 200 Kg de fibra seca em um turno de 10 hs/dia), causa um desperdício de 20% a 30% das fibras e envolve grande número de pessoas para sua operacionalização, (SILVA et al., 1993). A fadiga, aliada à falta de segurança da máquina, expõe os operadores a constantes riscos de acidentes, constituindo-se um dos principais problemas na operação da máquina. Devido o baixo custo, facilidade de manutenção, simplicidade e rusticidade, a máquina Paraibana ainda tem grande aceitação principalmente entre os pequenos e médios produtores. Outras máquinas desfibradoras foram desenvolvidas, como por exemplo a desfibradora automática de sisal, chamada Brasilana e máquina Nova Floresta (Figura 2.3). Após várias avaliações, a máquina Nova Floresta apresentou capacidade operacional equivalente a três máquinas Paraibanas e perdas de fibras no desfibramento significativamente inferior ao da máquina paraibana (SILVA, et al., 1999).

Após o desfibramento, a fibra é imersa em água limpa durante aproximadamente 8 a 10 horas para a limpeza (remoção dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofiliana). Em seguida são levadas para secagem ao sol por igual período (8 a 10 horas) até que atinja a umidade média de 13,5%. A seguir, as fibras são arrumadas em feixes para que sejam transportadas ao depósito. A Figura 2.4 mostra a colocação das fibras e varais para secar. Para melhoria na qualidade da fibra, submete-se essas ao batimento ou o penteamento, para remoção do pó e o tecido parenquimatoso, e retirada das fibras mais curtas, resultando um produto limpo, brilhoso, macio e valorizado, apesar de que a maioria dos produtores comercializam sua produção da forma bruta, isto é, sem nenhum processo de beneficiamento, (SILVA et al., 1999).

Após o batimento as fibras são selecionadas de acordo com o padrão de classificação baseado no comprimento medido em centímetros. Fibra extralonga possui

comprimento maior que 1,10 m, fibra longa tem comprimento entre 0,90 m e 1,10 m, a fibra média vai de 0,71 m até 0,90 m e a curta de 0,60 m até 0,70 m. Quanto a qualidade, a fibra de sisal classifica-se em quatro tipos (i) tipo superior – fibras lavadas, secas e bem batidas ou escovadas, de coloração creme-clara, macias, brilhosas e resistentes, isentas de manchas, umidade máxima de 13,5%, isentas de manchas, impurezas, entrançamentos, nós, fragmentos de fibras ou quaisquer outros defeitos; (ii) tipo 1 - fibras secas, bem batidas ou escovadas, coloração creme-clara ou amarelada com pequena variação em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas e quaisquer outros defeitos; (iii) tipo 2: fibras secas e bem batidas ou escovadas, coloração amarelada ou pardacenta, com pequenas extensões esverdeadas, ligeiramente ásperas, umidade máxima de 13,5%, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas; (iv) tipo 3: fibras secas, bem batidas ou escovadas, coloração amarelada, com parte de tonalidades esverdeadas, pardacenta ou avermelhada, com brilho e resistência normais, ásperas, manchas com variação bem acentuada quanto à cor, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas. O refugo é composto de fibras de sisal com comprimentos inferiores a 0,60m e características que não se enquadrem nos tipos descritos anteriormente, (BRASIL, 1987; 1989, citado por SILVA, et. al. 1999).

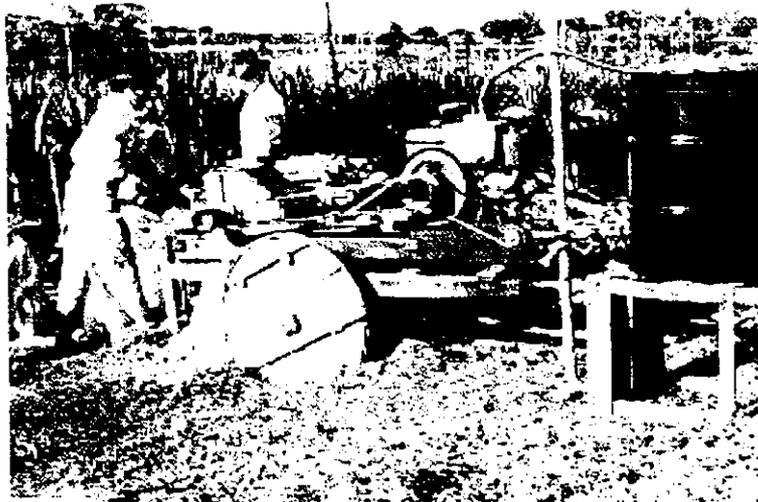


FIGURA 2.2: Máquina Paraibana para desfibramento das folhas de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

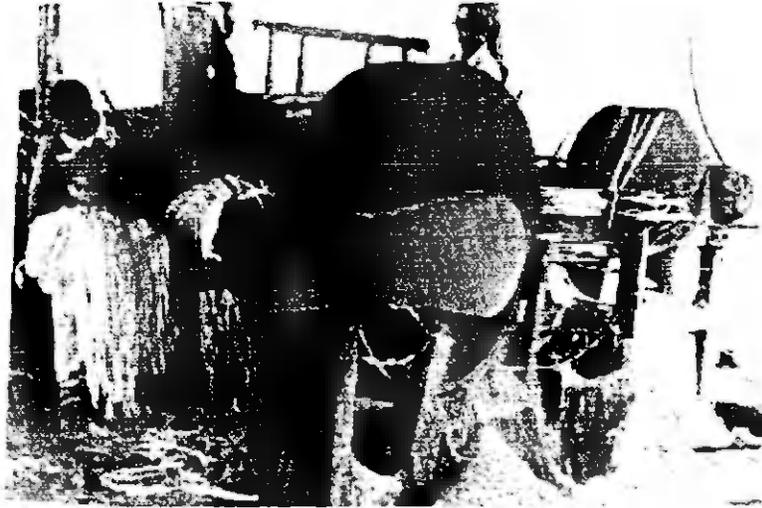


FIGURA 2.3: Máquina automática Nova Floresta para desfibramento das folhas de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

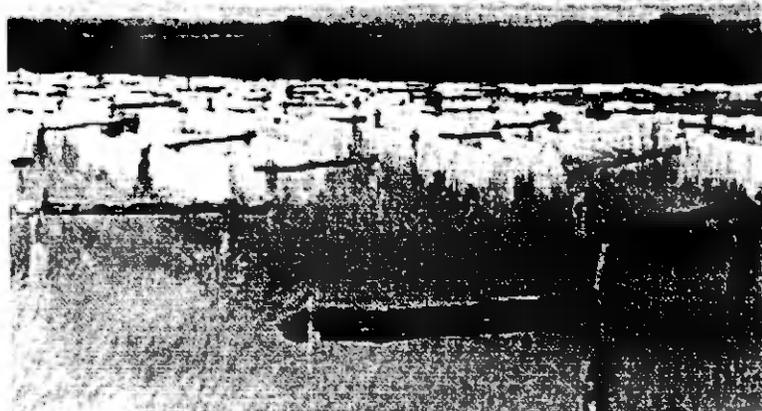


FIGURA 2.4: Colocação da fibra de sisal em varais para secar

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

2.1.6 Propriedades das fibras de sisal

2.1.6.1 Micro estrutura da fibra de sisal

A fibra de sisal é composta de numerosas fibro-células alongadas fusiformes que se adelgaçam de forma cônica na direção das extremidades. As fibro-células são unidas pelas lamelas médias as quais são constituídas de lignina, hemicelulose e pectina. Fisicamente, cada fibro-célula é constituída de quatro partes: a parede primária, a parede secundária, a parede terciária e o lúmen. Cada parede das células é formada de várias camadas de estrutura fibrilar composta por fibrilas de estrutura reticulada, paralela ou espiral. As fibrilas são compostas de micro-fibrilas, com espessura de 20 nm, que por sua vez são formadas por cadeias moleculares de celulose com espessura de 0,7 μm .

Quimicamente a fibra de sisal é constituída de celulose (70%), hemicelulose (12%), lignina (10%), pectina e substâncias graxas. A celulose é um polímero derivado da glicose β -D-glicopirranose. A degradação da celulose com álcalis envolve uma indesejável reação de remoção no terminal redutivo. A cadeia polimérica na celulose se arranja de uma forma compacta altamente regular. A celulose contém 10^4 unidades na cadeia polimérica, e possui um comprimento de cerca de 5 μm , (WALKER, 1993 citado por TOLÊDO FILHO, 1997). De acordo com GRAM, (1983) o grau de polimerização da celulose é alto, cerca de 25000 e, em consequência, existirão poucos terminais de cadeia para interromper o arranjo cristalino. Nessa área cristalina da fibra é difícil a penetração de outras moléculas (água ou outros produtos químicos) e ela apresenta boa resistência aos álcalis.

A hemicelulose é também um polímero de açúcares (tais como galactose e a manose) sendo raramente cristalino, (WALKER, 1993, citado por TOLÊDO FILHO, 1997). Ela apresenta baixo grau de polimerização e é solúvel em álcalis. A hemicelulose está presente principalmente na parede primária e seu grau de polimerização para a fibra de sisal varia de 50 a 200, (GRAM, 1983).

A lignina é uma substância aromática cuja estrutura ainda não foi completamente demonstrada, (WALKER, 1993, citado por TOLÊDO FILHO, 1997). De acordo com GRAM, (1983) e (VELPARI et al., 1980) a lignina é totalmente amorfa e pode ser decomposta ou lixiviada em ambientes alcalinos. A Figura 2.5 apresenta a micro-célula de uma fibra de sisal.

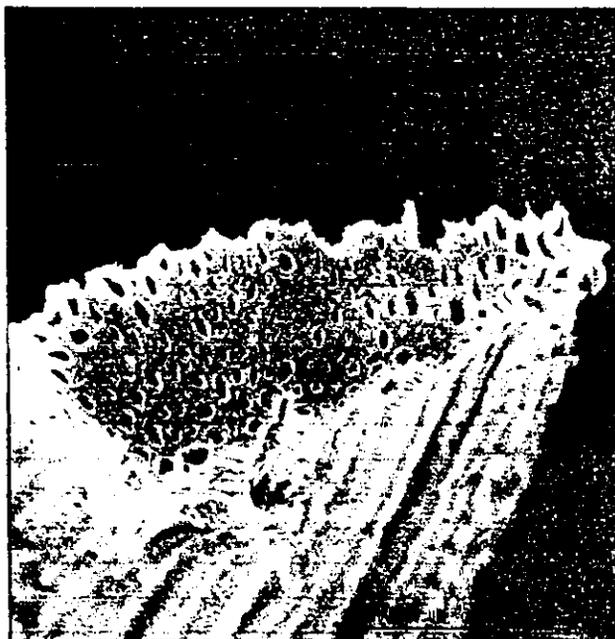


FIGURA 2.5: Seção transversal da fibra de sisal

Fonte: (TOLÊDO FILHO, 1999)

Apresenta-se a seguir as propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal. O Quadro 2.2 apresenta uma larga faixa de valores são observados, visto que tais propriedades dependem da idade da planta, local do cultivo e condições climáticas. Nesse quadro apresenta-se valores para as seguintes propriedades: diâmetro (ϕ), comprimento (l), peso específico (γ), absorção de água (ABS), resistência à tração (f_t), módulo de elasticidade (E) e deformação de ruptura (ϵ_{fu}) das fibras.

QUADRO 2.2: Propriedades físicas e mecânicas das fibras de Sisal (TOLÊDO FILHO, 1997)

Origem: Referência	ϕ (mm)	l (cm)	γ (kN/m ³)	ABS (%)	f_t (GPa)	E (MPa)	ϵ_{fu} (%)
Brasil: Ref.: Agopyan, 1990	0,2-0,3	-	12-13	123-137	374-378	-	5-5,5
Brasil. Ref.: CEPED, 1982	-	-	12,7	240	458	15,2	4,2
Origem: Ref.: Chand, 1988	0,05-0,3	-	14,5	-	530-640	9-22	3-7
Índia. Ref.: Mukherjee, 1986	0,1-0,3	-	14,5	-	530-630	17-22	4,3
Origem: Ref.: Nilsson, 1975	0,3-0,5	-	-	-	620	-	-
Brasil. Ref.: Tolêdo Filho, 1990	0,08-0,3	38-94	7,5-11	190-250	227-1002	11-27	2,1-4,2

2.2 Matriz a base de cimento

As principais matrizes a base de cimento que são normalmente utilizadas para a produção de materiais compósitos incluem: pastas, argamassas e concretos. Em todas elas usam-se, normalmente, o cimento portland como aglomerante.

O cimento portland comum (CP) pertence aos materiais classificados como aglomerante hidráulico. Obtido a partir da calcinação da mistura de rochas calcárias e de materiais silico-argilosos, o produto depois de calcinado, finamente moído, apresenta propriedades aglomerantes quando misturados com água. Os seguintes óxidos estão presentes em sua composição química: sílica (SiO_2), cal (CaO), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) que constituem, geralmente, 95-96% do total. Certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3) dos óxidos de sódio e de potássio que constituem os álcalis do cimento e o óxido de titânio também estão presentes. As propriedades químicas do concreto são determinadas, principalmente, pela composição do aglomerante e pela estrutura do gel de cimento. O processo que ocorre quando o gel é formado inicia-se quando o cimento é misturado com a água e pode ser subdivididos em 5 estágios, (GRAM, 1983).

Estágio inicial: ocorre durante os primeiros 10 minutos, quando a maior parte das substâncias facilmente dissolúveis do cimento são liberadas. Os seguintes íons podem ser detectados na água: Ca^{++} , OH^- , SO_4^- , K^+ e Na^+ . Durante esse período uma fina membrana, rica em SiO_2 , é formada em torno dos silicatos de cálcio e uma membrana de cristais de etringita é formada em torno dos aluminatos de cálcio.

Segundo estágio: durante esse período que pode durar cerca de 2 horas, as membranas formadas em torno dos minerais do cimento se tornam mais espessas, ocorrendo um aumento na concentração dos íons de Ca^{++} , OH^- , K^+ e Na^+ e um decréscimo no teor de SO_4^- .

Terceiro estágio: com duração de 3 até 20 ou 30 horas, cerca de 30% do cimento reage com parte da água. Esta fase é caracterizada pela rápida formação de C-S-H e de hidróxido de Cálcio (CH). Fica estabelecido o limite de saturação decorrente do aumento constante das concentrações de OH^- e Ca^{++} .

Quarto estágio: essa fase de hidratação do cimento, que pode ser chamada de estágio de endurecimento, dura até 28 dias, para os cimentos comuns. Nele, o retardamento da hidratação ocorre em função da diminuição da concentração do Ca^{++} na fase líquida. A concentração dos íons de K^+ e Na^+ na fase líquida aumenta constantemente durante os quatro primeiros estágios, mas todos os íons de potássio e sódio são considerados liberados após 28 dias.

Quinto estágio: no último estágio, há declínio na intensidade de hidratação e refere-se a idades superiores a 28 dias, quando o reticulado cristalino está definido e praticamente completo. A difusibilidade no entrelaçado dos cristais dificulta a continuação da hidratação.

2.3 Uso de fibras naturais no reforço de materiais compósitos a base de cimento

2.3.1 Propriedades dos compósitos

Vários estudos têm sido realizados onde observa-se que o sisal é uma das fibras vegetais com maior potencial para uso como reforço de matrizes a base de cimento (BRS, 1970; NILSSON, 1975; ZONSVELD, 1975; MUKHERJEE & SATYANARAYANA, 1984; GRAM, 1983; AZIZ et al., 1984; SWIFT e SMITH 1978; TOLEDO FILHO, 1997).

Quando submetido a esforços de flexão, presentes na maioria das aplicações de engenharia, os materiais compósitos podem absorver mais energia e conseqüentemente apresentam maior ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto que a matriz de cimento. A Figura 2.6 mostra exemplos de curva carga-deslocamento obtidas por TOLEDO FILHO (1997) para argamassas reforçadas com fibras de sisal. Nessa figura a curva *A* representa a matriz, a curva *B* compósitos reforçados com fibras curtas, a curva *C* compósitos reforçados com fibras longas e alinhadas e a curva *D* compósitos reforçados com fibras curtas e longas.

Das curvas, pode-se ver que, em geral, os compósitos apresentam um

comportamento quase que perfeitamente elástico até o surgimento da primeira fissura, semelhante ao comportamento da argamassa. Após fissurar, o compósito continua suportando carga e apresenta uma deformação de ruptura muito maior que a deformação na primeira fissuração. A presença da fibra muda o modo de ruptura do material, não sendo mais instantânea como na matriz. Além disso, a depender das características das fibras de sisal adicionadas à argamassa, a carga máxima pode quase que triplicar a carga de primeira fissura, como se observa na curva D do gráfico da Figura 2.6.

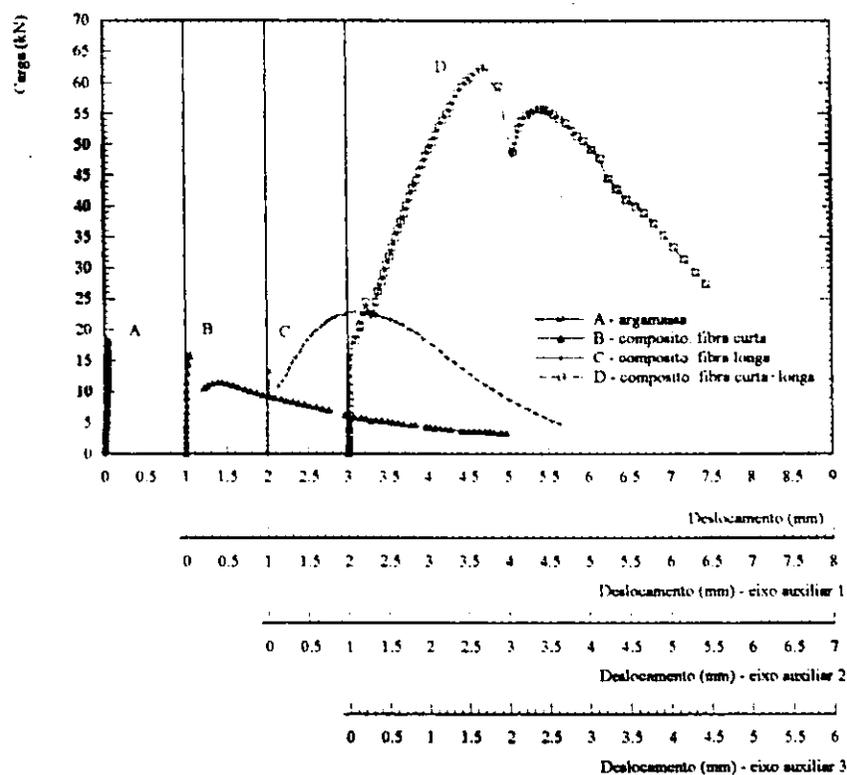


FIGURA 2.6: Exemplos de curvas carga-deslocamento para compósitos de argamassa reforçada com fibras de sisal.

A adição de fibras de sisal ao concreto pode reduzir sua resistência à compressão em cerca de 10% a 30% dependendo do tipo, comprimento e fração volumétrica da fibra, bem como do tipo e traço da matriz. Por outro lado, as fibras confinam o material e portanto retardam a propagação da primeira fissura, aumentando a tenacidade pós-carga de pico (TOLÊDO FILHO e GHAVAMI, 1996; TOLÊDO FILHO, 1997). O módulo de elasticidade da matriz é ligeiramente reduzido e o coeficiente de Poisson não apresenta variações significativas.

2.3.2 Degradação das fibras naturais em meios alcalinos

As fibras naturais podem sofrer vários graus de degradação quando expostas a um ambiente alcalino. A intensidade do ataque, determinada pela perda de resistência da fibra, depende do tipo de fibra e da solução alcalina (GRAM, 1983). Gram sugere que a causa básica da mudança das características da fibra de sisal no concreto está associada com a decomposição química da lignina e da hemicelulose na lamela média. A água alcalina presente nos poros do concreto dissolve a lignina e a hemicelulose e assim quebra as ligações entre as fibro-células. A decomposição da fibra longa em pequena célula unitária levaria a uma perda de eficiência do reforço. O lúmen da fibro-célula é preenchido com hidróxido de cálcio e a fibra perde a flexibilidade.

A perda da durabilidade, ou seja, a fragilização do compósito, está caracterizada pela mineralização das fibras, devido a migração de produtos da hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para as paredes das fibro-células e para o lúmen, (GRAM, 1983; TOLÊDO FILHO, 1997).

GRAM (1983), avaliou a degradação das fibras imersas em soluções com valor de pH variando de 8 a 13. Ele submeteu as fibras a ensaios de tração após 0, 56, 84, 120 e 180 dias de imersão em solução química. Os resultados dos ensaios executados após 180 dias de imersão em solução de hidróxido de cálcio de pH 12,6 indicaram que as fibras retiveram cerca de 20% da resistência original. Quando imersas em solução de hidróxido de sódio de pH 12,6 por 180 dias, apresentaram uma redução de cerca de 15% na sua resistência. Os resultados obtidos por Gram também indicaram que apenas o valor do pH não determinou se a fibra é decomposta ou não.

SINGH (1985), observou que o ataque alcalino sofrido pelas fibras vegetais é mais intenso em uma solução de hidróxido de cálcio do que em uma solução de hidróxido de sódio. Ele sugeriu que esse fato pode estar associado com a cristalização da cal nos poros e vazios das fibras.

SHIMIZU E JORILLO (1992) estudaram, com o uso de micrografias de microscopia eletrônica de varredura, a decomposição das fibras de coco. Segundo os autores, as fibras condicionadas em água saturada de cimento tornam-se marrom escuras em razão da reação entre o OH^- no cimento e a lignina nas fibras. Os autores sugeriram que isso pode ocorrer em decorrência de uma decomposição dos componentes (provavelmente

hidrólise da pectina pelas enzimas). As fibras que permaneceram um ano na argamassa imersa em água mostraram evidências de depósitos de hidróxido de cálcio na superfície. Os autores sugeriram que esse depósito poderia gradualmente aumentar a respectiva espessura preenchendo o lúmen e os poros da fibra e podendo causar a sua fragilidade.

KAWICHE (1991), estudou a degradação das fibras de sisal condicionadas por três meses em água e em solução de hidróxido de cálcio pH 12,6. A resistência original das fibras era de 588 MPa enquanto após 90 dias de exposição a esses tratamentos, a resistência das fibras foi de 267,8 MPa e 159,8 MPa, respectivamente, portanto um decréscimo significativo na resistência com os tratamentos estudados.

BERHANE (1987; 1994), analisou a durabilidade de telhas de argamassas reforçadas com fibras de sisal e observou que a vida útil das telhas a base de cimento portland reforçadas com fibras de sisal é muito curta, especialmente em climas quente e úmido. Ele observou também que os materiais pozolânicos têm efeito protetor às fibras de sisal em ambiente alcalinos, como é o caso do compósitos a base de cimento portland.

A partir dos estudos reportados observa-se que uma das maiores preocupações com relação ao uso de fibras naturais como reforço de sistemas a base de cimento está relacionada com a durabilidade dos compósitos que podem perder resistência e tenacidade com o tempo.

2.3.3 Métodos usados para redução da degradação das fibras e dos compósitos

Fatores ambientais como a variação de temperatura, agentes químicos e biológicos, umidade, etc., atuam sobre as argamassas reforçadas com fibras naturais causando a sua deterioração, por isso, é necessário ter um bom conhecimento de sua forma de ação para que se possa limitar seus efeitos nocivos.

Existem vários métodos que podem ser usados para redução da degradação das fibras nos compósitos, dentre estes pode-se citar: (i) uso do reforço em forma de cordão; (ii) impregnação das fibras com agentes bloqueadores da reação alcalina; (iii) impregnação das fibras com agentes repelentes de água; (iv) selagem dos poros da matriz;

(v) modificação da matriz; (vi) combinação dos métodos acima. A seguir apresenta-se uma revisão dos vários métodos.

(i) Uso da fibra em forma de cordão - estudos de durabilidade conduzidos por Gram (1983), indicam que o uso de feixe de fibras podem reduzir a tendência de fragilidade das mesmas. Isto ocorre porque as fibras externas, que estão diretamente em contato com a matriz, tornam-se frágeis mais rapidamente com o tempo, enquanto que aquelas mais internas mantêm suas resistências.

(ii) Impregnação das fibras com agentes bloqueadores da reação alcalina - utiliza-se agentes que reagem com os componentes das fibras para protegê-las e dificultar a ação alcalina do cimento sobre estas. Os produtos utilizados para proteção das fibras devem, além de penetrar nas cavidades das células, molhar suas paredes com a finalidade de criar uma superfície de contato (impregnante-fibra) adequada que impeça o posterior arraste, por lavagem, com água ou da dissolução alcalina, (KAWICHE, 1991). GRAM, (1983), utilizou diferentes impregnantes tais como: agente bloqueadores (silicato de sódio, sulfito de sódio, sulfato de magnésio, composto de ferro ou cobre, sulfito de sais de bário) ou compostos de agentes anti-oxidantes usados nos plásticos e borrachas industriais, mas nenhum desses tratamentos conseguiu melhorar a durabilidade das fibras de sisal reforçando matrizes a base de cimento. KAWICHE (1991), usou impregnantes orgânicos de origem vegetal tais como: tanino, azeite de trementina, azeite de cravo, azeite de linhaça, azeite de resina, colofônia e xilano, etc. Os resultados mostraram apenas uma pequena redução na fragilização dos compósitos

(iii) Impregnação das fibras com repelentes de água - outra maneira de diminuir ou evitar a degradação é prevenir a penetração da água alcalina do cimento nas fibras. Pode-se usar resinas como epóxi e poliéster, produtos betuminosos, óleo de linhaça com trepentina, grafite branco com verniz, óleo da castanha de caju, PVA, óleo silicone, borracha látex, breu, etc. GRAM (1983), usou repelentes de água do tipo: ácido esteárico e outros tratamentos com PVA, cera amido, óleo de silicone, breu, borracha látex, asfalto, mas nenhum deles conseguiu evitar o início da mineralização da fibras úmida além de reduzir a aderência fibra-matriz. Impregnação das fibras de sisal com compostos orgânicos de madeira tais como tanino, colofone e óleos vegetais foram estudados por CANOVAS et al., (1992). Esses compostos tinham características iniciais de aglutinantes e repelentes de

água. Os taninos de forma insolúvel, composto principalmente de sais metálicos e praticamente não decomposto e impermeáveis foram usados com a finalidade de proteger as fibras e evitar a penetração da água. O colofônio, fração não volátil da resina dos pinhos, é insolúvel em água mas é solúvel na maioria dos solventes orgânicos. Os óleos vegetais são compostos insolúveis em água e têm a propriedade de formar uma fina camada envolvente. Eles utilizaram o método de impregnação com difusão dupla (quente e frio). Em relação a durabilidade dos compósitos os resultados indicaram redução no processo de fragilização mas não conseguiu eliminar completamente.

(iv) Combinação de agentes bloqueadores com agentes repelentes de água - nos experimentos conduzidos por Gram (1983), os seguintes agentes bloqueadores foram usados: ácido bórico, formine, nitrato de potássio, nitrito de potássio, sulfato de magnésio, cromato de sódio e metasilicato de sódio. Como repelente de água foram usados: estearato de cromo, estearato de sódio, ácido esteárico, PVC. Os resultados mostraram que utilizando-se o formine-ácido esteárico ou nitrato de bário-ácido esteárico, retardou-se a fragilização dos compósitos.

(v) Selagem de poros: o movimento da água alcalina no compósito pode ser reduzido ou eliminado completamente selando-se o seu sistema de poros (não se deve esquecer a influência da temperatura e condições da mistura). Adicionando-se polímeros, silicone, breu, asfalto, óleo, estearatos, pequenas bolas de cera, etc. ao concreto no estado fresco, pode-se produzir a selagem do mesmo. Tornar o concreto menos permeável é outra alternativa e isso pode ser conseguido usando-se agregados com partículas mais finas e, principalmente, substituindo-se o cimento Portland por micro-silica, escória, etc. KAWICHE, (1991), usou os seguintes produtos para selagem da matriz: breu, sabões metálicos, tanino, colofônia e cera montana. Os resultados mostraram que a colofônia e o tanino contribuíram favoravelmente para a melhora das características físico-mecânicas do compósito com o tempo.

(vi) Modificações na matriz - Sabe-se que o pH do cimento portland excede 13. Uma maneira de diminuir ou evitar a decomposição das fibras naturais no meio alcalino do cimento pode ser a redução da alcalinidade da água dos poros do concreto. Dois tratamentos podem ser utilizados: (1) **Carbonatação do compósito** - TOLÊDO FILHO

(1997), realizou experimentos neste sentido e obteve excelentes resultados para reduzir a fragilização do compósito com o envelhecimento. (2) **Uso de cimento aluminoso e substituição do cimento Portland comum por pozolanas** – GRAM (1983), utilizou o cimento aluminoso e obteve resultados que apontam no sentido de redução da tendência de fragilização, entretanto não o eliminou completamente. Outra maneira de se reduzir a alcalinidade da matriz é substituindo-se parcialmente o cimento portland por pozolanas (material altamente reativo). Gram (1983), substituiu de 45% do cimento por micro-sílica, escória e eliminou a perda da tenacidade do compósito. Já a substituição de parte do cimento por “fly ash” e escória de alto forno não apresentou melhora significativa. TOLÊDO FILHO (1997), fez a imersão das fibras em micro-silica líquida e obteve excelentes resultados.

2.4 Aditivos minerais

Os aditivos minerais mais utilizados são as pozolanas. Essa denominação abrange todos os materiais silicosos ou silico-aluminosos que não possuem propriedades cimentícias mas que, quando finamente subdivididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (reação pozolânica) formando compostos com propriedades cimentícias. A importância destas adições deriva principalmente de dois aspectos da reação pozolânica: (i) a reação consome óxido de cálcio o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta de cimento endurecida e da fibra vegetal uma vez que a mineralização e ataque alcalino ficam reduzidos; (ii) estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados mostraram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares maiores, melhorando assim a resistência e impermeabilidade do sistema.

Os materiais pozolânicos naturais que podem ser utilizados incluem as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas e as argilas calcinadas. Alguns subprodutos industriais têm grande potencialidade, quais sejam escória, microsilica e a cinza da casca de arroz. Existem também materiais de sílica amorfa obtidos por processamento. Um deles é a metacaulinita, obtido pela calcinação de argila caulínica (caulim), pura ou refinada, a

temperaturas entre 650 ° C e 850 ° C, e que, quando moída até a finura de 700 m²/kg ou 900 m²/kg, resulta num material de grande pozolanicidade.

Com o objetivo de construir-se obras mais duráveis e resistentes, os gregos utilizavam um tufo vulcânico, encontrado na Ilha de Thera, enquanto os romanos se valiam de outros materiais também de origem piroclástica, encontrados nas vizinhanças da Baía de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do monte “Pozzuoli”, nas proximidades do Vesúvio, esses materiais receberam a designação de pozolanas. Quando não dispunham de materiais vulcânicos, os romanos empregavam telhas cerâmicas moídas, que segundo registros históricos da época, produziam efeito similar, (ZAMPIERI, 1989).

Materiais pozolânicos têm sido estudados e usados em misturas com cimento portland desde 1930. Na China, Índia, Turquia, Brasil e México estão usando pozolanas para produção de cimentos com o objetivo de produzir materiais de baixo custo e baixo consumo de energia. O custo da pozolana manufaturada foi de aproximadamente um terço do cimento portland comum (SAAD, et al., 1981).

As propriedades de uma pozolana variam consideravelmente dependendo de sua origem, isto porque varia na proporção dos materiais ativos, mineralogia e características físicas. A capacidade que as pozolanas tem de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e em misturas com cal e água, é chamada de atividade pozolânica, atividade esta que depende da percentagem de sílica e da alumina. As sílicas conferem resistência mecânica às pozolanas, sendo desejável que elas tenham no mínimo 40% de SiO₂ e até 30% de Al₂O₃ e teores mínimos de CaO e MgO.

A atividade pozolânica de um material pode ser determinada de várias maneiras, sendo satisfatória avaliação da resistência mecânica, até mesmo porque a análise química não é suficiente para tal fim, embora seja útil no controle qualitativo das pozolanas.

Para se ter atividade pozolânica, o material deve apresentar uma instabilidade ou alteração na sua estrutura cristalina. Assim, a sílica e a alumina são reativas quando suas ligações estruturais são fracas ou destruídas por calcinação dos materiais amorfos. Entretanto, para assegurar a reatividade, esta instabilidade, não é suficiente.

A atividade pozolânica consiste em uma agressão alcalina na superfície por uma solução de cal, dos minerais sílica aluminosos, e na combinação dos ions resultantes

dessa agressão. DROM e MALQUIORI, citado por COOK et al., (1977), relataram que a atividade pozolânica de qualquer material contendo sílica reativa pode ser determinada adicionando-se óxido de cálcio à pozolana com água isenta de dióxido de carbono e medindo-se a alcalinidade total e o teor de óxido de cálcio após um determinado tempo de reação.

A forma, finura, distribuição do diâmetro das partículas, densidade e composição da pozolana, influenciam as propriedades da mistura do concreto no estado fresco e desenvolvimento da resistência do concreto.

Com o uso de materiais finamente divididos, tendo propriedades pozolânicas, pode-se prever uma maior economia, pois esses materiais permitem uma redução no consumo de energia na sua produção. O mineral, utilizado para mistura deve apresentar aproximadamente a mesma finura ou inferior a do cimento portland.

As pozolanas usadas no presente estudo foram o tijolo queimado moído e a metacaulinita. Como já foi mencionada, as argilas não calcinadas não possuem nenhuma atividade pozolânica, entretanto, quando calcinada a uma temperatura entre 600 e 900°C, elas podem tornar-se ativa e fixar o cálcio hidratado (BARONIO, G. e ZINDA, L., 1996). Apesar disso algumas questões precisam ser analisadas, como por exemplo: quantidade, a qualidade e as condições de produção para se avaliar o quanto desse material pode parcialmente substituir o cimento (WILD, S. et al., 1996).

A metacaulinita tem mostrado ser altamente reativa com os hidróxidos de cálcio hidratado resultante da hidratação do cimento portland. Estudos desenvolvidos por Khatib (Kathib et al., 1996) tem demonstrado que o teor de hidróxido de cálcio em misturas contendo metacaulinita é reduzido quando comparado com misturas sem adição. Isso acontece porque a metacaulinita reage com o hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento produzindo silicato de cálcio hidratado. Oriol (ORIOLO e PERA, 1995] sugere que com uma substituição em torno de 30-40% de cimento por metacaulinita todo o hidróxido de cálcio seria eliminado da pasta de cimento hidratada.

SABIR B.B., et al. (1996), observaram um aumento relativo na resistência inicial aos 7 dias e redução dessa aos 91 dias, quando comparada com a referência de cimento portland. WILD, S., et al. (1997), também observaram este comportamento, quando substituiu o cimento portland por este material aos níveis de 15 e 20%. O aumento da resistência do concreto foi mais acentuada até os 14 dias de idade, (WILD, et al., 1996). A incorporação de metacaulinita na pasta do cimento indicam que houve refinamento nos

poros da estrutura do concreto, (KHATIB & WILD, 1996). A resistência a compressão da pasta aumentou quando substituiu cimento por metacaulinita quando comparada a de controle, (KHATIB, J. M., et al., 1996)

MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar o material e os métodos empregados no desenvolvimento da presente dissertação. As normas utilizadas serão citadas e referenciadas enquanto que os métodos não normatizados serão descritos detalhadamente.

3.1 MATERIAL

3.1.1 Fibras de sisal

Utilizou-se a fibra produzida no município de Pocinhos, localizado no semi-árido paraibano. No preparo das espécimes usou-se uma fração em massa de 0,5% em relação a quantidade de cimento portland presente na mistura. As fibras possuíam comprimento de 25 mm. As propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal produzido no município de Pocinhos foram obtidas por TOLÊDO FILHO (1997) e os resultados estão apresentados no Quadro 2.2.

3.1.2 Cimento portland

Foi utilizado o cimento portland comercial composto com filler, CP II – F – 32. O cimento foi adquirido acondicionado em sacos de papel do tipo “Kraft” de 20 Kg. Para evitar a hidratação prematura do cimento, os sacos de papel foram colocados em sacos plásticos e devidamente lacrado. A finura do cimento foi determinada medindo-se a quantidade de material retida na peneira ABNT nº 200 (0,074mm). Uma amostra do material foi enviada para o Laboratório de Análises Minerais - LAM, do CCT/PRAI/UFPB, Campus II, a fim de se proceder a análise química do mesmo.

3.1.3 Tijolo moído queimado

Utilizou-se restolhos de tijolos cerâmicos, calcinados a temperatura de cerca de 900 °C, fornecidos pela Cerâmica Cemarisa Ltda., localizada no município de Guarabira - PB. O restolho foi fornecido em pedaços de cerca de 5 – 10 cm de comprimento e, ao chegar no laboratório, o mesmo foi triturado num britador de mandíbula até o mesmo ficar com partículas de cerca de 0,2 a 0,5 mm de diâmetro médio. A seguir o material triturado foi levado ao moinho de disco e moído até que 100% do material passasse na peneira ABNT nº 200 (0,074mm). Determinou-se também a quantidade de material retido na peneira ABNT nº 325 (0,044mm), realizando-se peneiramento por via úmida. Amostras do material foram enviadas para os Laboratório de Análises Minerais e de Solidificação Rápida, a fim de se proceder a análise química e a difratometria do mesmo. A densidade real do tijolo moído queimado foi determinada segundo a NBR 6474/84.

O índice de atividade pozolânica do tijolo moído queimado com cimento portland CP – II – F – 32, foi determinado segundo a NBR 5752/77.

3.1.4 Metacaulinita

Utilizou-se uma metacaulinita fornecida pela indústria Itapessoca Agroindustrial, localizada no município de Goiana – PE. A caulinita foi calcinada a uma temperatura de cerca de 750 °C e fornecida, na forma granular, acondicionada em sacos de papel tipo “Kraft”. Os grãos da metacaulinita possuíam diâmetro médio de aproximadamente 0,2 a 0,3 mm e os mesmos foram moídos em moinho de disco até que 100% do material passasse na peneira ABNT nº 200 (0,074mm). A finura, composição química, análise difratométrica, densidade real dos grãos e o índice de atividade pozolânica com cimento da metacaulinita foram determinados seguindo-se os procedimentos descritos no item 3.1.3.

3.1.5 Areia

No estudo da durabilidade foi utilizada uma areia originária do leito do rio Paraíba, gentilmente cedida pela Construtora CIPRESA – Construção Civil Ltda.. A areia foi seca ao ar antes de ser utilizada na moldagem dos corpos-de-prova. A granulometria da areia foi realizada segundo a NBR 7217/87 e a mesma apresentou módulo de finura (MF) de 2,49. No estudo da influência da adição do material pozolânico na resistência à compressão das argamassas de cimento portland utilizou-se areia normal para ensaio de cimento preparada de forma a atender as prescrições da EB 1133.

3.1.6 Água

Foi utilizada água potável fornecida pela concessionária de Campina Grande-PB.

3.2 MÉTODOS

Conforme discutido na revisão bibliográfica, as fibras vegetais sofrem um processo de mineralização nas matrizes a base de cimento portland devido a presença do hidróxido de cálcio. Para se reduzir esse problema, procurou-se desenvolver uma matriz menos alcalina e com um teor de cal livre nulo ou desprezível. A metodologia apresentada a seguir está dividida, portanto, em duas partes: (i) desenvolvimento da matriz a base de cimento-pozolana e (ii) estudo da durabilidade do compósito.

3.2.1 Desenvolvimento da matriz de baixa alcalinidade

A matriz a base de cimento portland-pozolana foi desenvolvida substituindo-se parcialmente o cimento por metacaulinita ou tijolo moído queimado. Os estudos realizados visaram determinar o consumo do hidróxido de cálcio em função da percentagem de substituição em peso do cimento pelos materiais pozolânicos e como esta substituição afetava a resistência à compressão e flexão da matriz de cimento portland. A evolução da resistência das argamassas foi avaliada até a idade de 200 dias.

3.2.1.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio das argamassas mistas

Para se determinar o consumo do hidróxido de cálcio, realizou-se a análise termogravimétrica de pastas de cimento portland-pozolanas após 28 dias de cura em água e após 90 dias de envelhecimento natural ou acelerado. O envelhecimento natural foi realizado na cidade de Campina Grande – PB colocando-se as amostras sobre estantes de exposição produzidas segundo a ASTM D1435. O envelhecimento acelerado foi realizado visando promover uma degradação mais rápida e intensa do material. O envelhecimento

consistiu em se submeter as amostras a ciclos de molhagem e secagem que, como discutido na revisão bibliográfica, favorece os mecanismos de transporte no concreto. O ciclo estabelecido no presente estudo tinha uma duração total de 24 horas e consistia de: (a) 15 horas de secagem em estufa calibrada a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) 30 minutos de secagem ao ar (antes de imersão em água); (c) 8 horas em água; (d) 30 minutos de secagem ao ar (antes de levar as amostras a estufa para início do próximo ciclo).

As pastas foram produzidas numa proporção (cimento + pozolana):água de 1:0,45 e as amostras consistiam de pequenos discos de cerca de 3 cm de diâmetro por 1 cm de altura. Os índices de substituição em peso do cimento portland por metacaulinita e tijolo moído queimado foram de 20, 40 e 50%. Após 28 dias de cura e após 90 dias de envelhecimento as amostras eram pulverizadas num cadinho de porcelana até que 100% do material passasse na peneira ABNT nº 200 (0,074mm). As amostras eram então acondicionadas em recipientes de plástico que eram lacrados e conduzidos ao Laboratório de Termoquímica do Departamento de Engenharia Química, do CT/UFPB, Campus I para realização do ensaio termogravimétrico. Foi utilizado um aparelho do tipo SHIMADZU TGA-50, operando a uma taxa de aquecimento de $10,0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até a temperatura máxima de 900°C . Utilizou-se atmosfera de nitrogênio, célula de alumina e fluxo do registrador de 50 ml/min.

Devido aos diversos fatores que influenciam a forma do diagrama termogravimétrico (tipo de gás utilizado, natureza da atmosfera onde se produz a queima, forma do cadinho, estado da amostra, massa da amostra utilizada e velocidade de aquecimento) não é possível definir com certeza absoluta, somente a partir do diagrama, os pontos de início e fim das reações e a consequente perda de massa devida a cada uma delas. Por esse motivo, recomenda-se que o ensaio termogravimétrico seja acompanhado por outros ensaios termométricos tais como a Análise Térmica Diferencial (ATD) e a Análise Termogravimétrica Derivada (TGD). Quando não se dispõe dos resultados de tais ensaios, caso da presente dissertação, pode-se fazer uma análise experimental dos termogramas com o objetivo de calcular a fração em massa de uma determinada substância a partir do estudo experimental proposto por VALLET (1972) que está apresentado no Anexo I.

Ensaio de difração de raio-x foram também realizados nas pastas de cimento portland hidratado visando uma avaliação qualitativa da presença de hidróxido de cálcio nas misturas. A classificação e identificação é feita com base nas reflexões basais e

os argilominerais são divididos em grupos. Pode não ser possível a identificação completa de cada argilomineral devido às incertezas que aparecem na interpretação das análises químicas de misturas ou pelas reações químicas entre as fases formadas no aquecimento. As análises de difração de raio-x serão feitas a partir de pastas de cimento portland-pozolanas após 28 dias de cura em água e após 90 dias exposto ao ar (envelhecimento natural) ou 94 dias de envelhecimento acelerado. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida – UFPB-CT-DTM – Campus I.

3.2.1.2 Resistência mecânica das argamassas de cimento portland-pozolana

A resistência mecânica das argamassas foi determinada através da realização de ensaios de resistência à compressão simples e à flexão. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. As misturas foram produzidas em uma argamassadeira de 5 litros, marca EBERLE, modelo 6071-B, e os corpos-de-prova foram moldados e ensaiados seguindo-se as recomendações da norma brasileira NBR – 7215. Os corpos-de-prova foram mantidos nos respectivos moldes, cobertos com um pano úmido, durante as primeiras 24 horas e, após esse período foram curados em água até a idade de 28 dias. Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica de 50 t da LOSENHOUSI'V a uma taxa de carregamento de 0,08 MPa/segundo.

Ensaio de flexão em quatro pontos foram executados em corpos-de-prova de 300 mm x 60 mm x 12,7 mm. As misturas foram produzidas em uma argamassadeira de 15 litros e os corpos-de-prova foram confeccionados utilizando-se moldes de aço projetados especificamente para esse fim. Os moldes permitiam a produção de 08 espécimes simultaneamente. Os moldes eram fixados a uma mesa vibratória e a vibração executada, sem se promover segregação da mistura, até a remoção das bolhas de ar aprisionado que ascendia para a superfície das amostras. A Figura 3.1 mostra o molde utilizado. Três corpos-de-prova foram moldados para cada idade estudada e a cura foi realizada seguindo-se o mesmo procedimento adotado nos ensaios de compressão.



FIGURA 3.1: Molde utilizado na produção dos corpos-de-prova de flexão

Os ensaios de flexão foram executados numa prensa MTS de 10 t a uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,16 mm/min. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 3.2. Estabeleceu-se um vão entre apoios de 275 mm, seguindo-se as recomendações do Comitê Técnico No. 49 do RILEM (1984). As curvas carga x deflexão foram registradas em uma “ploter” X-Y-T e posteriormente digitalizadas utilizando-se o software Digitalize-Pro. As curvas digitalizadas foram transferidas para planilha eletrônica Excel e analisadas.

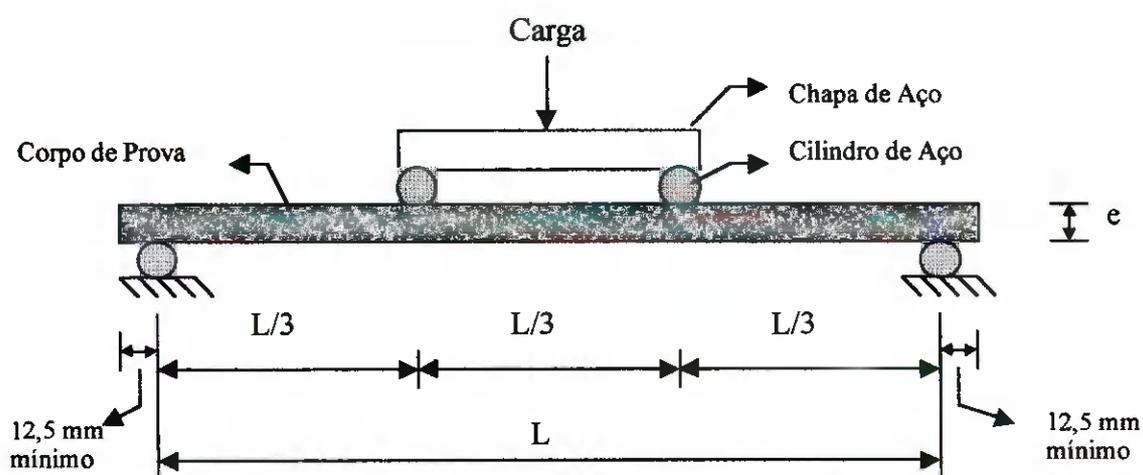


FIGURA 3.2: Esquema do ensaio de resistência à flexão em quatro pontos

O programa experimental para se avaliar a influência da adição de material pozolânico (MP) na resistência à compressão das argamassas de cimento portland foi estabelecido utilizando-se um método estatístico chamado análise fatorial de experimentos. A técnica do desenho fatorial foi selecionada, em oposição ao clássico “experimento um de cada vez”, uma vez que a mesma possibilita uma abordagem eficiente e estruturada para estudar como as propriedades de um material é influenciada por um grande número de variáveis. Através do desenho fatorial é possível que seja determinado se os principais fatores que afetam a propriedade em estudo foram levados em consideração; qual dos fatores tem efeito significativo nessa propriedade e se existe interação entre os fatores. Adicionalmente, o uso do desenho de experimentos conduz a um modelo matemático que permite prever o valor da propriedade em estudo em função dos fatores considerados.

Para se ter um desenho fatorial completo deve-se estabelecer, para cada fator, um número de níveis a serem investigados. O nível de cada variável em um experimento pode cobrir uma grande faixa de valores. O propósito de um desenho de experimentos não é testar os extremos de um processo, mas testar uma área racional de interesse prático no espaço dos fatores. Se uma variável é significativa e os resultados obtidos em um nível mais baixo mostram que é aconselhável a avaliação da variável dependente de um nível mais alto, experimentos subsequentes podem ser realizados para explorar esse novo nível.

No presente trabalho foi usado um desenho fatorial com dois níveis, com dois fatores e três reproduções, para se estudar a influência da metacaulinita (MC) e do tijolo moído queimado (TM) na resistência das argamassas. Os fatores estudados foram: fator água:cimento (X1) e percentagem de substituição (em peso) do cimento portland pelos materiais pozolânico (X2). A seleção destes fatores foi baseada no fato de que eles são as variáveis básicas consideradas na dosagem dos traços de argamassas à base de cimento e pozolanas. O uso do desenho fatorial vai determinar, no entanto, se estes fatores primários afetam a resistência das argamassas. A proporção material cimentante:areia foi mantida constante e igual a 1:1,5 em todo o estudo. O desenho fatorial é mostrado na Figura 3.3 onde os limites mais baixos e mais altos selecionados para cada fator são apresentados nos eixos da figura. O traço da argamassa de referência (sem substituição de cimento portland), foi de 1:1,5:0,41.

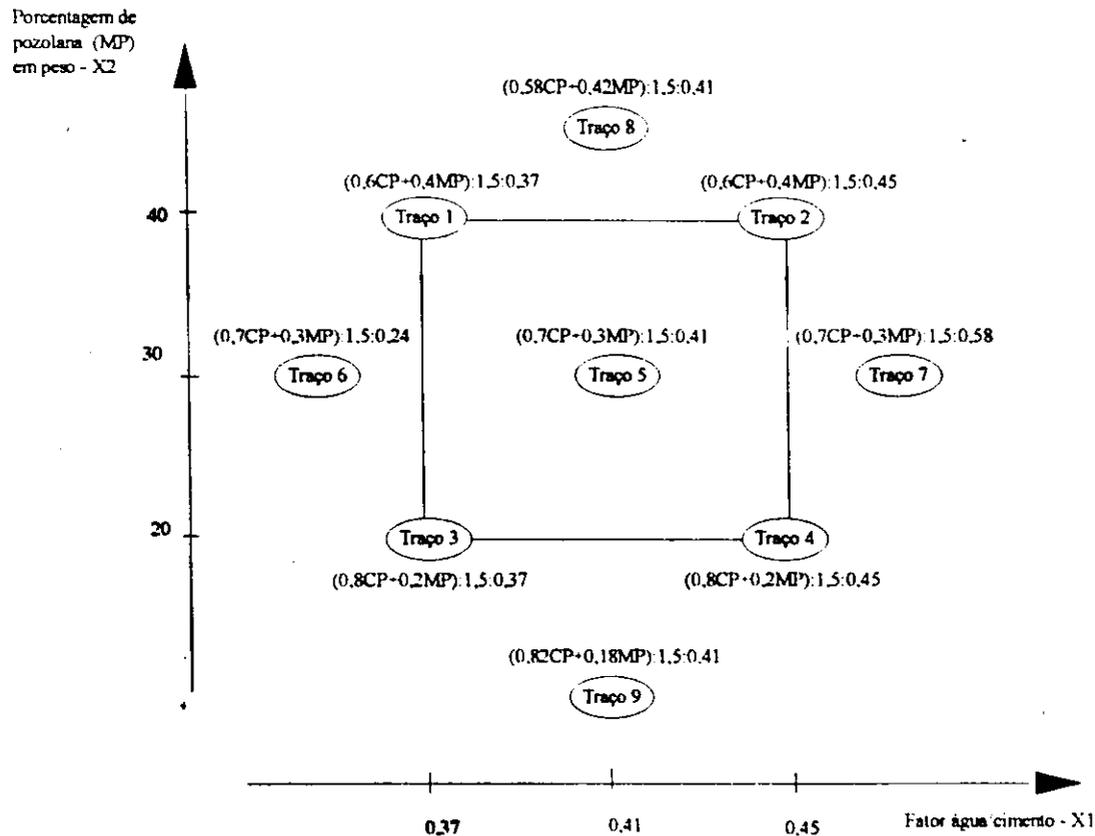


FIGURA 3.3: Desenho fatorial estabelecido para se avaliar a influência da adição de material pozzolânico na resistência à compressão das argamassas de cimento portland

Para se avaliar a evolução da resistência à compressão com o tempo, corpos-de-prova da argamassa de referência e da mistura 5, traço (0,7CP+0,3Material Pozzolânico):1,5:0,41, foram moldados para serem ensaiados após 28, 90, 120 e 200 dias de cura úmida. Três corpos-de-prova foram ensaiados em cada idade.

Para se estudar a influência da substituição parcial do cimento portland por materiais pozzolânicos na resistência à flexão, moldou-se misturas com 20, 30, 40 e 50%, em peso, de metacaulinita ou tijolo moído queimado como substitutos parciais do cimento portland. O traço da matriz utilizada foi de 1:1,5:0,45. A evolução da resistência à flexão com o tempo das argamassas mistas e da argamassa de cimento portland foi avaliada a partir de ensaios de flexão em corpos-de-prova curados por 28 dias de cura em água e posteriormente expostos a ambiente natural até as idades de 90, 135 e 180 dias. Três corpos-de-prova foram ensaiados em cada idade.

3.2.2 Método de produção dos compósitos

Os compósitos foram produzidos utilizando-se uma argamassadeira de 15 litros nas seguintes etapas:

- a) colocar toda a areia na argamassadeira e ligar a mesma;
- b) adicionar 40% da quantidade total de água;
- c) adicionar as fibras de sisal aos poucos sem amontoá-las, para evitar a formação de novelos. Cerca de 30 a 35% da quantidade de água da mistura é progressivamente adicionada durante esse estágio para manter a mistura úmida e trabalhável;
- d) adicionar o cimento;
- e) adicionar a água restante;
- f) continuar misturando até se obter uma boa dispersão das fibras na mistura.

Corpos-de-prova de flexão de 300 mm x 60 mm x 12,7 mm foram moldados, curados e ensaiados seguindo-se o procedimento adotado para os ensaios de flexão descrito no item 3.2.1.2.

Os ensaios de flexão nos compósitos, foram conduzidos até uma deflexão no meio do vão de aproximadamente 4 mm, com o objetivo de se determinar os parâmetros de tenacidade utilizados na avaliação da durabilidade dos mesmos. Tais parâmetros serão descritos no item 3.2.4. A Figura 3.4 mostra um corpo-de-prova sendo ensaiado na prensa MTS.

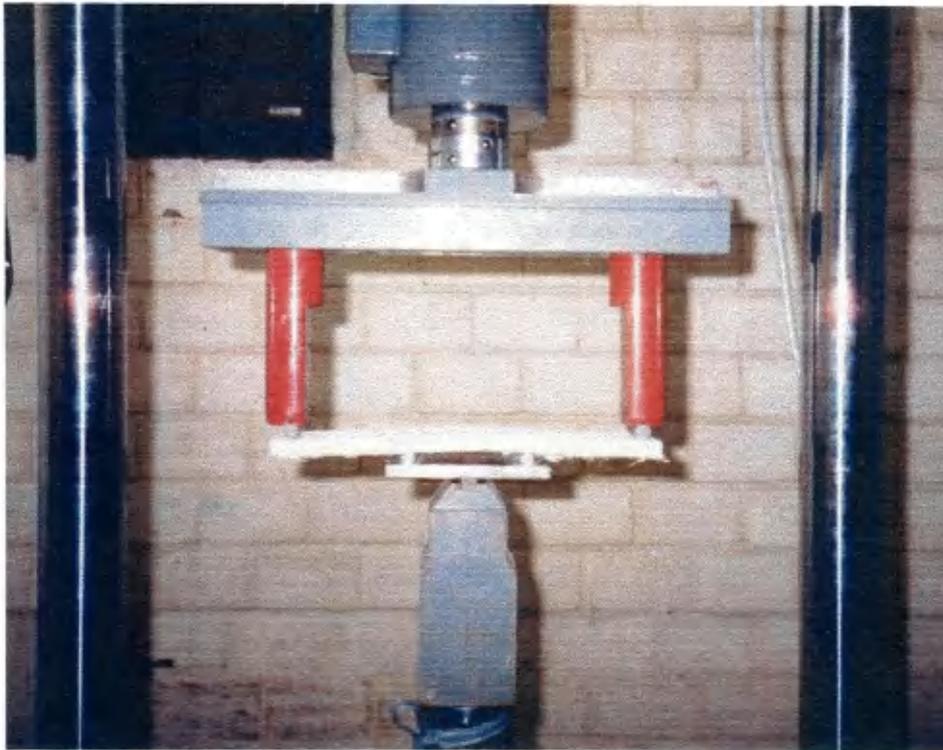


FIGURA 3.4: Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão na MTS

O número de corpos-de-prova produzido para cada mistura variou de 9 a 21 dependendo do programa experimental estabelecido para se estudar a durabilidade dos compósitos que será apresentado a seguir.

3.2.3 Programa experimental usado no estudo da durabilidade dos compósitos

A deterioração, com o tempo, dos compósitos fibras vegetais-argamassa de cimento Portland já foi comprovada por diversos pesquisadores conforme discutido na revisão bibliográfica. Na presente dissertação estudou-se a durabilidade de materiais compósitos cujas matrizes possuíam teores de metacaulinita ou tijolo moído queimado em sua composição variando de 20 a 50%, em peso, do cimento portland. O compósito produzido com matriz de cimento portland foi ensaiado apenas após 28 dias de cura em água para funcionar como referência. Os compósitos com matrizes pozolânicas foram ensaiados após 28 dias de cura em água e após envelhecimento natural e acelerado. O

envelhecimento de todas as amostras foi realizado conforme procedimento descrito no Quadro 3.1 e iniciado após o período de cura em água.

Um sistema especial de bandejas foi projetado para se transportar as espécimes da estufa para os tanques de cura durante o processo de intemperismo acelerado. O sistema é apresentado na Figura 3.5.

O Quadro 3.1 apresenta o programa experimental utilizado. A relação material cimentante (cimento + material pozolânico):areia de 1:1,5; o fator água/cimento de 0,45 e a porcentagem de fibra de sisal (S) 0,5% em relação ao peso do material cimentante foi mantida constante para todas as misturas. As fibras tinham 25 mm de comprimento.



FIGURA 3.5: Sistema utilizado para transporte das espécimes submetidas a ciclos de molhagem e secagem

QUADRO 3.1 - Programa experimental usado no estudo da durabilidade dos compósitos

Mistura	Traço em peso da mistura (CP:MP:areia:a/c:%S)	Data de ensaio		
		Cura em água (dias)	Nº de dias de envelhecimento natural	Nº de ciclos de molhagem/secagem
CP	1,0CP:1,5:0,45:0,5S	28	-	-
20 TM	0,8CP:0,2TM:1,5:0,45:0,5S	28	135	94
20 MC	0,8CP:0,2MC:1,5:0,45:0,5S	28	135	94
30 TM	0,7CP:0,3TM:1,5:0,45:0,5S	28	90 e 180	62 e 125
30 MC	0,7CP:0,3MC:1,5:0,45:0,5S	28	90 e 180	-
40 TM	0,6CP:0,4TM:1,5:0,45:0,5S	28	90, 135 e 180	94 e 125
40 MC	0,6CP:0,4MC:1,5:0,45:0,5S	28	90 e 180	94
50 TM	0,5CP:0,5TM:1,5:0,45:0,5S	28	135	-
50 MC	0,5CP:0,5MC:1,5:0,45:0,5S	28	135	-

3.2.4 Parâmetros usados para se avaliar a durabilidade dos compósitos

Para se avaliar a durabilidade do compósito, utilizou-se os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos. Como descrito anteriormente, os ensaios foram realizados a uma baixa velocidade de deslocamento do travessão e conduzidos até uma deflexão no meio do vão de cerca de 4 mm. A partir das curvas carga x deflexão obtidas calculou-se dois parâmetros para a avaliação da eficiência do reforço e, conseqüentemente, da sua durabilidade ou fragilização com o tempo:

- (i) módulo de ruptura na flexão do material (σ_b).
- (ii) índices de tenacidade (FT e T_{JCI}) da norma japonesa JCI-JCSCE SF-4 (JCI SF4 1983).

O módulo de ruptura (σ_b) é dado pela equação:

$$\sigma_b = \frac{6M}{be^2} \quad (3.1)$$

onde: M – momento fletor máximo

b – largura do corpo-de-prova

e – espessura do corpo-de-prova

O índice da norma Japonesa, T_{JCI} , é definido em termos absolutos como a energia necessária para se fletir uma viga de concreto reforçada com fibra até uma deflexão no meio de vão de $L/150$ do seu vão. Em acréscimo ao valor da tenacidade absoluta, um fator de tenacidade na flexão (FT) é definido como:

$$FT = (T_{JCI} \times L) / (\delta_{150} \times b \times e^2) \quad (3.2)$$

onde

L – comprimento do vão (distância entre os apoios)

b – largura da espécime

e – espessura do corpo-de-prova

δ_{150} – deflexão no meio do vão de $L/150$, no nosso caso $\delta_{150} = 1,83$ mm.

O índice da norma Japonesa, T_{JCI} , é definido em termos absolutos como a energia necessária para se fletir uma viga de concreto reforçada com fibra até uma deflexão no meio de vão de $L/150$ do seu vão. Em acréscimo ao valor da tenacidade absoluta, um fator de tenacidade na flexão (FT) é definido como:

$$FT = (T_{JCI} \times L) / (\delta_{150} \times b \times e^2) \quad (3.2)$$

onde

L – comprimento do vão (distância entre os apoios)

b – largura da espécime

e – espessura do corpo-de-prova

δ_{150} – deflexão no meio do vão de $L/150$, no nosso caso $\delta_{150} = 1,83$ mm.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização do material

4.1.1 Cimento portland

A composição química e finura do cimento portland CP II-F-32 utilizado na presente dissertação é apresentada no Quadro 4.1. A percentagem de cimento retido na peneira nº 200 foi de 3,7% atendendo às especificações das normas técnicas brasileiras usadas para fabricação do cimento portland.

QUADRO 4.1 - Composição química e finura do cimento portland utilizado

Composição química do cimento	Percentagem (%)
CaO (Óxido de Cálcio)	56,00
SiO ₂ (Óxido de Silício)	17,32
MgO (óxido de Magnésio)	11,28
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	6,70
PR (Perda ao Rubro)	5,58
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	1,40
K ₂ O (Óxido de Potássio)	0,73
RI (Resíduo insolúvel)	0,41
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	0,06
Finura: % passando nº 200 (0,0074 mm) – via seco	96,3
Densidade real (g/cm ³)	3,10

4.1.2 Tijolo moído queimado

O Quadro 4.2 apresenta as composição químicas e propriedades físicas do tijolo moído queimado.

QUADRO 4.2 – Composição químicas e propriedades físicas do tijolo moído utilizado

Propriedades química do tijolo moído	Porcentagem (%)
SiO ₂ (Óxido de Silício)	65,98
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	23,25
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	6,15
K ₂ O (Óxido de Potássio)	1,85
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	1,35
PR (Perda ao Rubro)	0,85
CaO (Óxido de Cálcio)	Nihil
MgO (óxido de Magnésio)	Traços
Finura: % passando na # 200 (0,0074 mm) – via seco	100
% passando na # 325 (0,0043 mm) – via úmido	71,2
Densidade real (g/cm ³)	2,69

Os óxidos de silício e alumínio, totalizaram cerca de 90% dos constituintes do tijolo moído. A difratometria de raio-x, cujo resultado é apresentada na Figura 4.1, mostra que o material está na forma amorfa e essas características demonstram a grande potencialidade do material para o desenvolvimento de propriedades pozolânicas.

O teor de óxido de ferro, de cerca de 6,15%, fez com que as argamassas produzidas com tijolo moído tivessem cor avermelhada (ver figura 3.3).

A finura conseguida após o processo de moagem indicam que 100% do material era mais fino que 74µm peneiramento por via seca, e 71% mais fino que 43µm no peneiramento por via úmida.

O difratograma de raio-x mostra a presença do quartzo, corundum, geotita, plagioclasio (albita) e “microcline” na composição do tijolo moído. A presença de geotita não era esperada, uma vez que o tijolo moído foi fornecido como tendo sido queimado a 850 °C e a geotita normalmente é destruída a cerca de 500 °C.

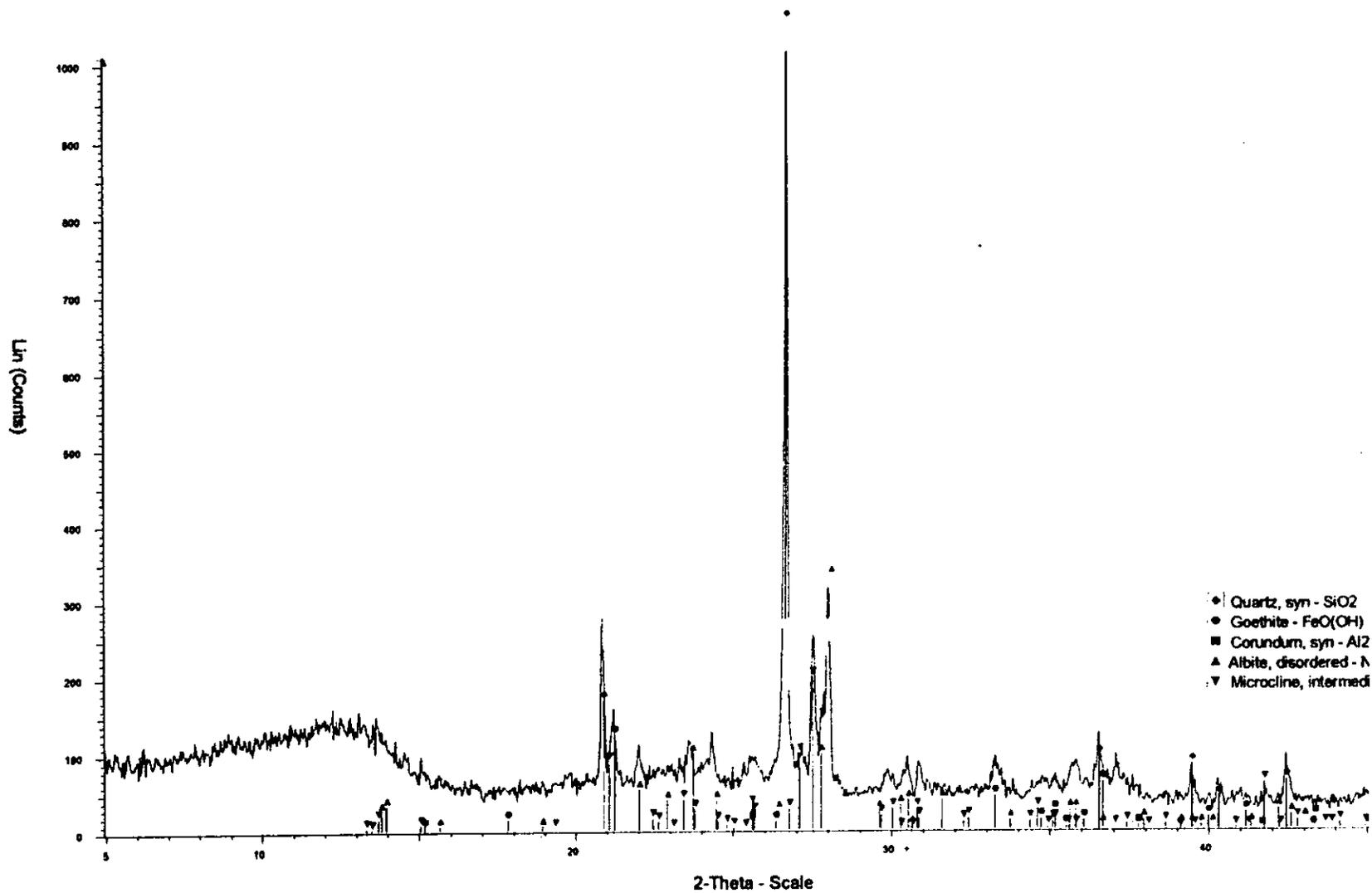


FIGURA 4.1 - Difratoograma de raio-x do tijolo queimado moído

4.1.2.1 Metacaulinita

Os resultados da análise química e as propriedades físicas da metacaulinita são apresentados no Quadro 4.3.

QUADRO 4.3 – Composição química e propriedade física da metacaulinita

Composição química da metacaulinita	Percentagem (%)
SiO ₂ (Óxido de Silício)	60,02
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	29,91
PR (Perda ao Rubro)	8,60
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	1,19
CaO (Óxido de Cálcio)	Traços
MgO (óxido de Magnésio)	Traços
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	Nihil
K ₂ O (Óxido de Potássio)	Traços
Finura: % passando na # 200 (0,0074 mm) – via seco	100
% passando na # 325 (0,0043 mm) – via úmida	69,2
Densidade real (g/cm ³)	2,69

A metacaulinita utilizada é composta basicamente de SiO₂ e Al₂O₃. O teor de óxido de ferro foi de 1,19% o que não afetou a cor das argamassas de cimento portland. Assim como no tijolo moído, não se observou a presença de óxido de cálcio na composição da metacaulinita.

A difratometria de raio-x apresentada na Figura 4.2 mostra a presença do quartzo, da caulinita e da calcita. Embora a presença de caulinita tenha sido observada, a alta contagem dos cristais de quartzo mostra que a mesma foi bem destruída, estando o material na forma amorfa.

A finura conseguida após o processo de moagem indicam que 100% do material era mais fino que 74µm peneiramento por via seca, e 69,2% mais fino que 43µm no peneiramento por via úmida.

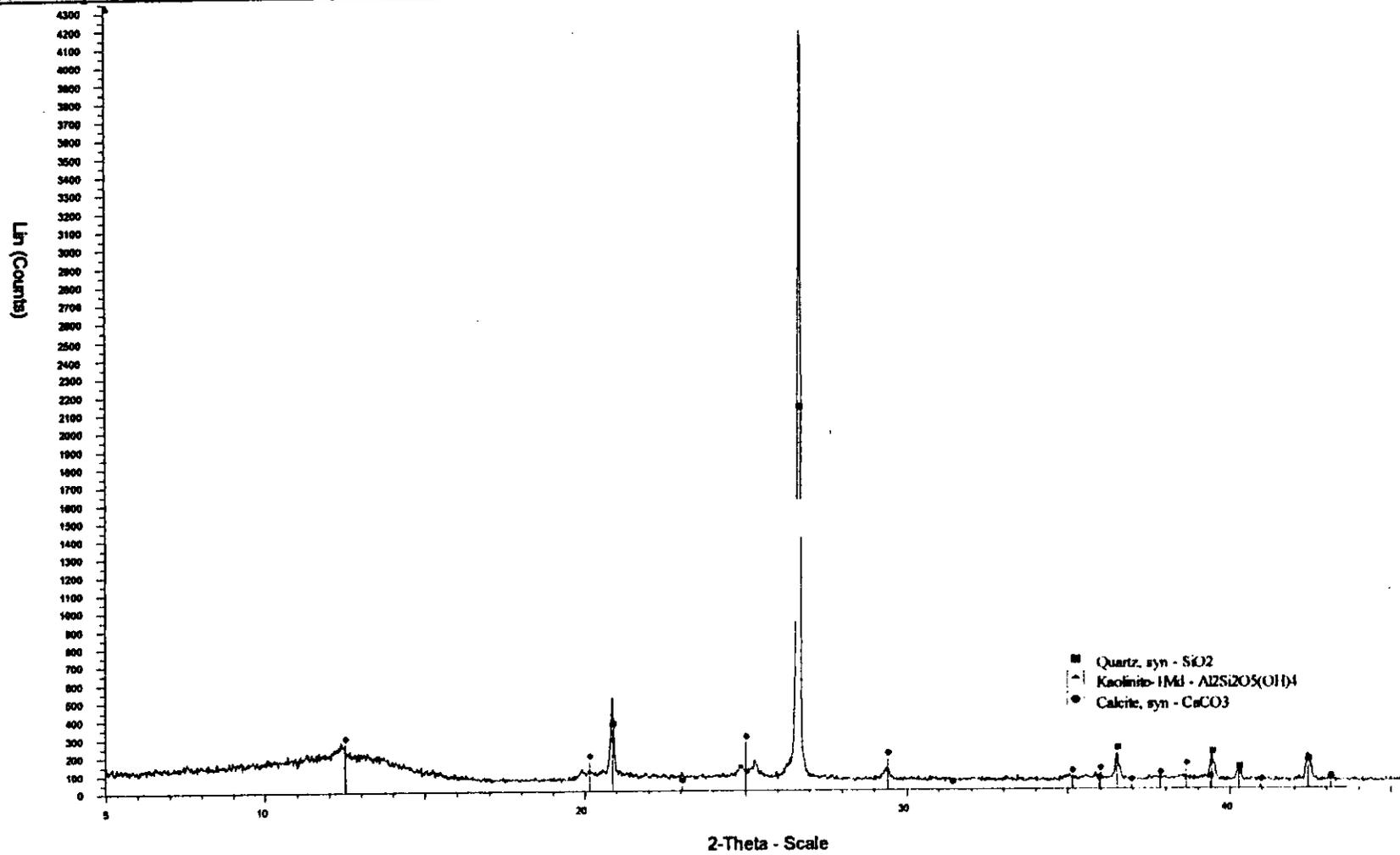


FIGURA 4.2 - Difratograma de raio-x da metacaulinita

4.1.3 Atividade pozolânica da metacaulinita e do tijolo moído com o cimento portland

Para determinar a atividade das pozolânica da metacaulinita e do tijolo moído, foram moldados corpos-de-prova de referência no traço de 1:1,5:0,41 (cimento portland:areia:a/c) e corpos-de-prova com substituição de 35% em peso de cimento portland pelos materiais pozolânicos em estudo. Ensaio de resistência à compressão simples foram realizados após 28 dias de cura em água e os resultados são apresentados na Tabela 4.1. De acordo com a NBR 5752/77 as pozolanas são consideradas ativas se a resistência à compressão aos 28 dias dos cimentos mistos foi superior a 75% da resistência da argamassa de referência. Como os resultados observados para as argamassas mistas foram cerca de 14 a 17% superiores aos do da argamassa de cimento portland, pode-se concluir que a metacaulinita e o tijolo moído utilizados possuem atividade pozolânica com o cimento portland utilizado.

TABELA 4.1 – Resultados da resistência à compressão simples, para determinação do índice de atividade pozolânica do tijolo queimado moído e da metacaulinita

Traço (em peso)	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa) – CV (%)
1:1,5:0,41	25,03 – 1,90
0,65CP + 0,35TM:1,5:0,41	29,21 – 1,95
0,65CP + 0,35MC:1,5:0,41	28,62 – 1,91

4.2 Desenvolvimento de matriz de baixa alcalinidade

4.2.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio das argamassas mistas

Como resultados da hidratação dos silicatos tri-cálcico (C_3S) e bi-cálcico (C_2S), as pastas do cimento portland apresentam teores de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) de cerca de 15-25% em sua composição (TAYLOR, 1997).

A importância do hidróxido de cálcio na reação pozolânica está com o seu papel de ativador dessa reação. Quanto mais reativa for a pozolana maior será o consumo de hidróxido de cálcio presente na pasta.

O ensaio termogravimétrico foi utilizado no presente estudo para determinar o teor de hidróxido de cálcio nas pastas de cimento portland + material pozolânico. Os termogramas das pastas curadas em água por 28 dias e que tiveram substituição parcial de 20, 40 e 50% do cimento portland por tijolo moído e metacaulinita estão apresentados nas Figuras 4.3 a 4.8. Na parte superior das figuras é ampliada a região correspondente à desidratação do hidróxido de cálcio e à decomposição do carbonato de cálcio.

Observando-se os termogramas nota-se que a perda de massa do Ca(OH)_2 diminui a medida que aumentou-se a porcentagem de substituição do cimento portland por material pozolânico. Essa tendência é também observada nos difratograma de raio-x apresentado nas Figuras 4.9 e 4.10. Os teores de hidróxido de cálcio presente nas pastas, calculados a partir dos termogramas, são apresentados nas Tabelas 4.2

TABELA 4.2 Teor de hidróxido de cálcio nas pastas mistas após 28 dias de cura em água

Substituição do CP		Teor de Hidróxido de cálcio livre (% massa)
Material Pozolânico	Teor (% massa)	
Tijolo Moído	20	7.02
Tijolo Moído	40	4.04
Tijolo Moído	50	3.30
Metacaulinita	20	6.19
Metacaulinita	40	2.13
Metacaulinita	50	0.78

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 são apresentados graficamente na Figura 4.11. Os resultados indicam que a utilização da metacaulinita na redução de hidróxido de cálcio é mais eficiente que o tijolo moído para a mesma proporção de adição.

Os resultados mais satisfatórios são observados, em ambos os casos, para índices de substituição a partir 40%. Apesar de alguns estudos recentes (ORIOLE e PERA, 1995) sugerirem que a presença 30% a 40% de metacaulinita são necessários para consumir todo o hidróxido de cálcio do cimento portland, é preciso considerar que, além da quantidade de adição, algumas propriedades da metacaulinita, tais como a composição química e a granulometria, influenciam significativamente na reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio.

As pozolanas são compostas dos mesmos óxidos que o clinker, entretanto

em diferentes proporções e composição mineralógica. Usando-se a mesma nomenclatura adotada para o cimento, os principais óxidos são: C→(CaO), S→(SiO₂), A→(AlO₃) e F→(Fe₂O₃), de acordo com a mesma nomenclatura, SO₃ e H₂O são representados por S e H. O produto final das reações cal-pozzolana é igual aqueles da hidratação do cimento portland. Se a argila é uma caulinita, teoricamente três reações químicas podem acontecer entre o cálcio hidratado e a sílica e a alumina na forma amorfa, como segue:

(metacaulinita) + (cal) + (água)



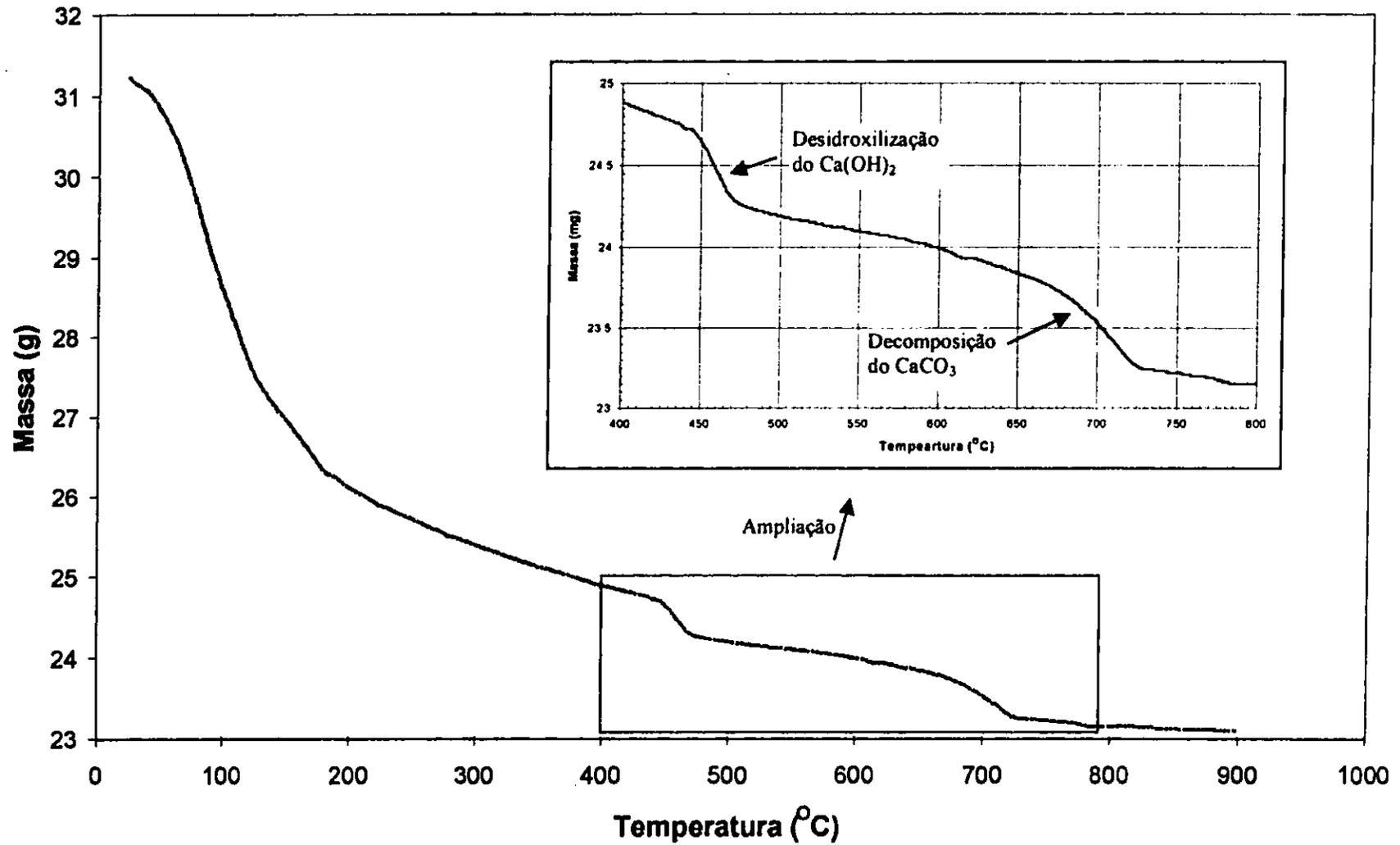


FIGURA 4.3: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 20% de tijolo moído após 28 dias de cura em água

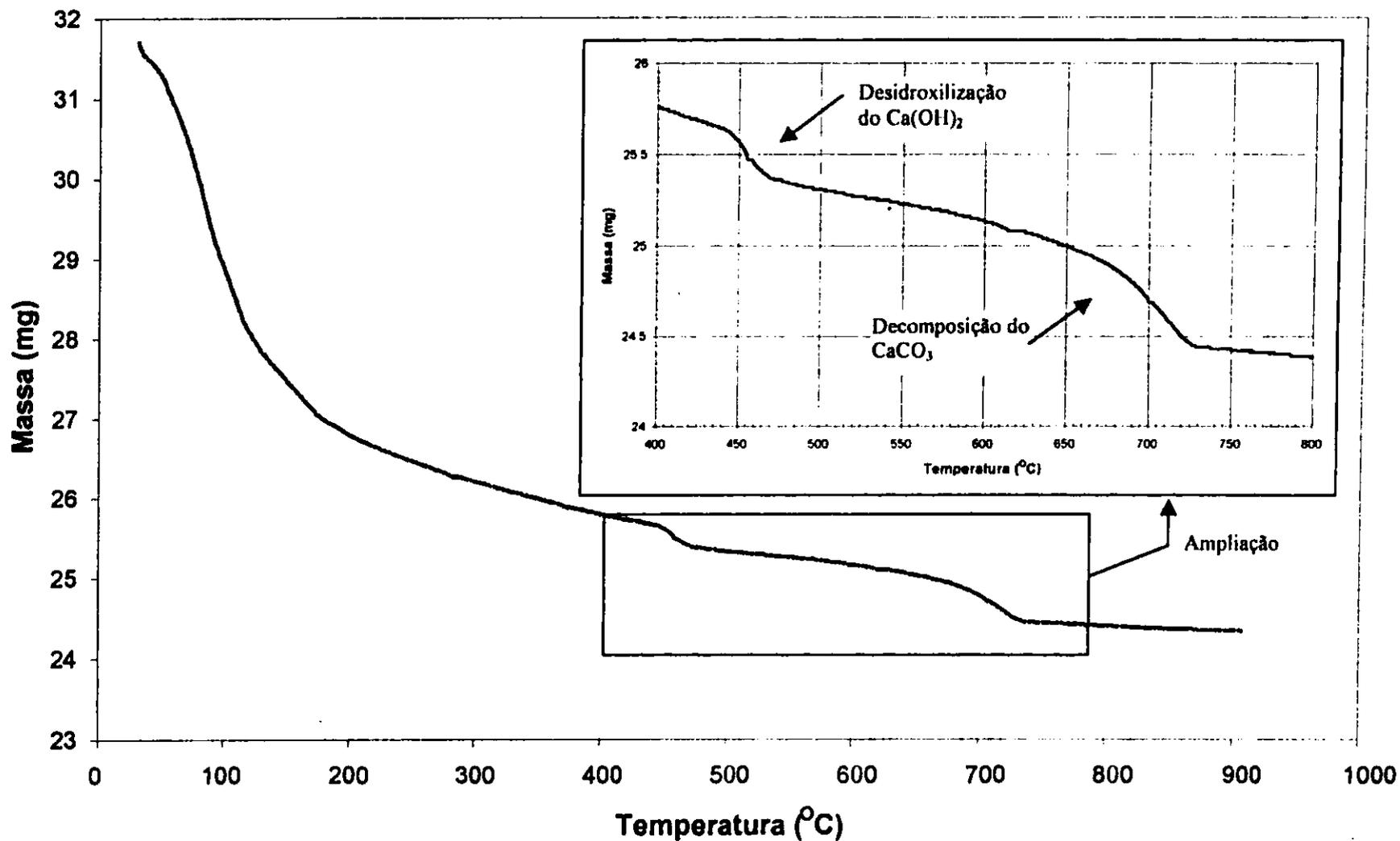


FIGURA 4.4: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 40% de tijolo moído após 28 dias de cura em água

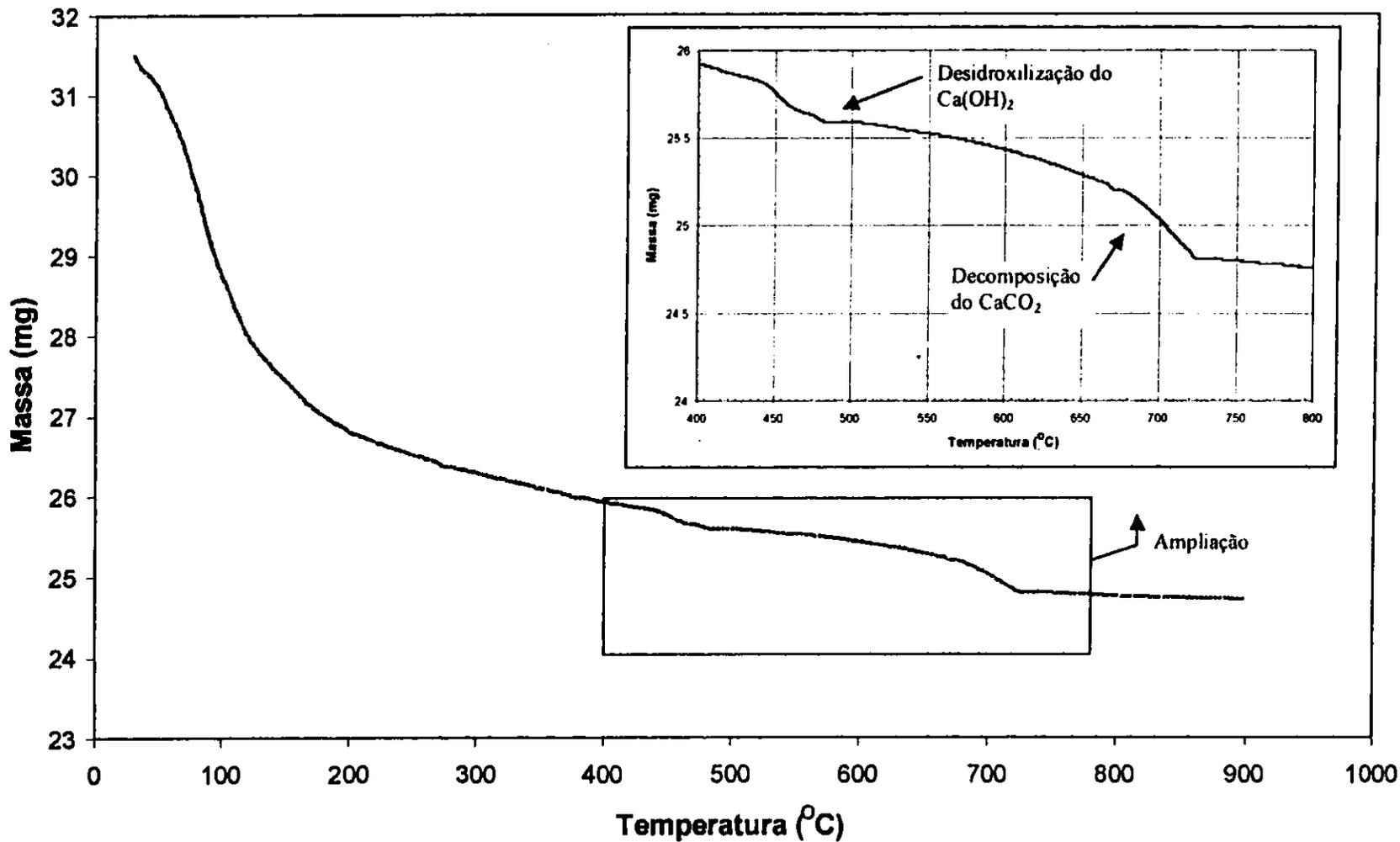


FIGURA 4.3: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 50% de tijolo moído após 28 dias de cura em água

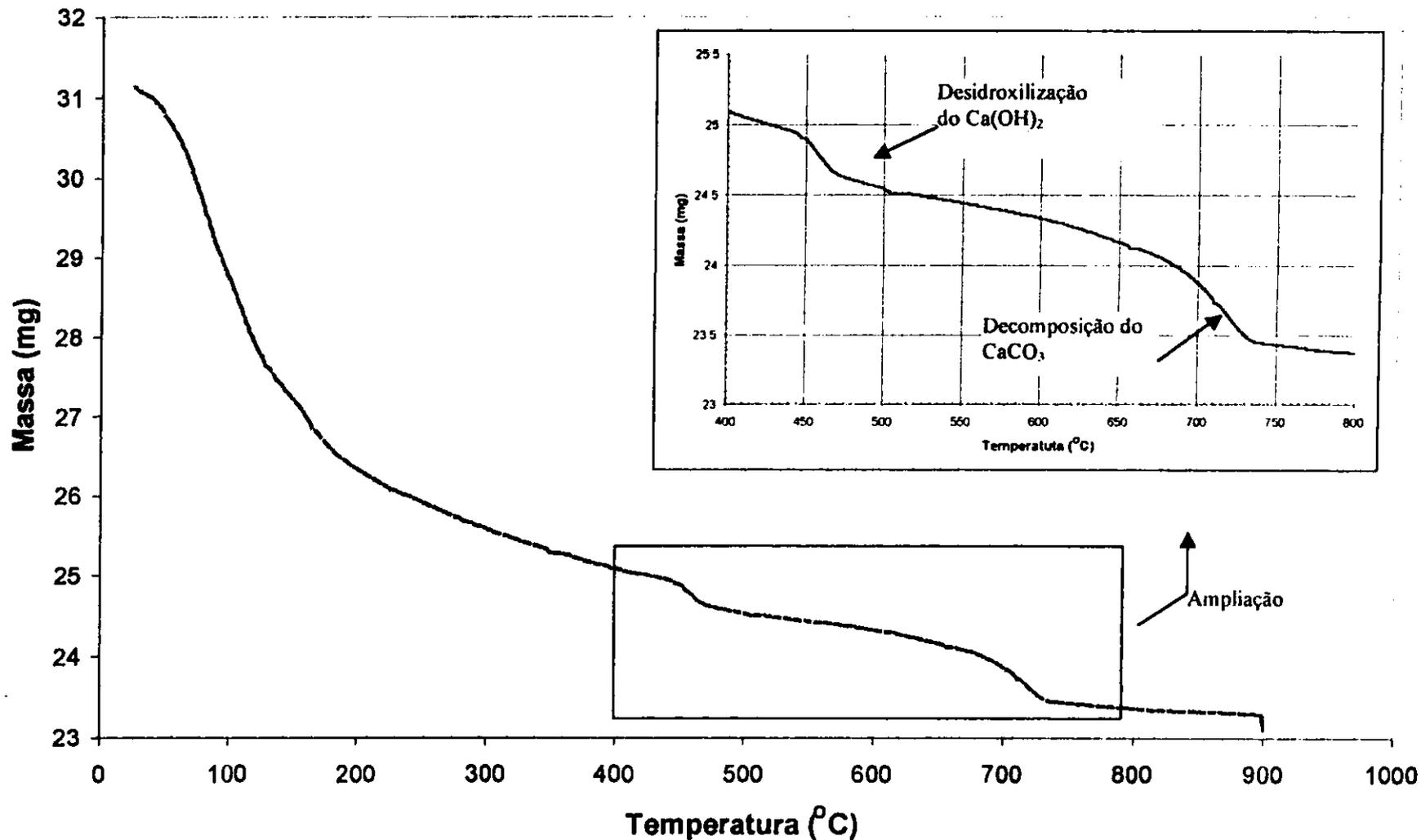


FIGURA 4.6: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 20% de metacaulinita após 28 dias de cura em água

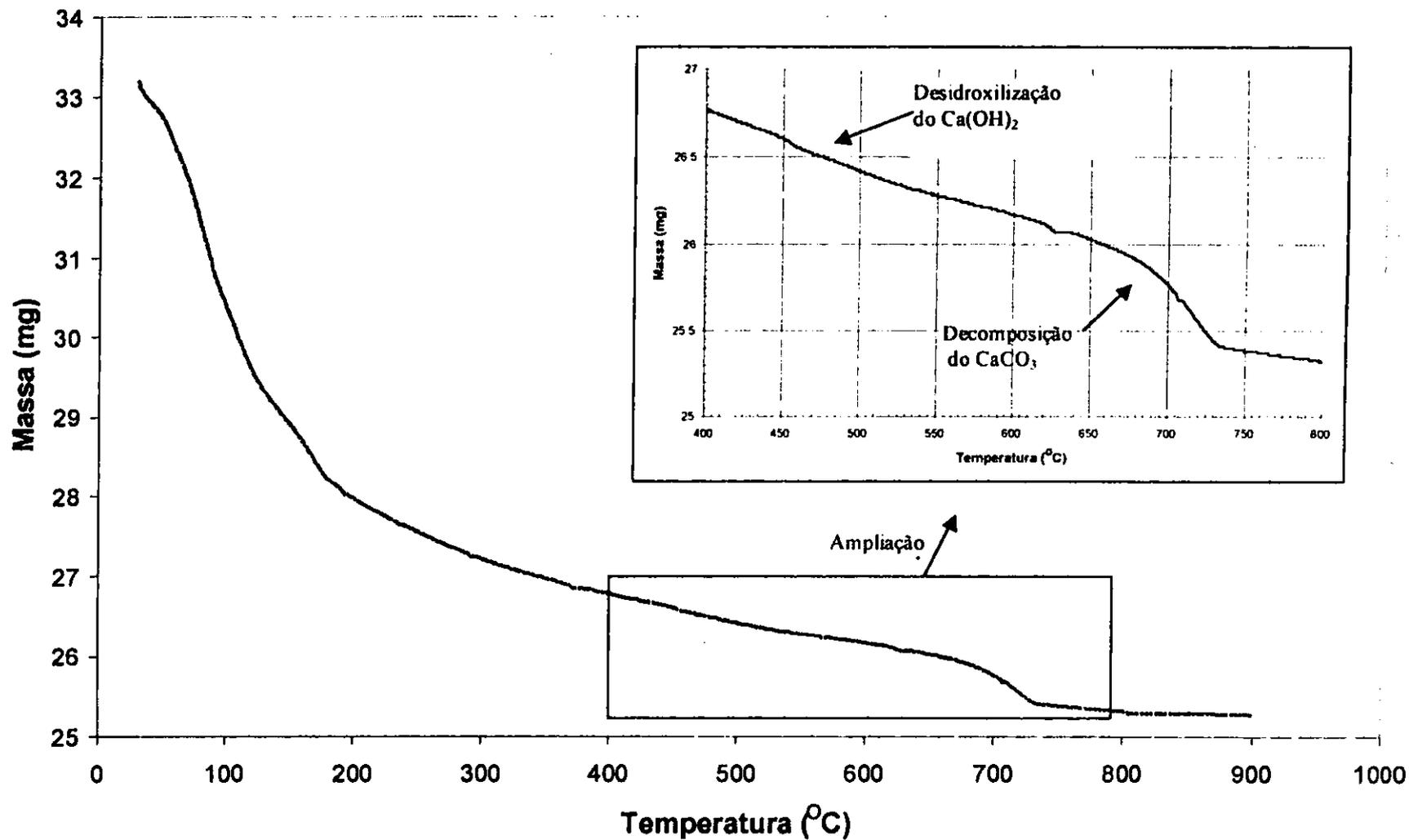


FIGURA 4.7: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 40% de metacaulinita após 28 dias de cura em água

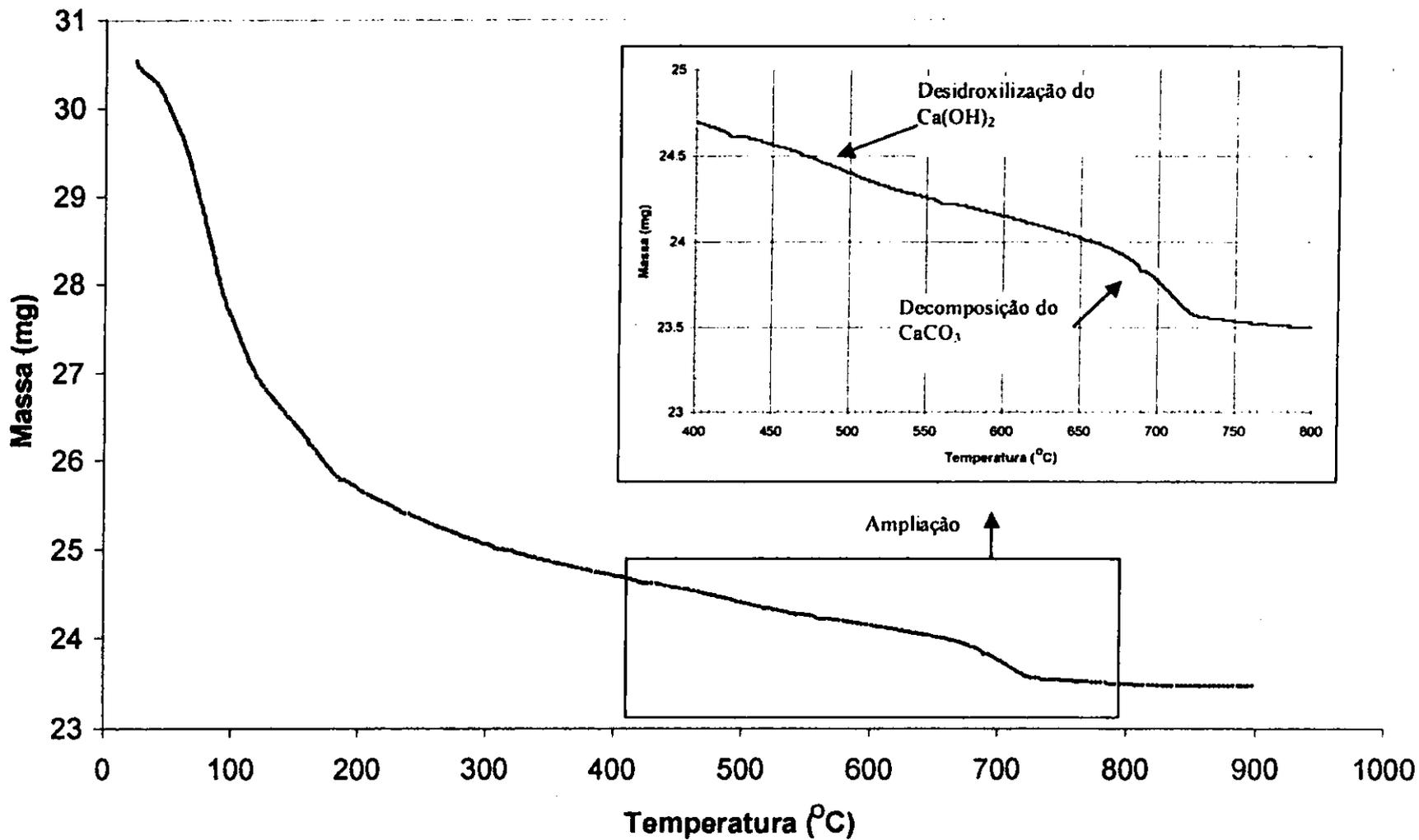


FIGURA 4.8: Curva termogravimétrica da pasta de cimento portland com 50% de metacaulinita após 28 dias de cura em água

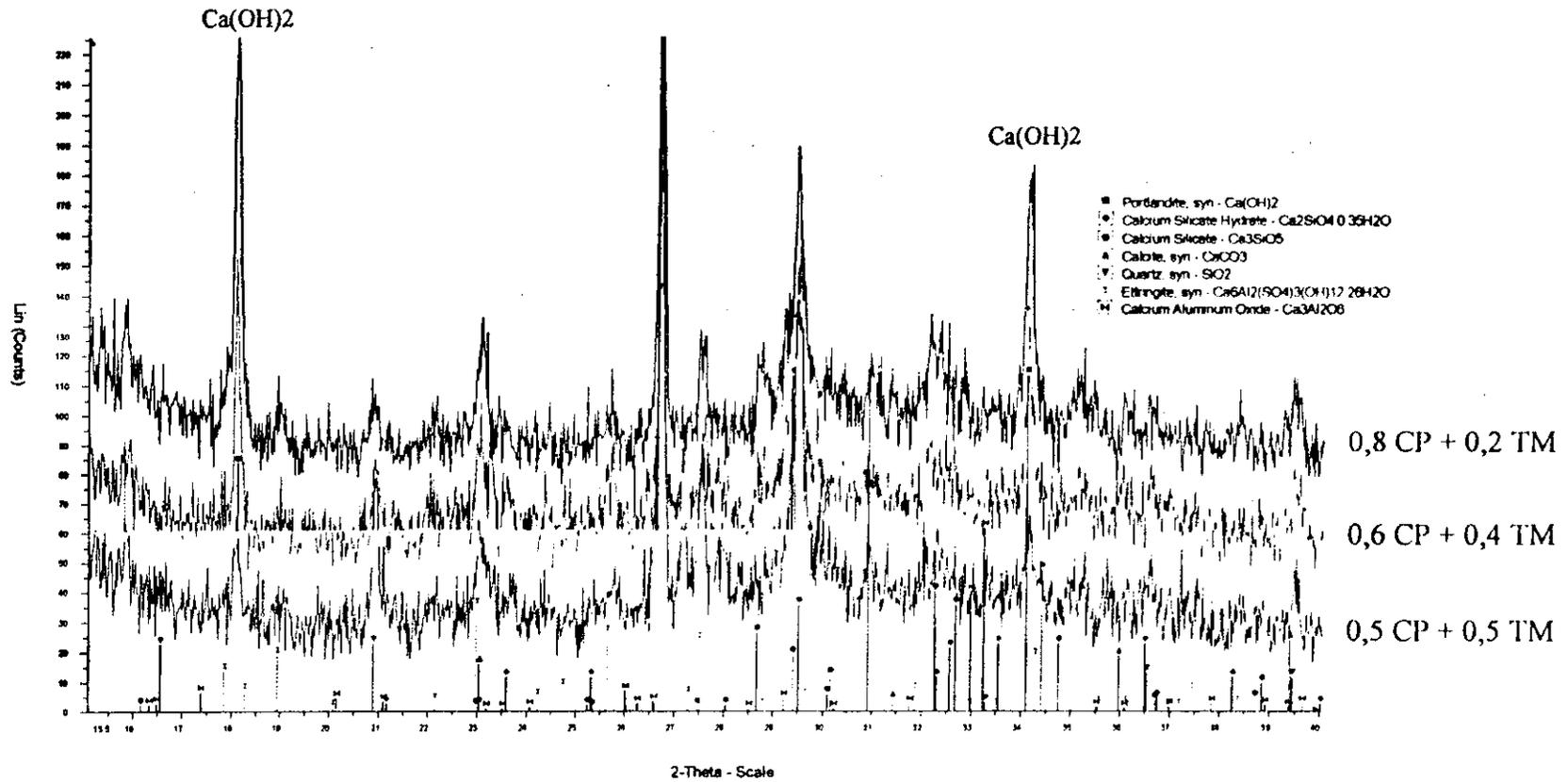


FIGURA 4.9: Difratoograma de raio-x das amostras com 20%, 40% e 50% de tijolo moído – após 28 dias de cura em água

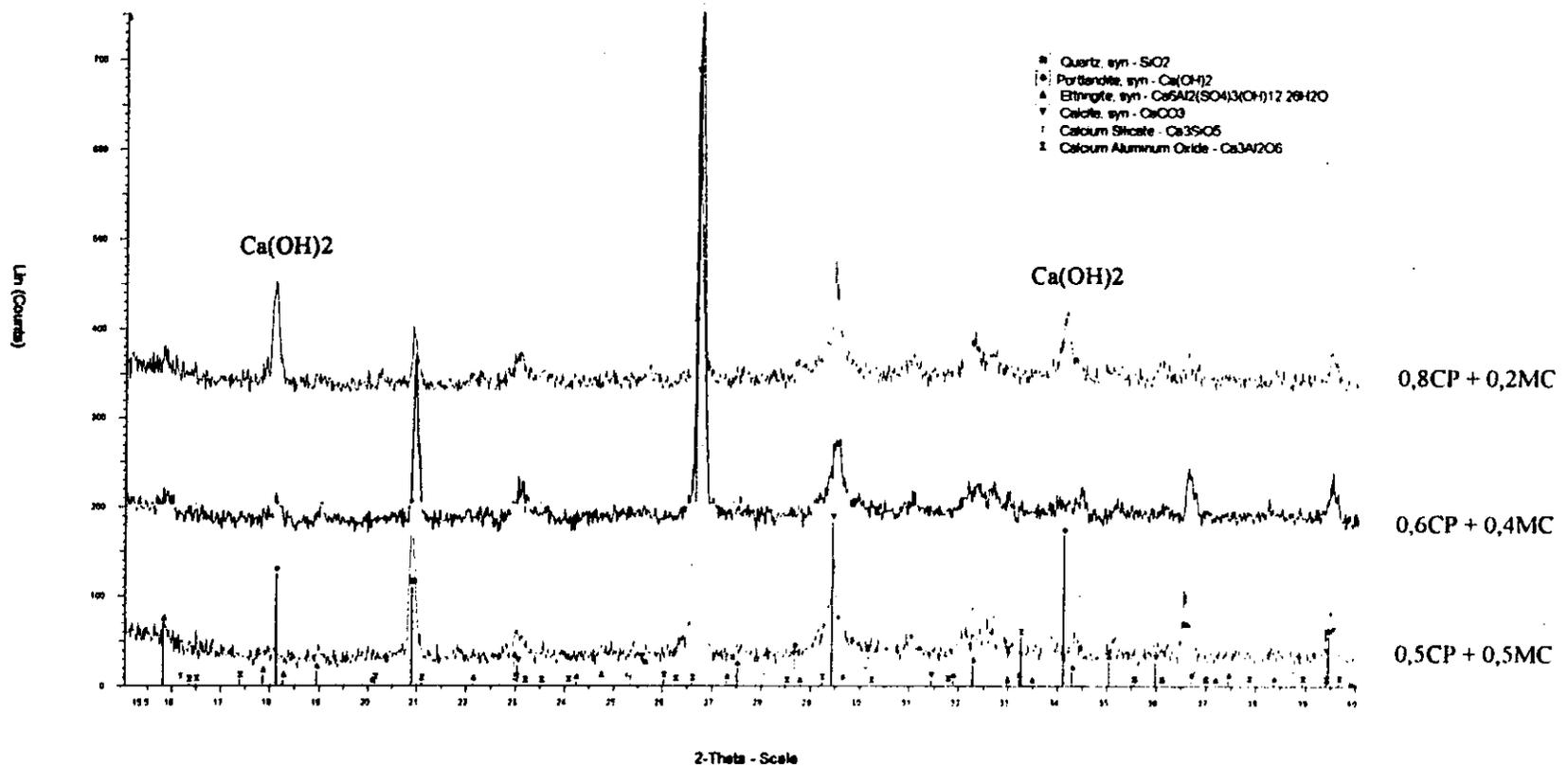


FIGURA 4.10: Difratoograma de raio-x das amostras com 20%, 40% e 50% de metacaulinita – após 28 dias de cura em água

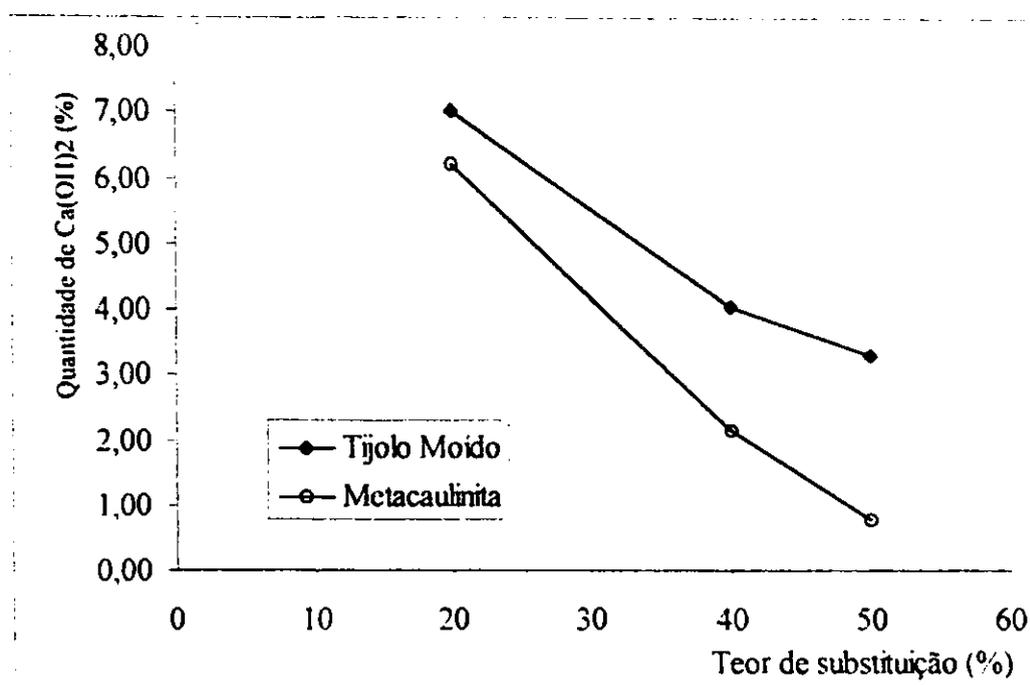


FIGURA 4.11: Influência da metacaulinita e do tijolo moído no teor de hidróxido de cálcio presente

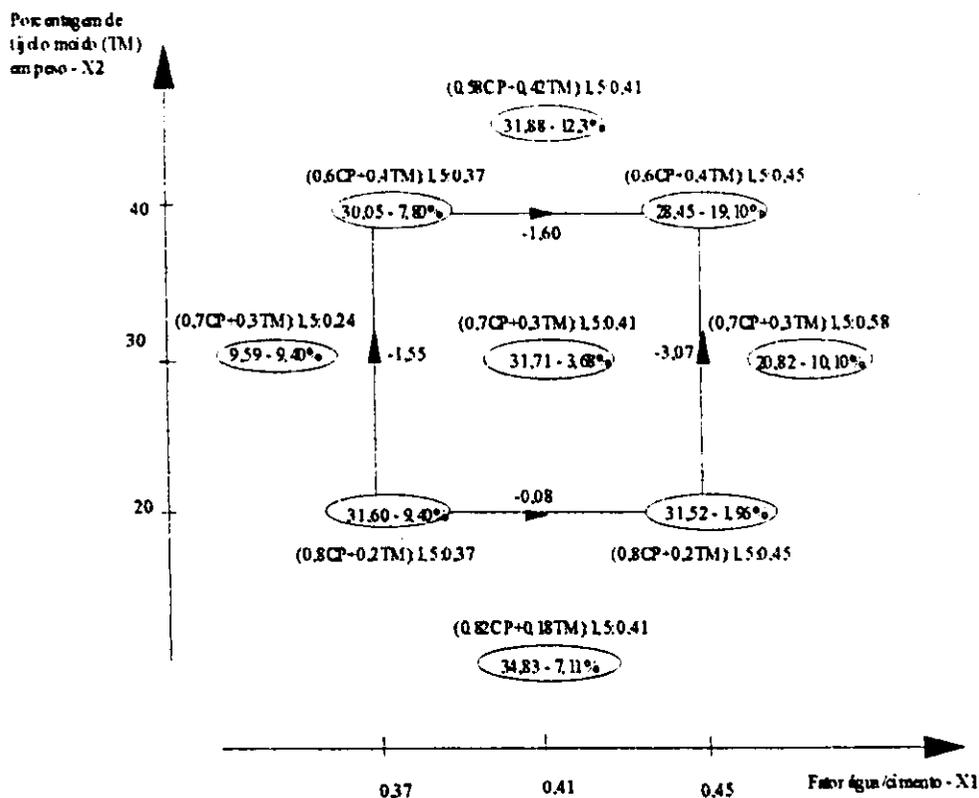
4.3 Resistência mecânica das argamassas de cimento portland-pozolana

4.3.1 Resistência à compressão

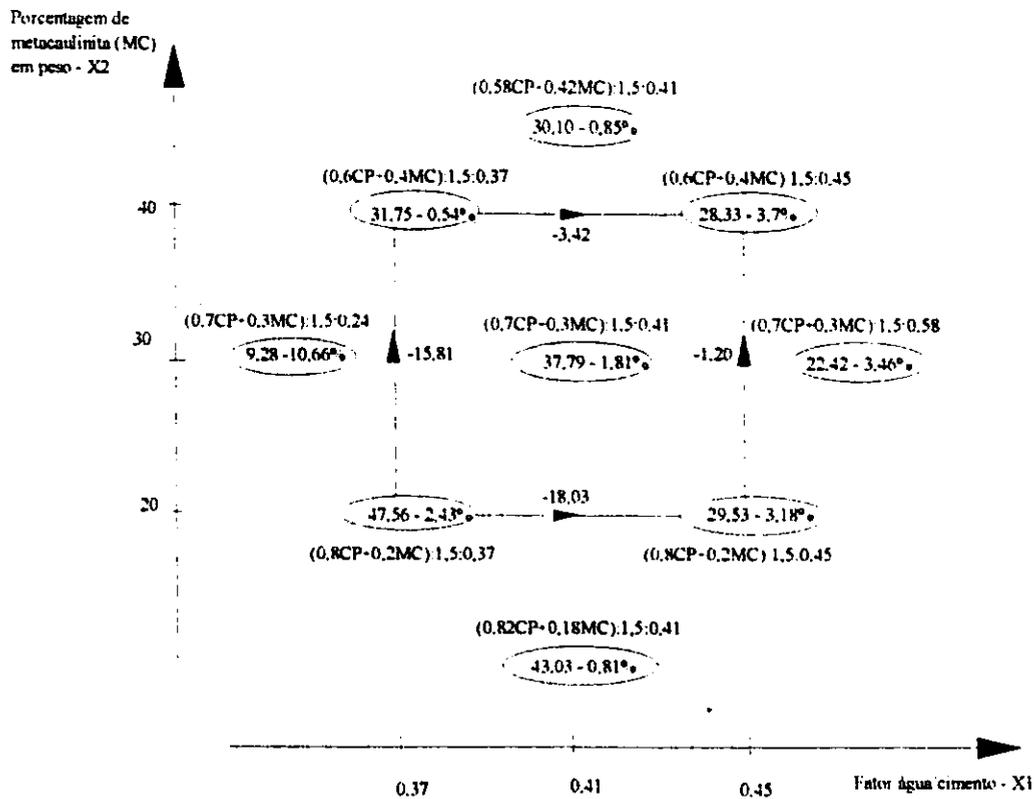
A Figura 4.12 apresenta os valores médios da resistência à compressão (em MPa) e o coeficiente de variação (em %) para as argamassas de material pozolânico-cimento portland ensaiadas aos 28 dias. A resistência à compressão da argamassa de referência foi de 25,03 MPa com um coeficiente de variação de 1,9%.

Os resultados apresentados na Figura 4.12 podem ser combinados de três diferentes maneiras para se verificar a influência dos fatores X_1 (água/cimento) e X_2 (% de substituição de cimento por material pozolânico) na resistência à compressão das

argamassas. Por exemplo, existem duas observações da resistência à compressão no nível mais alto do fator X_1 e duas no seu nível mais baixo. A diferença média entre elas é uma estimativa do *efeito principal* de X_1 . No caso em que se usou tijolo moído, aumentar o fator água cimento de 0,37 para 0,45 resultou em um decréscimo de 0,84 MPa no valor da resistência à compressão. Essa redução, no entanto, é maior para a porcentagem de substituição de cimento de 40%. Da mesma forma, o *efeito principal* do fator X_2 pode ser calculado. Os resultados obtidos mostram que aumentando-se a porcentagem de substituição de 20 para 40% ocorre uma redução de 2,31 MPa na resistência à compressão. Essa redução é maior para o fator água/cimento de 0,45. Uma estimativa da interação entre os fatores $X_1 \times X_2$ é dada pela metade da diferença entre o efeito principal de X_1 , no nível alto de X_2 , e o efeito principal de X_1 , no nível mais baixo de X_2 . No caso do tijolo moído, a interação $X_1 \times X_2$ é de 0,76 MPa. Fazendo-se uma análise similar para o caso da metaçaulinita, observa-se que aumentar o fator X_1 de 0,37 para 0,45 reduz a resistência das argamassas em 10,73 MPa enquanto que elevar o fator X_2 de 20% para 40% reduz a resistência à compressão das argamassas em 8,51 MPa. M maiores influência sobre a influência de pozolânas na resistência à compressão de argamassas de cimento portland podem ser obtidas em ROLIM (1999).



(a) Argamassa de cimento portland-tijolo moído



(b) Argamassa de cimento portland-metacaulinita

FIGURA 4.12: Valores médios dos ensaios de resistência à compressão

Uma análise de variância foi realizada para determinar se os efeitos principais e a interação entre eles eram significativos. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97,5% e 99% usando-se o ensaio F. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4.3 - Análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados SS		Graus de liberdade	Relação média quadrada (MSR) - F_0		MSR mínimo para um fator ser significativo		
	TM	MC		TM	MC	$F_{0,05,1,8}$	$F_{0,025,1,8}$	$F_{0,01,1,8}$
Fatores								
X_1 (w/c)	2,01	338,99	1	0,02	21,13	5,32	7,57	11,26
X_2 (% subst.)	15,73	221,28	1	0,17	13,79	5,32	7,57	11,26
Interação								
$X_1 \times X_2$	1,60	153,80	1	0,017	9,59	5,32	7,57	11,26
Erro experimental	91,95	16,04	8					
Total	111,29	730,11	11					

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.3, pode-se notar que no caso em que a metacaulinita foi adicionada a mistura, tanto os fatores principais quanto a interação mostraram-se significativos a um nível de confiança de 99%, indicando a redução na resistência das argamassas mistas com o aumento do fator água/cimento e da porcentagem de substituição de cimento portland. Quando tijolo moído foi adicionado a mistura nenhum dos fatores mostraram-se significativos.

Observando-se os resultados de resistência à compressão das misturas 5, 8 e 9 e comparando-os com o da argamassa de referência (a diferença nos traços dessas misturas é a porcentagem de substituição do cimento portland) nota-se que a adição das pozolanas estudadas aumentou, para todas as porcentagens de substituição, a resistência à compressão da argamassa. O acréscimo na resistência da argamassa foi de 27 a 39% no caso do tijolo queimado moído, de 21 a 72% no caso da metacaulinita. Em todos os casos o melhor resultado foi observado para o índice de substituição de 18%. Esses resultados indicam que a adição das pozolâneas estudadas acelerou a hidratação do cimento portland utilizado e que a mistura metacaulinita-cimento portland produziu as argamassas de maior resistência à compressão.

Com relação ao fator água/cimento, nota-se que quando o mesmo foi reduzido significativamente, caso da mistura 6, uma expressiva redução na resistência, superior a 230%, foi observada para todas as misturas estudadas. Essa redução deveu-se ao fato de não se ter conseguido trabalhabilidade adequada com um fator água/cimento tão baixo, resultando em corpos de prova com muitos vazios e, conseqüentemente, com baixa resistência. Quando o fator água/cimento foi aumentado de 0,41 para 0,58 (mistura 7) a resistência à compressão apresentou uma redução que variou de 28-52%, dependendo do tipo de material pozolânico utilizado. O uso do fator água/cimento igual a 0,58 conduziu a uma argamassa muito fluida o que, como se sabe, provoca redução na resistência de concretos e argamassas.

4.3.1.1 Variação ao longo do tempo

Para se determinar o desenvolvimento da resistência com o tempo dos materiais utilizados, ensaios de resistência à compressão foram realizados após 28, 90, 120

e 200 dias de cura úmida em corpos de prova da mistura 5 e da argamassa de referência. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Desenvolvimento da resistência à compressão simples (RCS - MPa)

Mistura	28d - CV(%)	90d - CV(%)	120d - CV (%)	200d - CV (%)
1:1,5:0,41 - referência	25,05 - 1,85	30,60 - 3,22	33,54 - 1,49	38,88 - 2,48
(0,7CP+0,3TM)1,5:0,41	31,71 - 3,68	33,35 - 0,46	35,32 - 1,73	40,17 - 1,58
(0,7CP+0,3MC)1,5:0,41	37,79 - 1,80	36,67 - 2,60	39,19 - 0,90	42,57 - 0,60

A Figura 4.13 apresenta a evolução da resistência à compressão como o tempo, da argamassa de referência e as mistas.

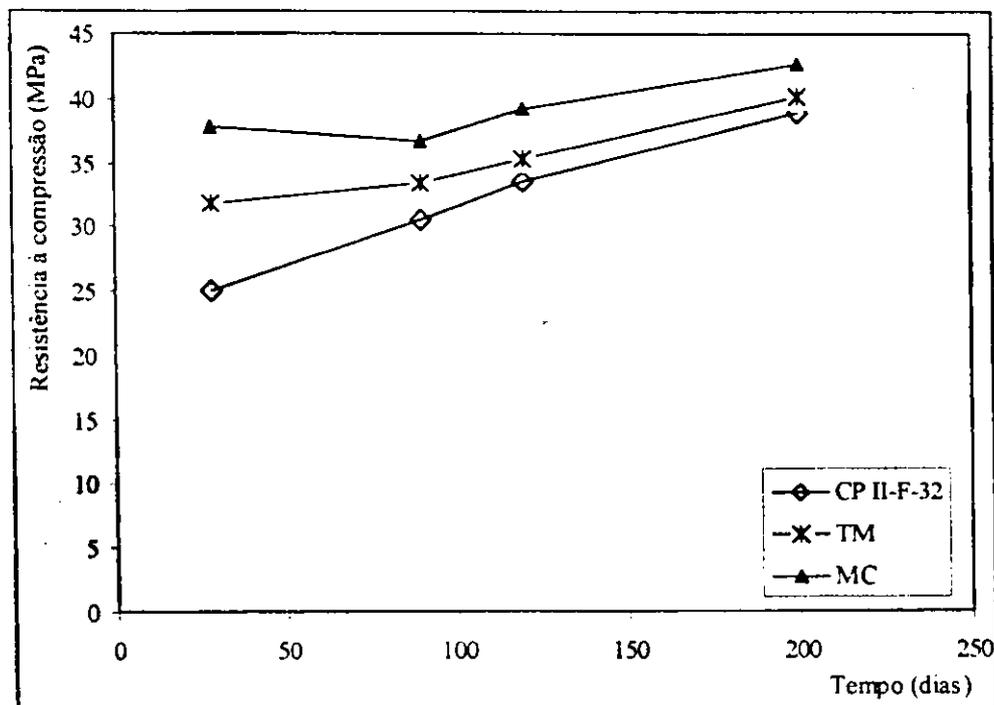


FIGURA 4.13: Desenvolvimento da resistência à compressão simples

Os resultados indicam a elevação da resistência à compressão de todas as misturas com o tempo. A argamassa de referência foi a que apresentou maior elevação de resistência, atingindo 55% após 200 dias de cura úmida. No mesmo período, as argamassas contendo 30% de tijolo moído e metacaulinita experimentaram acréscimos de, respectivamente, 26,6% e 12,6%. Apesar da argamassa de cimento portland apresentar um maior ganho de resistência com o tempo, as argamassas contendo metacaulinita e tijolo moído queimado apresentaram, em todas as idades, valores de resistência à compressão superiores aos observados para a argamassa de referência.

4.3.1.2 Modelo matemático

Com o objetivo de se obter um modelo para a previsão da resistência à compressão de argamassas de material pozolânico-cimento portland, equações de regressão linear múltipla foram estabelecidas para cada conjunto de dados experimentais obtidos. O modelo pode ser escrito em termos das observações como:

$$RCS = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + E \quad (1)$$

onde:

RCS - resistência à compressão simples (em MPa)

$\{\beta_i\}$ - coeficientes de regressão obtidos para cada desenho fatorial

$\{X_i\}$ - fatores

$\{E\}$ - erros aleatórios

O método dos mínimos quadrados foi usado para estimar os coeficientes da regressão dada pela equação 1. Os coeficientes $\{\beta_i\}$ ajustados a cada conjunto de dados experimentais são apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - Coeficientes de regressão obtidos para cada desenho fatorial

Material pozolânico	β_0	β_1	β_2
Tijolo moído queimado	+ 31,90	- 9,98	+ 0,045
Metacaulinita	+ 119,14	- 167,43	- 0,54

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e aqueles previstos a partir dos modelos. É pouco provável que a equação 1, que descreve um plano no espaço das variáveis independentes $\{X_i\}$, seja uma aproximação razoável da superfície de resposta sobre todo o espaço das variáveis independentes mas para a região relativamente pequena de interesse prático estudada, os erros observados são aceitáveis.

TABELA 4.6 - Resultados experimentais de tijolo moído e previstos pelo modelo

Traço	Resultados experimentais (MPa)		Valores previstos pelo modelo (MPa)		Erro (%)	
	TM	MC	TM	MC	TM	MC
(0,6CP+0,4TM) 1,5 0,37	30,05	31,75	30,01	35,59	-0,14	-12,09
(0,6CP+0,4TM) 1,5 0,45	28,45	28,33	29,21	22,19	-2,66	-21,67
(0,8CP+0,2TM) 1,5 0,37	31,60	47,56	29,11	46,39	-7,88	-2,46
(0,8CP+0,2TM) 1,5 0,45	31,52	29,53	28,31	33,00	-10,18	-11,75
(0,7CP+0,3TM) 1,5 0,41	31,71	37,79	29,16	34,29	-8,04	-9,26

4.3.2 Resistência à flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados na argamassas de cimento portland e nas espécimes com vários percentuais de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído (TM) ou metacaulinita (MC), após 28 dias de cura em água e envelhecimento natural são apresentados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 – Módulo de ruptura (σ_b) das argamassas de cimento portland e mistas após 28 dias de cura em água e após exposição ao ambiente natural

Mistura	σ_b (MPa) – CV(%)			
	Idade (dias)			
	28 dias em água	28d + 90d ao ar	28d + 135d ao ar	28d + 180d ao ar
1:1,5:0,45	5,50 – 0,83	7,31 – 5,99	8,04 – 6,63	-
(0,80CP+0,20TM):1,5:0,45	5,97 – 1,55	-	8,25 – 5,18	-
(0,70CP+0,30TM):1,5:0,45	4,67 – 1,09	6,69 – 4,63	-	7,67 – 7,59
(0,65CP+0,65TM):1,5:0,45	5,19 – 2,64	-	6,35 – 2,50	8,14 – 2,09
(0,60CP+0,40TP):1,5:0,45	4,70 – 2,59	5,65 – 6,51	-	7,26 – 6,63
(0,50CP+0,50TP):1,5:0,45	5,01 – 2,85	-	5,33 – 8,35	-
(0,80CP+0,20MC):1,5:0,45	5,51 – 0,08	-	7,27 – 8,19	-
(0,70CP+0,30MC):1,5:0,45	5,57 – 13,2	6,59 – 12,3	-	7,68 – 3,07
(0,65CP+0,35MC):1,5:0,45	4,51 – 19,4	-	-	6,86 – 8,28
(0,60CP+0,40MC):1,5:0,45	4,74 – 7,85	5,31 – 7,16	-	7,86 – 11,0
(0,50CP+0,50MC):1,5:0,45	5,05 – 7,63	-	6,62 – -	-

Conforme pode-se observar não existe uma sistemática clara de aumento ou declínio de módulo de ruptura com a substituição parcial do cimento portland após 28 dias de cura em água.

As alterações (acrécimo ou declínio) no valor de σ_b , variou de 0 a 20% no máximo.

Com o tempo, no entanto, a argamassa com cimento portland apresentou valor do módulo de ruptura mais altos (de 10% a 20%) que os das argamassas mistas.

A Figura 4.14 apresenta a evolução do módulo de ruptura (σ_b) das argamassas de cimento portland e mistas com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído ou metacaulinita. Pode-se observar nessa figura a mesma tendência de ganho de resistência com o tempo já verificada para a resistência à compressão simples.

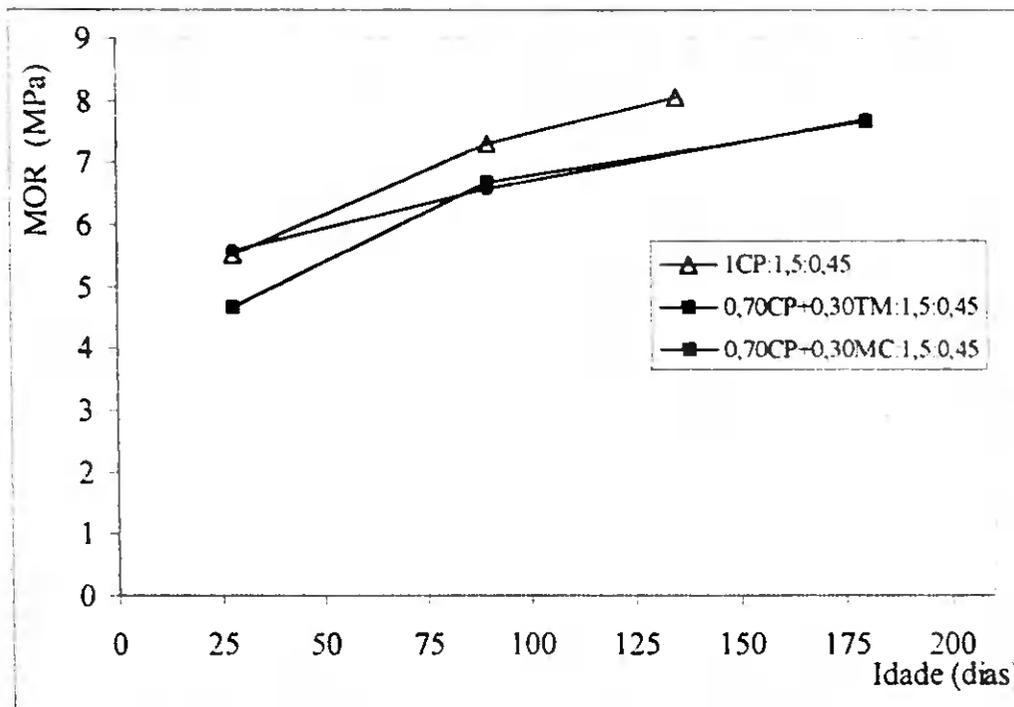


FIGURA 4.14: Evolução do módulo de ruptura das argamassa com o tempo após envelhecimento natural da argamassa de cimento portland e as mistas.

4.4 Durabilidade dos compósitos

4.4.1 Envelhecimento natural

As amostras foram expostas as condições climáticas do Campus II da UFPB, Campina Grande – PB durante o período de agosto/98 a março/99. O Quadro 4.4, apresenta-se alguns parâmetros climatológicos referentes ao período supra, fornecido pela estação meteorológica da Embrapa-Algodão – Campina Grande, PB.

A estação climatológica principal da Embrapa-Algodão, está localizada numa latitude de 07°13' S, longitude 35°53' W e altitude de 547,56m e dista cerca de 1km do Campus II - UFPB onde as prateleiras de exposição das amostras estavam localizadas.

QUADRO 4.4: Dados climatológicos médios verificados no período de agosto/98 a março/99

Evento Mês	Temperatura (°C)			U.R. (%)			Vel. Vento(m/s)			Precipitação (mm)			Evaporação (mm)			Insolação (h)		
	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.
Agosto	20,3	22,9	21,7	72	96	82	2,0	4,9	3,8	0,0	24,2	3,1	0,2	5,0	2,0	0,0	10,6	6,4
Setembro	21,6	24,0	23,0	60	87	72	3,6	6,0	4,5	0,0	1,6	0,2	1,5	6,5	4,0	4,4	11,0	8,7
Outubro	19,9	24,8	23,9	57	83	67	3,8	6,6	4,8	0,0	9,1	0,4	2,6	7,2	5,3	4,3	11,0	9,1
Novembro	23,6	27,5	24,9	62	76	66	3,2	5,5	4,6	0,0	0,2	0,0	3,4	12,7	6,5	6,5	9,9	10,9
Dezembro	22,9	26,4	24,8	63	77	67	2,8	6,4	4,7	0,0	2,6	0,2	2,4	7,1	6,1	0,1	10,9	8,4
Janeiro	23,6	25,7	24,7	63	84	69	2,5	6,0	4,5	0,0	5,1	0,4	2,3	6,9	4,5	0,0	11,1	7,5
Fevereiro	22,7	26,3	24,5	63	88	70	2,9	5,2	4,3	0,0	15,3	1,8	1,5	7,3	5,2	1,3	10,6	7,4
Março	22,0	26,8	24,5	60	89	72	2,6	5,3	3,9	0,0	54,8	3,8	0,9	8,1	4,6	0,0	10,8	8,2

Fonte: EMBRAPA-ALGODÃO

4.4.1.1 Compósitos com tijolo moído

A Figura 4.15 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 20% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 135 dias.

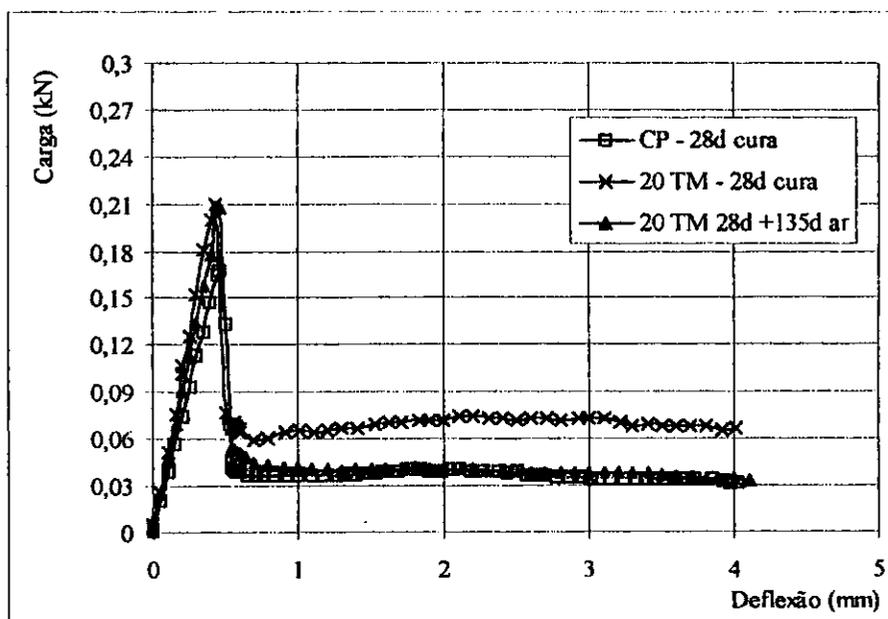


FIGURA 4.15: Curva carga x deflexão dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural

A Figura 4.16 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) e do compósito com 30% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até as idades de 90 e 180 dias.

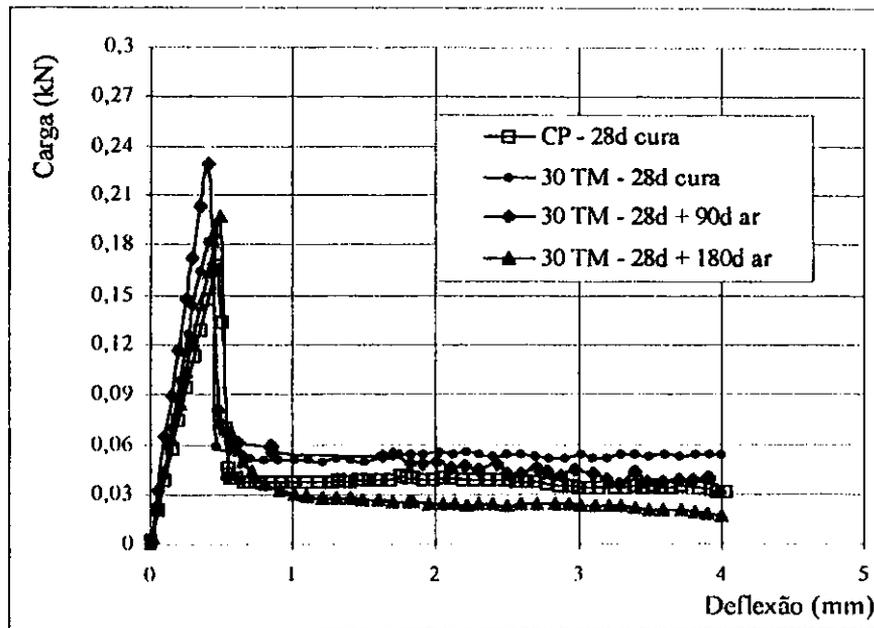


FIGURA 4.16: Curva carga x deflexão dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural

A Figura 4.17 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) e do compósito com 40% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até as idades de 90, 135 e 180 dias

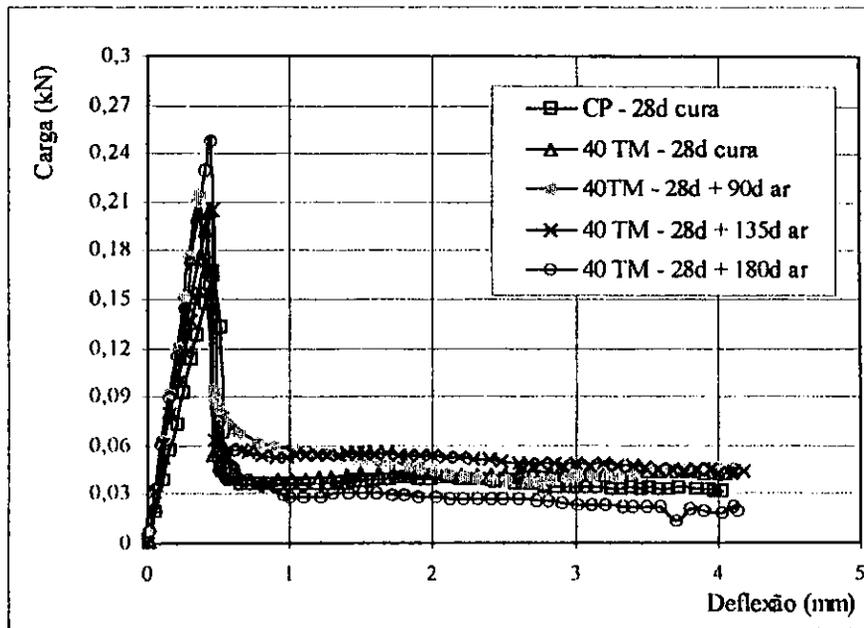


FIGURA 4.17: Curva carga x deflexão dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural

A Figura 4.18 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) e do compósito com 50% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 135 dias

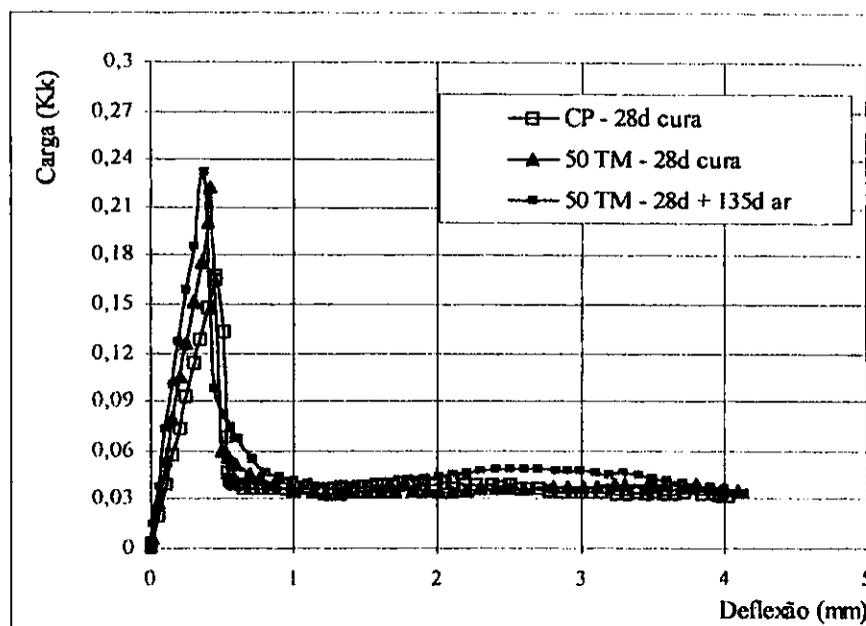


FIGURA 4.18: Curva carga x deflexão dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por tijolo moído – envelhecimento natural

A partir das curvas carga x deflexão obtidas nos ensaios, calculou-se o módulo de ruptura (σ_b) e os índices de tenacidade T_{JCI} e FT. Esses parâmetros foram utilizados para avaliação da durabilidade do compósito e são apresentados na Tabela 4.8. Nessa tabela apresenta-se os valores médios de três ensaios e o coeficiente de variação (CV).

TABELA 4.8 – Índices σ_b , T_{JCI} , FT, para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por tijolo moído, submetidos ao envelhecimento em ambiente natural

Mistura	Idade (dias)	σ_b (MPa) – CV (%)	T_{JCI} KN.mm – CV (%)	FT (MPa) – CV (%)
CP 28d cura	28	4,14	0,09	1,27
20 TM 28d cura	28	4,98 – 3,38	0,15 – 6,39	1,96 – 0,47
20 TM 28d + 135d ar	135	5,33 – 0,33	0,12 – 11,0	1,68 – 11,3
30 TM 28d cura	28	5,34 – 4,50	0,11 – 19,2	1,59 – 16,4
30 TM 28d + 90d ar	90	5,57 – 0,65	0,13 – 4,98	1,70 – 3,25
30 TM 28d + 180d ar	180	5,71 – -	0,09 – -	1,31 – -
40 TM 28d cura	28	5,36 – 6,07	0,10 – 0,37	1,44 – 1,27
40 TM 28d + 90d ar	90	5,14 – -	0,13 – -	1,77 – -
40 TM 28d + 135d ar	135	5,21 – 2,73	0,12 – 2,06	1,68 – 1,85
40 TM 28d + 180d ar	180	5,95 – 5,47	0,11 – 10,1	1,46 – 9,97
50 TM 28d cura	28	5,46 – -	0,10 – -	1,38 – -
50 TM 28d + 135d ar	135	5,91 – 5,20	0,13 – 1,32	1,83 – 1,14

Os resultados obtidos para o compósito com 20% de tijolo moído ensaiados após 28 dias de cura em água indicam um aumento no módulo de ruptura e no índice de tenacidade (T_{JCI}) de, respectivamente, 20 e 67% quando comparados com os resultados observados para o compósito a base de cimento portland. Após 135 dias de envelhecimento natural ocorreu um acréscimo no módulo de ruptura de 7% e uma redução de 20% no índice T_{JCI} , em relação aos índices observados aos 28 dias. Entretanto, mesmo com essa redução, a tenacidade do compósito envelhecido por 135 dias ainda é cerca de 33% superior à do compósito que contém apenas cimento portland.

Com relação as misturas com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído, ensaiado após 28 dias de cura, observou-se um aumento nos parâmetros σ_b , T_{JCI} e FT, de respectivamente 29%, 22% e 25% em relação ao do compósito a base de cimento portland. Essa tendência pode também ser observada após 90 dias de envelhecimento ao ar. Após 180 dias ao ar, observa-se um aumento de 7% no valor de σ_b e uma redução de 18% no índice T_{JCI} , mesmo assim manteve a tenacidade, comparando-se à dos compósitos de cimento portland ensaiada após 28 dias de cura.

Os resultados obtidos para o compósito com 40% de tijolo moído após 28 dias de cura em água indicam um aumento no módulo de ruptura e no índice de tenacidade T_{JCI} de, respectivamente, 30% e 11% quando comparado com o compósito a base de cimento portland. Após 90 dias de exposição ao ar houve uma redução de 4% no módulo de ruptura e um aumento de 30% na tenacidade comparada com as amostras ensaiadas aos 28 dias de cura. Após 135 dias de envelhecimento natural, ocorreu uma redução de cerca de 3% no módulo de ruptura e um aumento de 20% na tenacidade comparada com a observada aos 28 dias de cura. Após 180 dias ao ar verificou-se uma aumento de 11% tanto no parâmetro σ_b como no índice T_{JCI} , em relação aos mesmos índices observados aos 28 dias. Tal aumento implicou a valores de σ_b e T_{JCI} , de 44% e 22% respectivamente, maiores que os observados para compósitos apenas de cimento portland ensaiada ao 28 dias de cura.

Os resultados obtidos para o compósito com 50% de tijolo moído ensaiados após 28 dias de cura em água indicam um aumento no módulo de ruptura e no índice de tenacidade T_{JCI} de, respectivamente, 32% e 11% quando comparado com o compósito a base de cimento portland. Após 135 dias de envelhecimento natural ocorreu um acréscimo

no módulo de ruptura de 8% e de 30% no índice T_{JCI} , em relação aos mesmos índices observados aos 28 dias e ainda foi superior 43% e 44% respectivamente na resistência e na tenacidade, comparando-se com os compósitos que contém apenas cimento portland ensaiado aos 28 dias de cura.

Dos resultados apresentados fica evidenciado que houve uma evolução nas propriedades dos compósitos a medida que aumentou-se o teor de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído. Esse fato está de acordo com a redução na presença do hidróxido de cálcio, um dos principais agentes causador da fragilização do reforço quando usa-se fibra natural. Essa redução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que já havia se revelado após 28 dias de cura em água através dos ensaios de termogravimetria e difratometria apresentados no item 4.2.1 pode ser observado também que realizados a partir do ensaio de difratometria de raio-x realizado após 90 dias de envelhecimento natural, que revela pequenas contagens nos picos característicos da presença do hidróxido de cálcio (ver Figura 4.19).

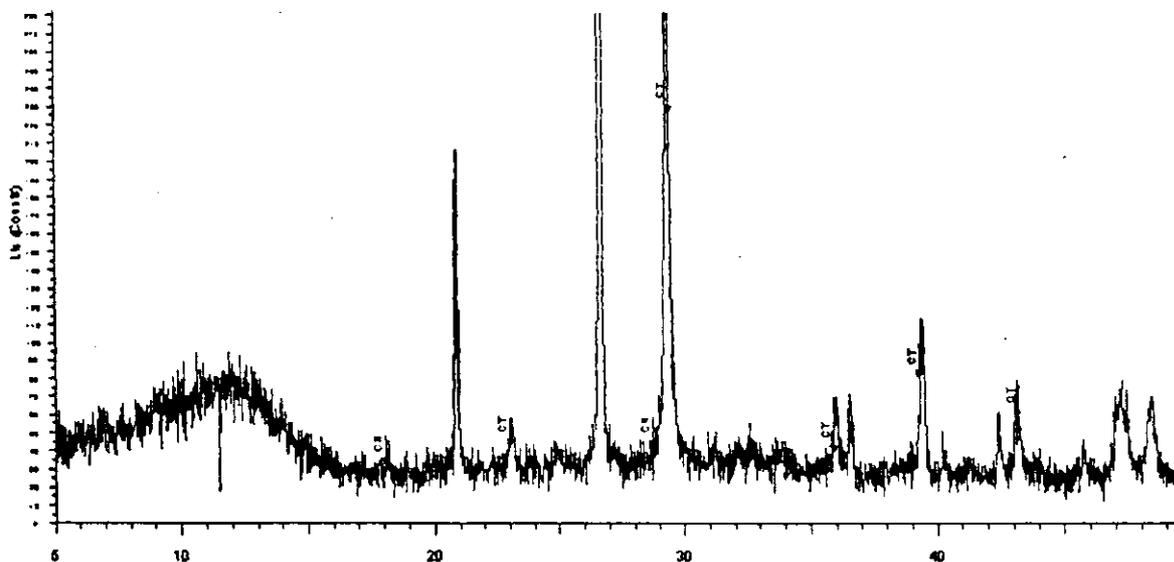


FIGURA 4.19: difratograma de raio-x da pasta com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído, curado em água até 28 dias e após esse período 90 dias exposto ao ar

A Figura 4.20 mostra a evolução com o tempo da tenacidade do compósito, medidos a partir do índice de tenacidade FT. Os resultados confirmam a análise feita anteriormente de que os compósitos envelhecidos ao ar não sofrem perda significativa de tenacidade até 180 dias.

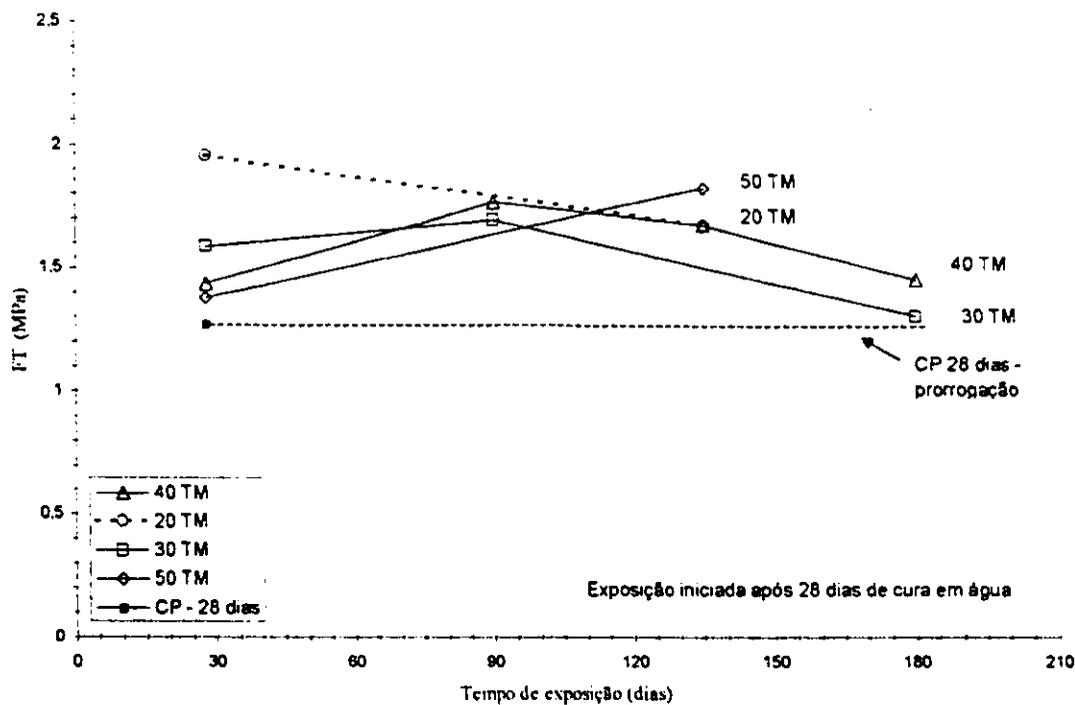


FIGURA 4.20: Evolução da tenacidade (FT) com o envelhecimento natural para os compósitos, com tijolo queimado moído

4.4.1.2 Compósitos com metacaulinita

A Figura 4.21 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 135 dias.

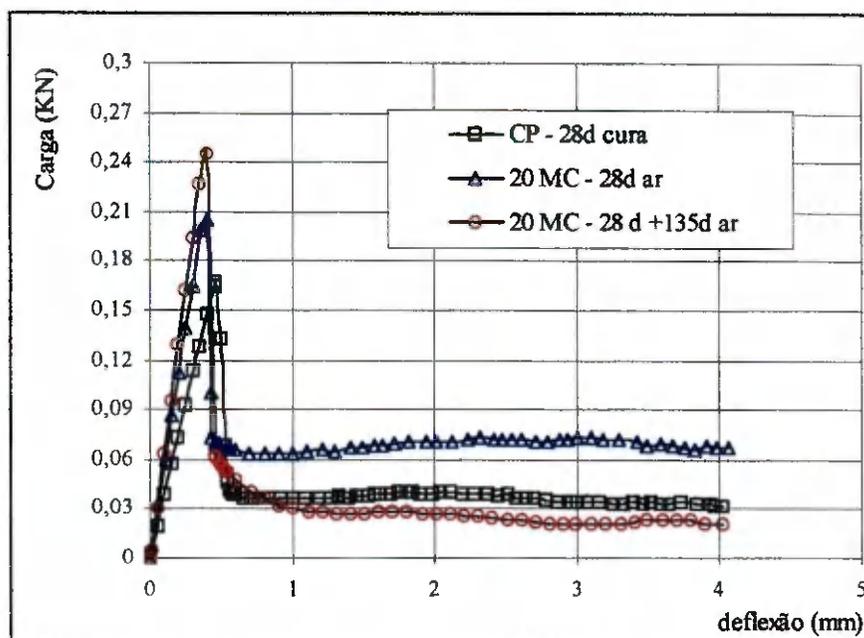


FIGURA 4.21: Curva carga x deflexão dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural

A Figura 4.22 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 30% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 90 e 180 dias ao ar.

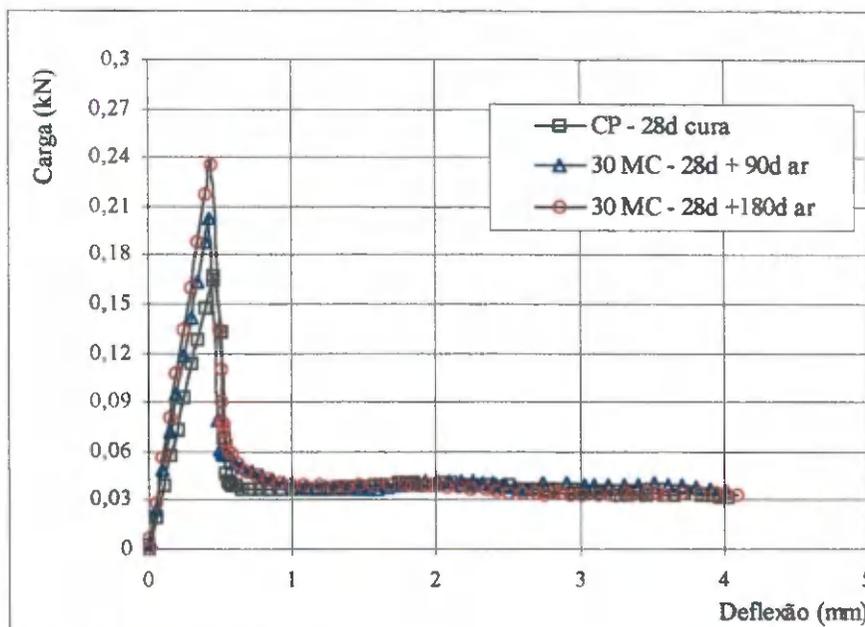


FIGURA 4.22: Curva carga x deflexão dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural

A Figura 4.23 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 90 e 180 dias.

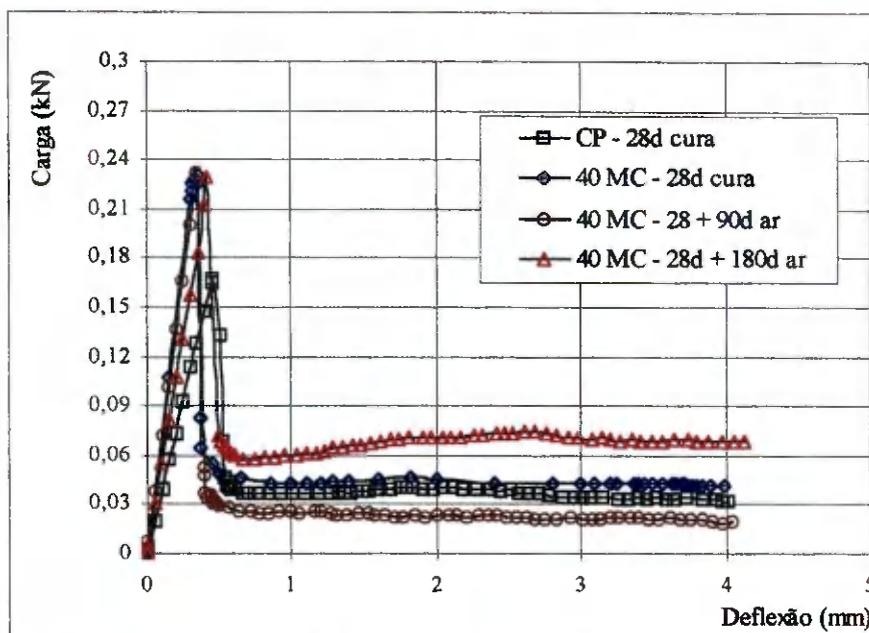


FIGURA 4.23: Curva carga x deflexão dos compostos com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural

A Figura 4.24 mostra o comportamento na flexão do composto com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do composto com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) curado em água por 28 dias e submetido ao envelhecimento natural até a idade de 135 dias.

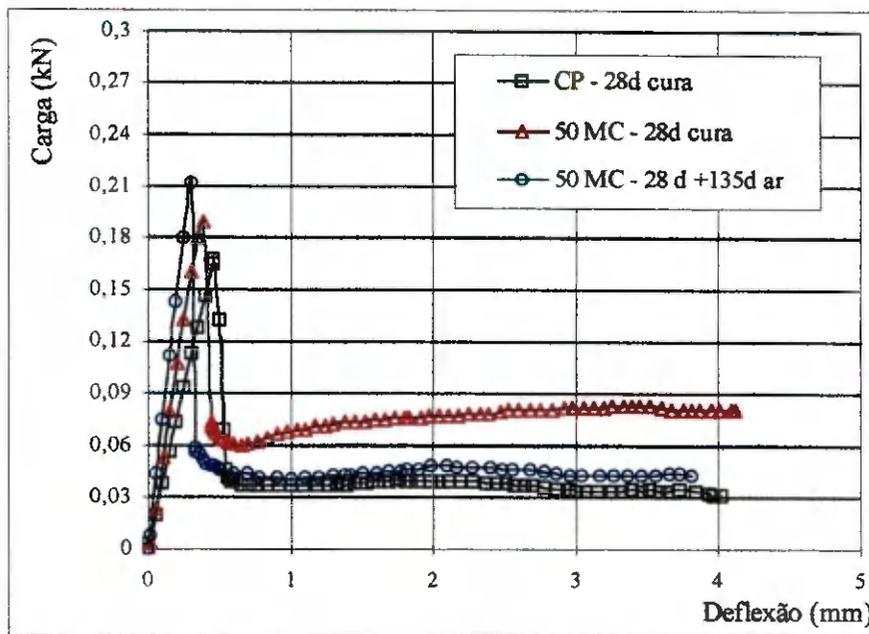


FIGURA 4.24: Curva carga x deflexão dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita – envelhecimento natural

A partir das curvas carga x deflexão obtidas nos ensaios, calculou-se o módulo de ruptura (σ_b) e os índices de tenacidade T_{JCI} e FT. Esses parâmetros são utilizados para avaliação da durabilidade do compósito e são apresentados na Tabela 4.9. Nessa Tabela apresenta-se os valores médios de três ensaios e o coeficiente de variação (CV).

TABELA 4.9 - Índices σ_b , T_{JCI} , FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por metacaulinita, submetidos ao envelhecimento natural

Mistura	Idade (dias)	σ_b (MPa) – CV (%)	T_{JCI} KN.mm – CV (%)	FT (MPa) – CV (%)
CP 28d cura	28	4,14	0,09	1,27
20 MC 28d cura	28	5,32 – 5,99	0,15 – 7,00	2,11 – 0,74
20 MC 28d + 135d ar	135	5,70 – 5,13	0,11 – 17,6	1,50 – 23,4
30 MC 28d cura	28	5,13 – 9,21	0,08 – 16,9	1,10 – 23,3
30 MC 28d + 90d ar	90	5,46 – 0,93	0,11 – 8,77	1,57 – 8,82
30 MC 28d + 180d ar	180	5,94 – -	0,12 – -	1,70 – -
40 MC 28d cura	28	5,52 – 4,42	0,12 – 7,66	1,65 – 9,85
40 MC 28d + 90d ar	90	5,64 – 1,10	0,08 – 5,46	1,14 – 8,28
40 MC 28d + 180d ar	180	5,82 – 4,48	0,15 – 5,43	2,00 – 1,74
50 MC – 28d cura	28	5,02 – -	0,14 – -	2,05
50 MC 28d + 135d ar	135	5,04 – 5,18	0,11 – 15,7	1,29 – 15,5

Os resultados obtidos para o compósito com 20% de metacaulinita ensaiados após 28 dias de cura em água indicam um aumento no módulo de ruptura e no índice de tenacidade (T_{JCI}) de, respectivamente, 28 e 67% quando comparados com os resultados observados para o compósito a base de cimento portland. Após 135 dias de envelhecimento natural ocorreu um acréscimo no módulo de ruptura de 7% e uma redução de 26% no índice T_{JCI} , em relação aos índices observados aos 28 dias. Entretanto, mesmo com essa redução, a tenacidade do compósito envelhecido por 135 dias ainda é cerca de 22% superior à do compósito que contém apenas cimento portland.

Com relação as misturas com 30% de substituição do cimento portland por metacaulinita, ensaiado após 28 dias de cura, observou-se um aumento de 24 % no parâmetro σ_b e uma redução de 11% e 13% nos índices T_{JCI} e FT, respectivamente, em relação aos do compósito a base de cimento portland. Após 90 dias de envelhecimento natural ocorreu um aumento de 6% e 22% respectivamente na resistência e na tenacidade, em relação aos mesmos índices observados aos 28 dias. Após 180 dias ao ar, observa-se um aumento de 16% e de 50% nos valores de σ_b e T_{JCI} , respectivamente, em relação aos mesmos índices observados aos 28 dias e 43% e 33% em relação aos do compósito apenas de cimento portland ensaiada ao 28 dias de cura.

Os resultados obtidos para o compósito com 40% de metacaulinita após 28 dias de cura em água indicam um aumento tanto no módulo de ruptura e quanto no índice de tenacidade T_{JCI} de 33% quando comparado com o compósito a base de cimento portland. Após 90 dias de exposição ao ar houve um aumento de 2% no módulo de ruptura, e uma redução de 33% na tenacidade comparada com a das ensaiadas aos 28 dias de cura. Após 180 dias ao ar, verificou-se uma aumento de 5% no parâmetro σ_b e 25% no índice T_{JCI} , em relação aos mesmos índices observados aos 28 dias e de 41% e 66%, respectivamente, maiores que o compósito apenas de cimento portland ensaiada ao 28 dias de cura.

Os resultados obtidos para o compósito com 50% de metacaulinita ensaiados após 28 dias de cura em água indicam um aumento no módulo de ruptura e no índice de tenacidade T_{JCI} de, respectivamente, 21% e 55% quando comparado com o compósito a base de cimento portland. Após 135 dias de envelhecimento natural, manteve a resistência entretanto verificou-se uma redução na tenacidade de 21% em relação aos

mesmos índices observados aos 28 dias e ainda foi superior 22% superior quanto ao módulo de ruptura e incrementou cerca de 1,5% no índice de a tenacidade comparando-se com os compósitos que contém apenas cimento portland ensaiado aos 28 dias de cura.

Dos resultados apresentados fica evidenciado que houve uma evolução nas propriedades do compósito a medida que aumentou-se o teor de substituição do cimento portland por metacaulinita. Esse fato está associado a redução na presença do hidróxido de cálcio, um dos principais agentes causador da fragilização do reforço quando usa-se fibra natural. Essa redução de Ca(OH)_2 que já havia se revelado após 28 dias de cura em água através dos ensaios de termogravimetria e difratometria apresentados no item 4.2.1 pode ser observado também nos ensaio realizado a partir do ensaio de difratometria de raio-x realizado após 90 dias de envelhecimento natural, que revela pequenas contagens nos picos característicos da presença do hidróxido de cálcio (ver Figura 4.25).

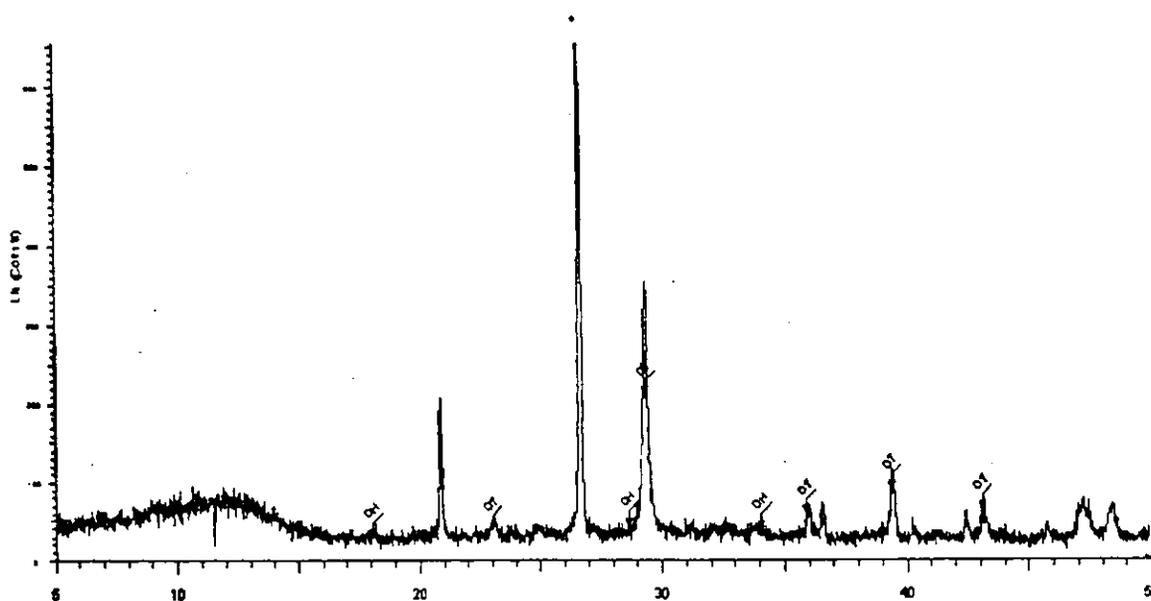


FIGURA 4.25: Difratograma de raio-x de amostras com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita, curado em água por 28 dias e após esse período 90 dias exposto ao ar

A Figura 4.26 mostra a evolução com o tempo da tenacidade do compósito, medidos a partir do índice de tenacidade FT. Os resultados confirmam a análise feita anteriormente de que os compósitos envelhecidos ao ar não sofrem perda significativa de tenacidade até 180 dias.

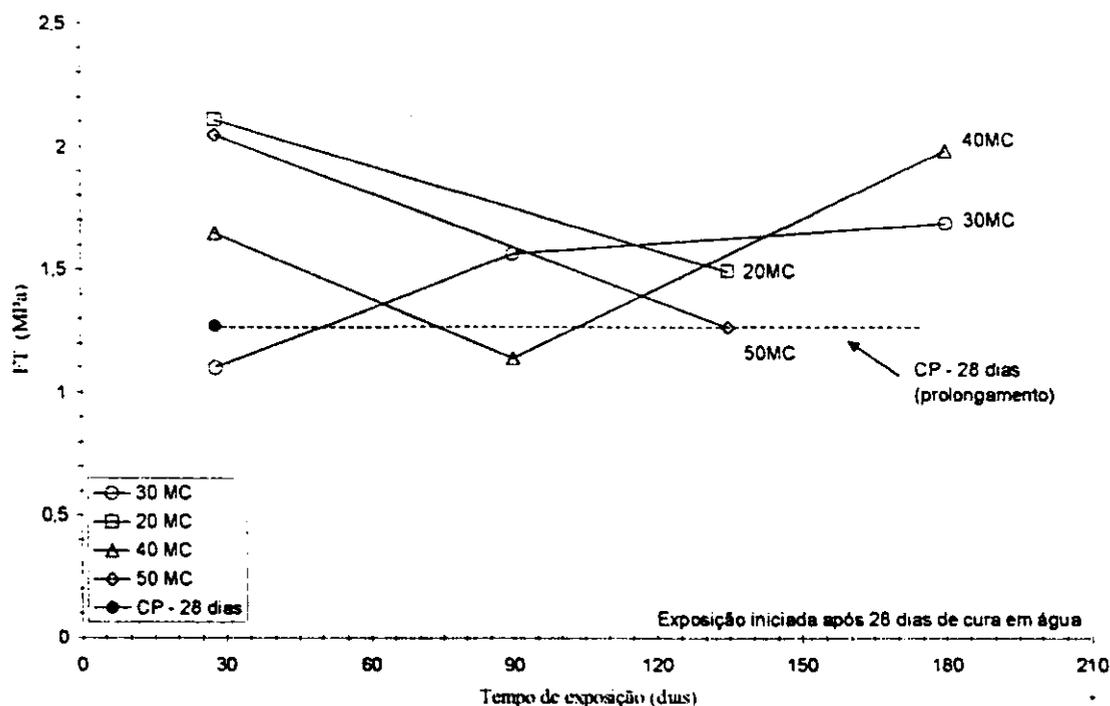


FIGURA 4.26: Evolução da tenacidade, FT, com o envelhecimento natural: compósitos com metacaulinita

4.4.2 Envelhecimento acelerado

4.4.2.1 Teor de hidróxido de cálcio das misturas

Foram submetidas ao envelhecimento acelerado (ciclos alternados de molhagem e secagem), pastas com substituição parcial do cimento portland por material pozolânico, nas seguintes percentagens de substituição: 20%, 40% e 50% e submetidos a 94 ciclos, iniciados após a cura úmida de 28 dias. Os resultados de ensaios de análise termogravimétricos são apresentados nas Figuras 4.27 a 4.31. A Tabela 4.10 apresenta o teor de hidróxido de cálcio livre, nas pastas mistas, analisadas após cura em água por 28 dia e após 94 ciclos alternados de molhagem e secagem.

TABELA 4.10 - Teor de hidróxido de cálcio em misturas sujeitas a 94 ciclos de molhagem-secagem

Adição		Teor de hidróxido de cálcio livre (% massa)
Tipo	Teor (% massa)	
Tijolo moído	20	2.88
Tijolo moído	40	0.35
Metacaulinita	20	2.52
Metacaulinita	40	0.96
Metacaulinita	50	0.02

Observa-se que os teores de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) livre nas pastas após esse período diminuiu substancialmente a medida que aumentou-se os teores de substituição do cimento portland por material pozolânico. Nas amostras em que se utilizou metacaulinita em substituição parcial do cimento portland verificou-se maior eficiência no consumo do (Ca(OH)_2). Observou-se também que as perdas de massa verificadas na faixa de temperatura entre 575 °C e 900 °C, através da inflexão bem pronunciada da curva termogravimétrica representam a dissociação da Calcita, entretanto tal fato, que indica ter havido carbonatação das amostras quando submeteu-se a ciclos alternados de molhagem e secagem, não é preocupante, visto que a carbonatação do ambiente produz ambiente menos prejudicial às fibras de sisal (TOLÊDO FILHO, 1997).

Essa redução na presença do hidróxido de cálcio nas pastas a estas idades, fica evidenciada através ensaios de difratometria de raio-x, realizados nas mesmas, apresentados nas Figura 4.32 e 4.33.

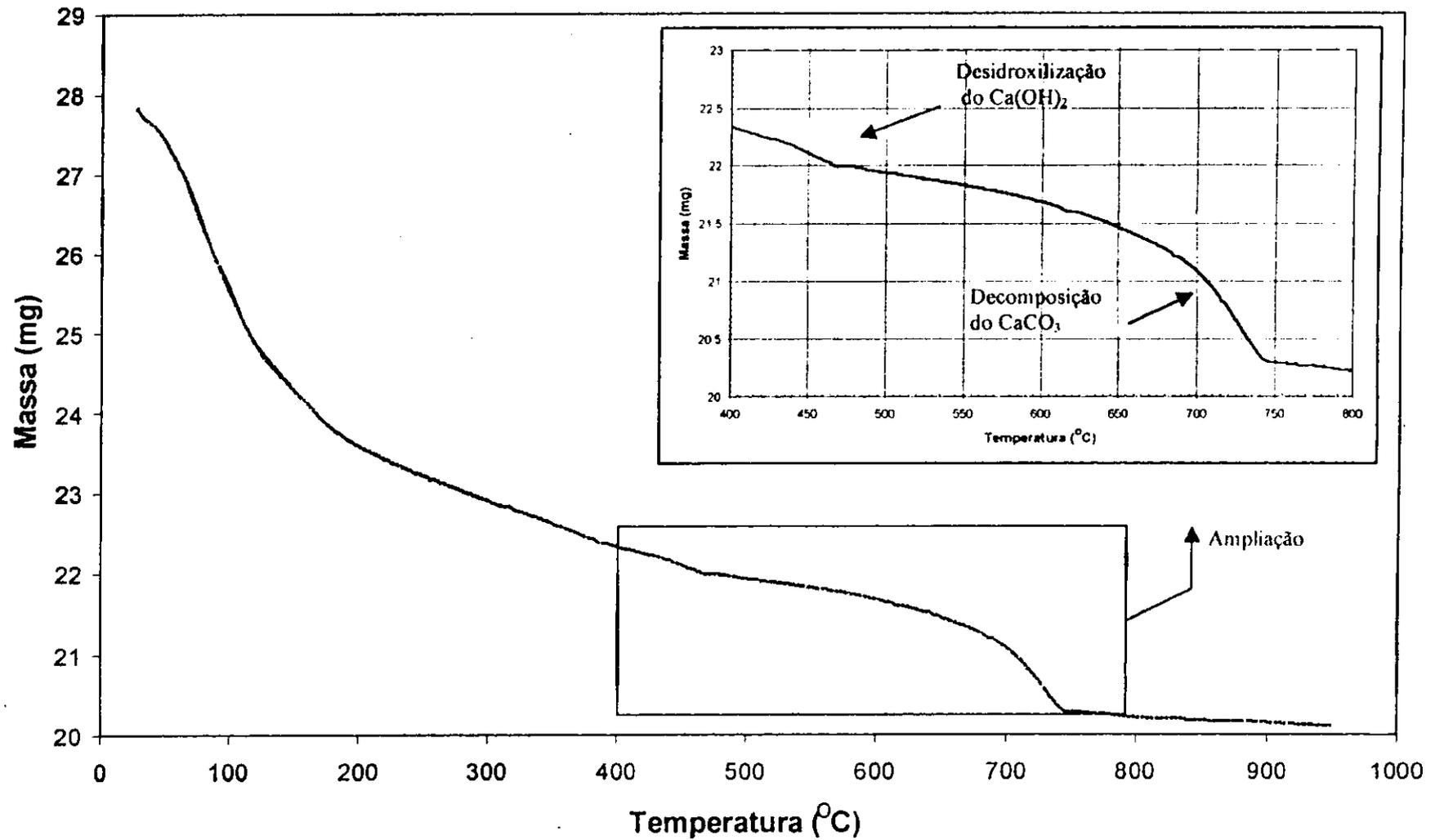


FIGURA 4.27: Curva termogravimétrica da amostra com 20% de tijolo moído após 94 ciclos de molhagem e secagem

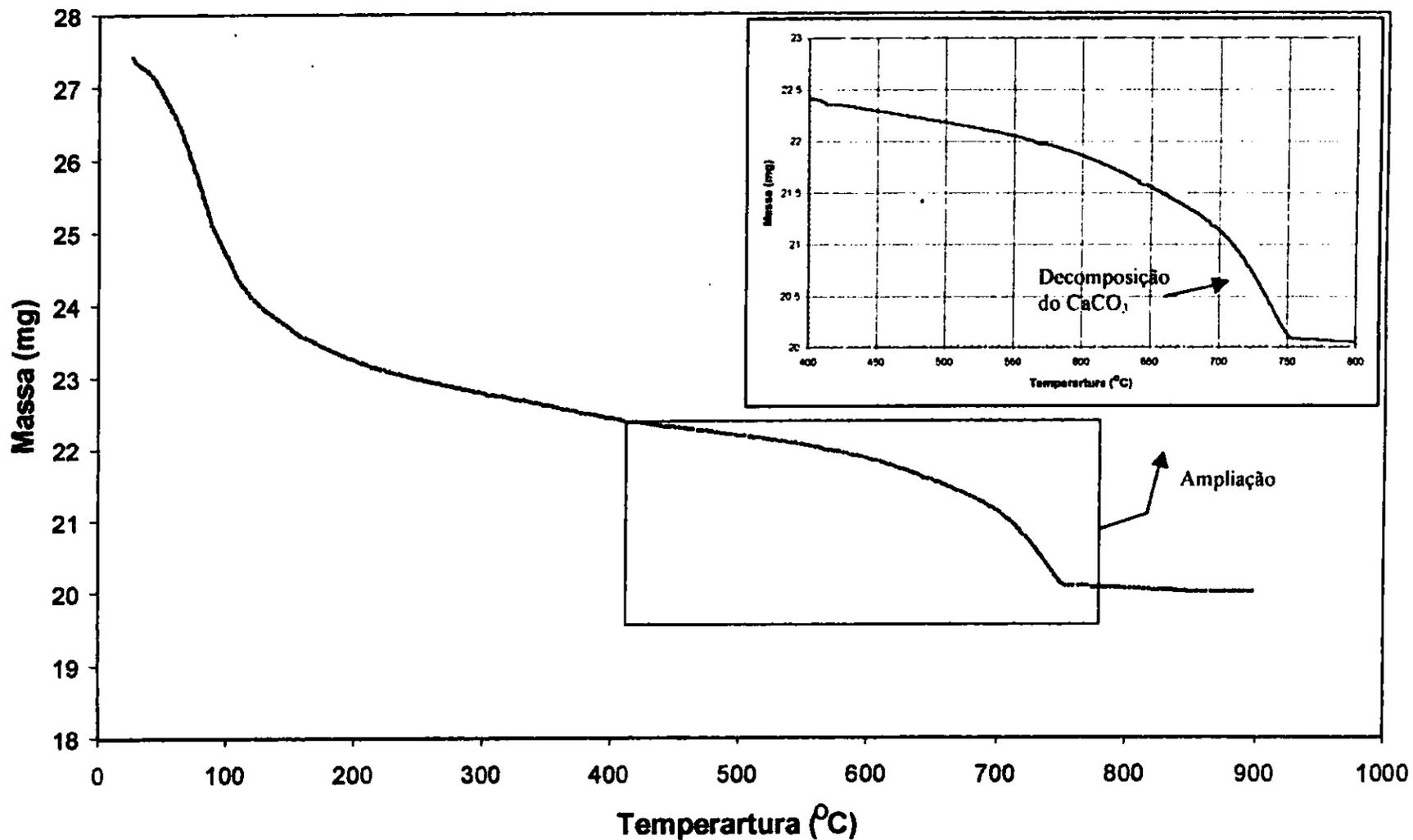


FIGURA 4.28: Curva termogravimétrica da amostra com 40% de tijolo moído submetida após 94 ciclos de molhagem secagem

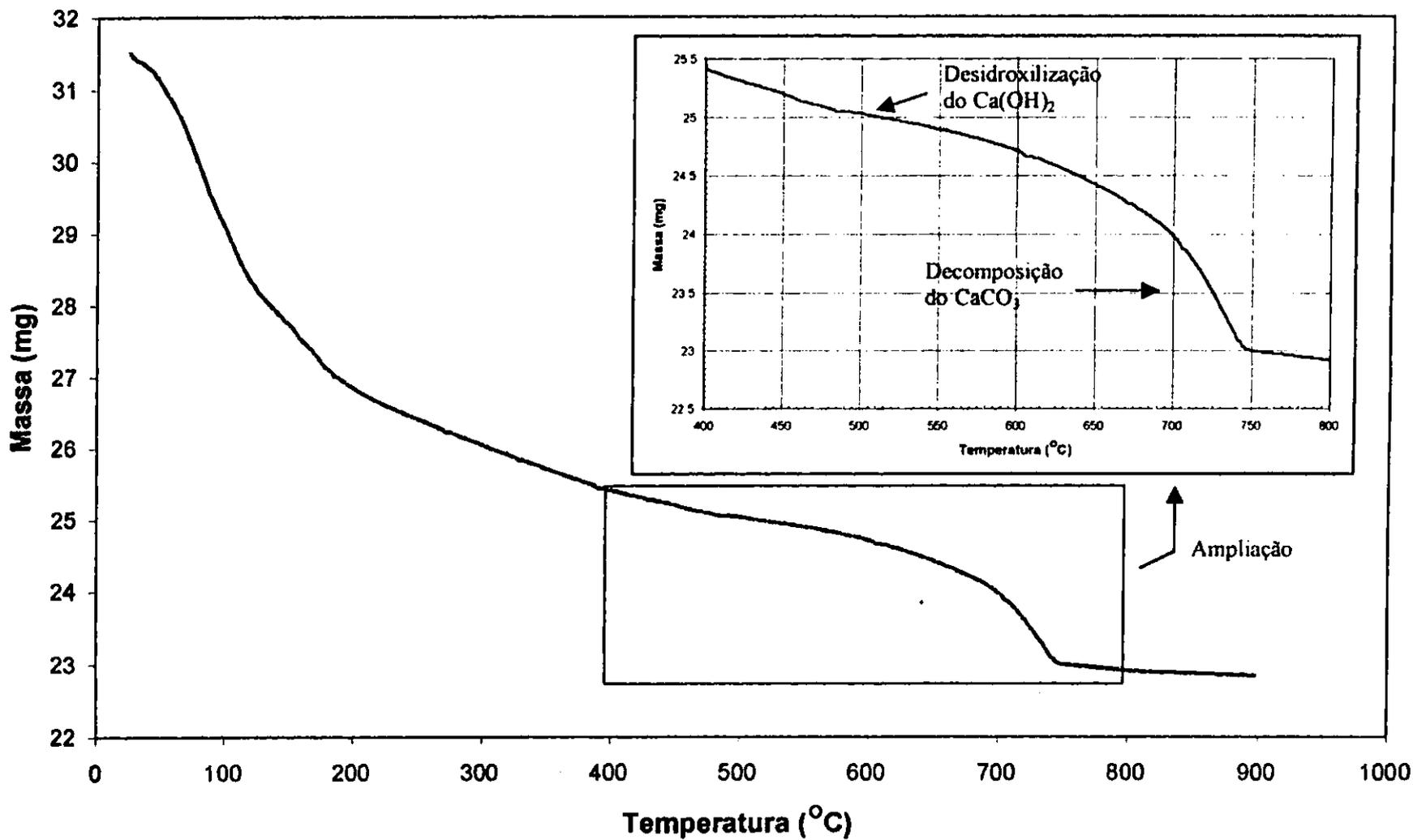


FIGURA 4.29: Curva termogravimétrica da amostra com 20% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem

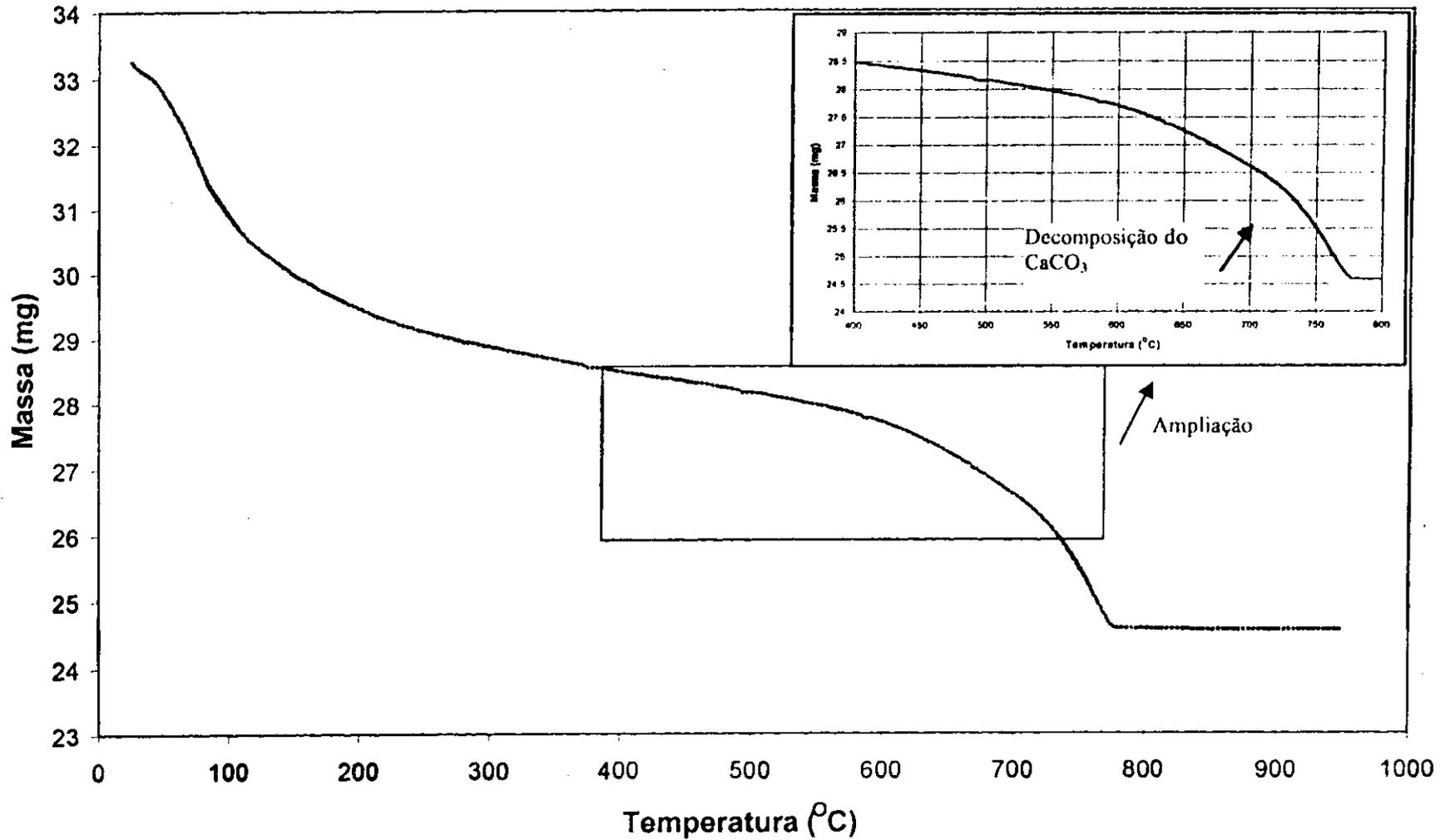


FIGURA4.30: Curva termogravimétrica da amostra com 40% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem

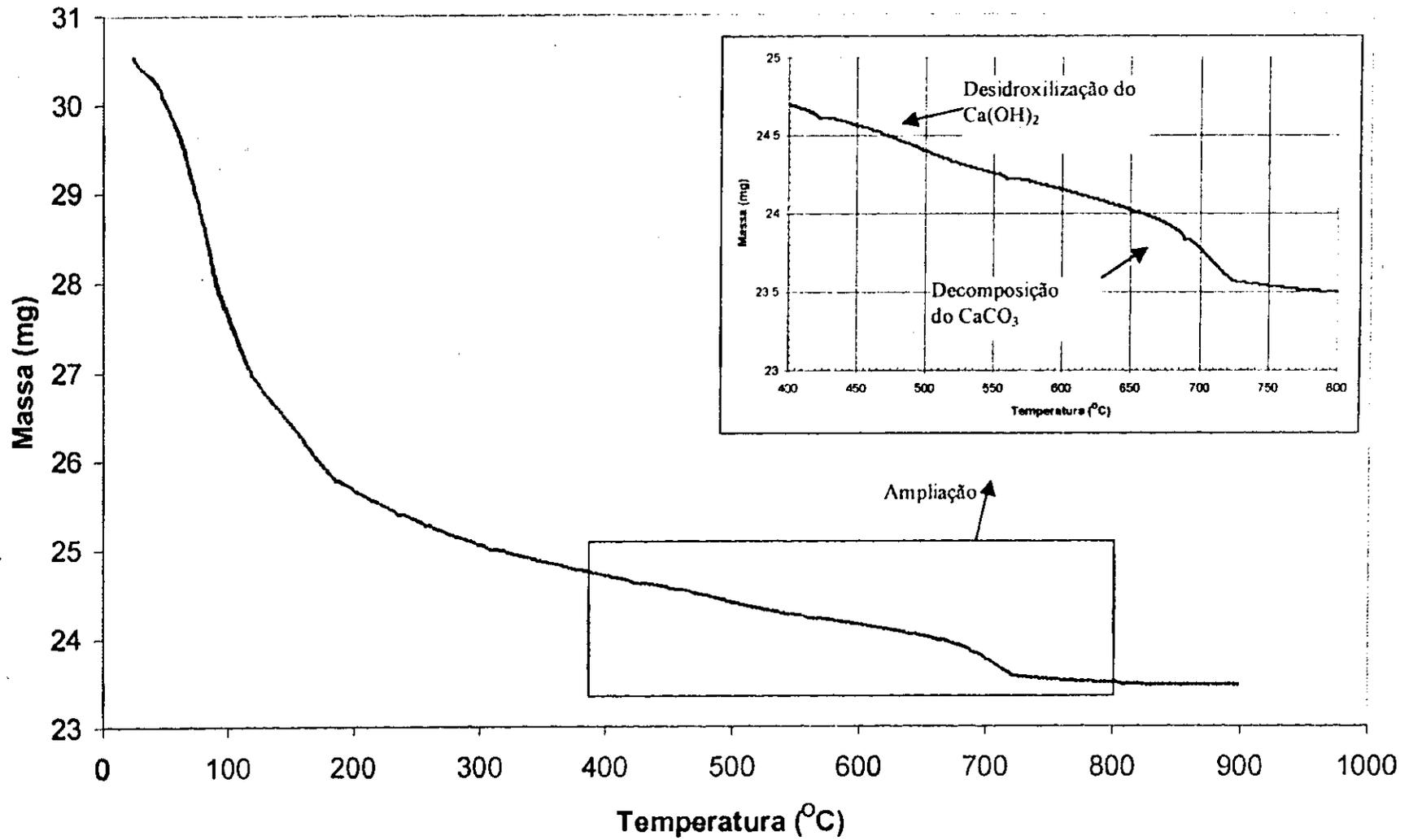


FIGURA4.31: Curva termogravimétrica da amostra com 50% de metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem

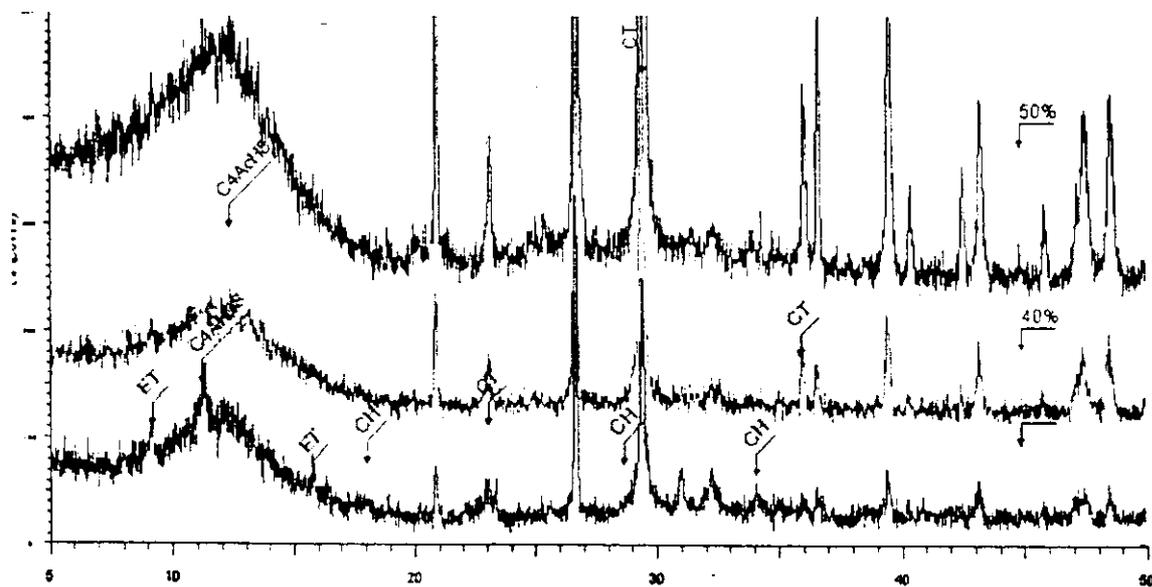


FIGURA 4.32: Difratoograma de amostras com metacaulinita após 94 ciclos de molhagem e secagem

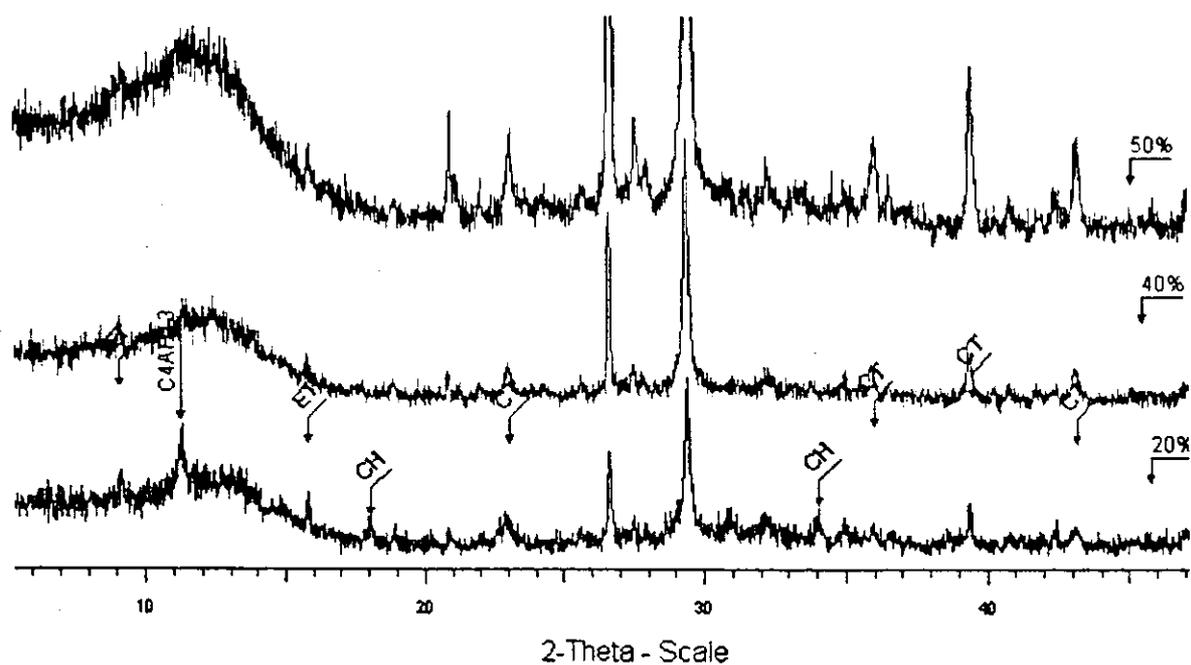


FIGURA 4.33: Difratoograma de amostras com tijolo moído após 94 ciclos de molhagem e secagem

4.4.2.2 Compósitos com tijolo moído

A Figura 4.34 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 20% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído (TM) e submetido ao envelhecimento acelerado por 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

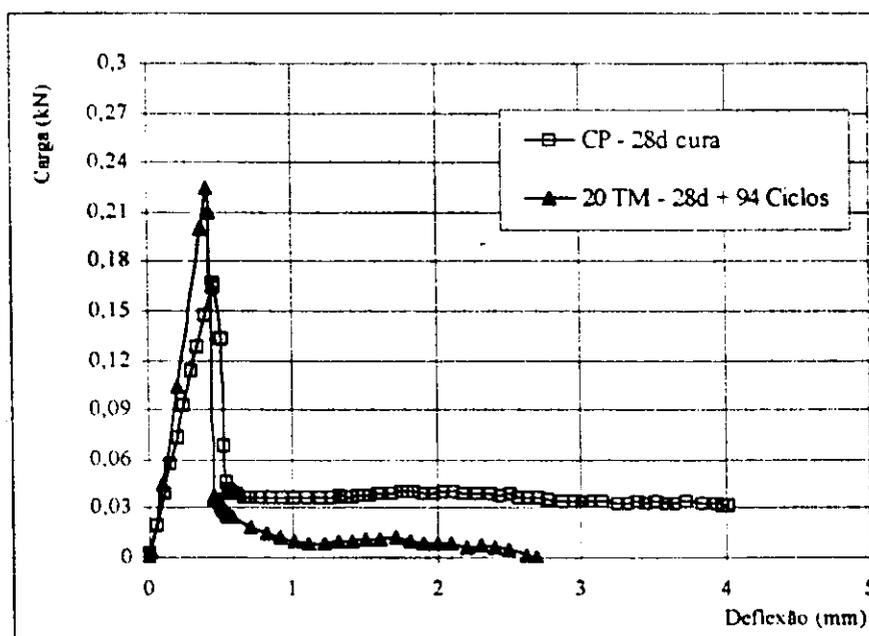


FIGURA 4.34: Curva carga x deflexão dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por tijolo moído - envelhecimento acelerado

A Figura 4.35 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 30% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído (TM) e submetido ao envelhecimento acelerado por 62 e 125 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

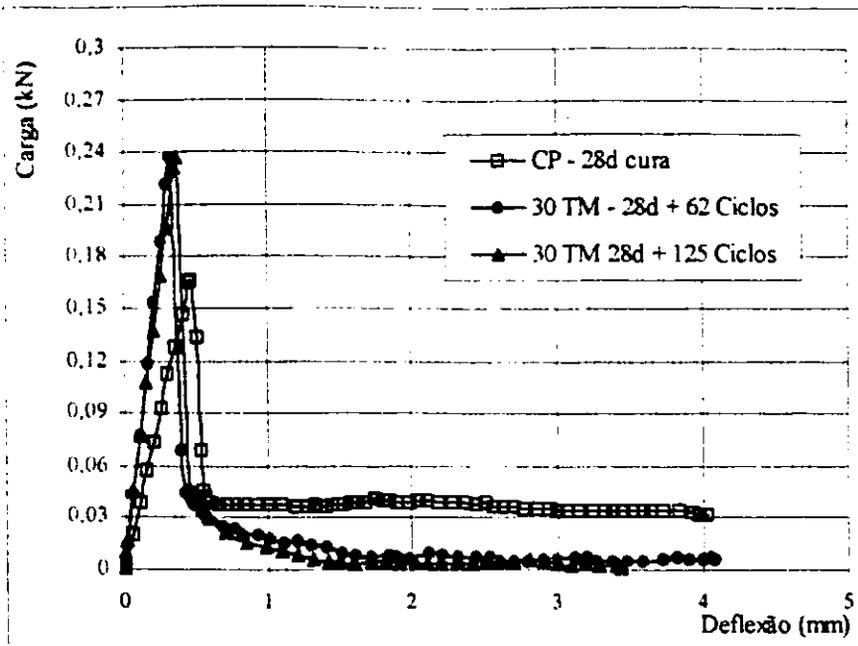


FIGURA 4.35: Curva carga x deflexão dos compósitos com 30% de substituição do cimento portland por tijolo moído - envelhecimento acelerado

A Figura 4.36 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 40% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído (TM) e submetido ao envelhecimento acelerado por 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

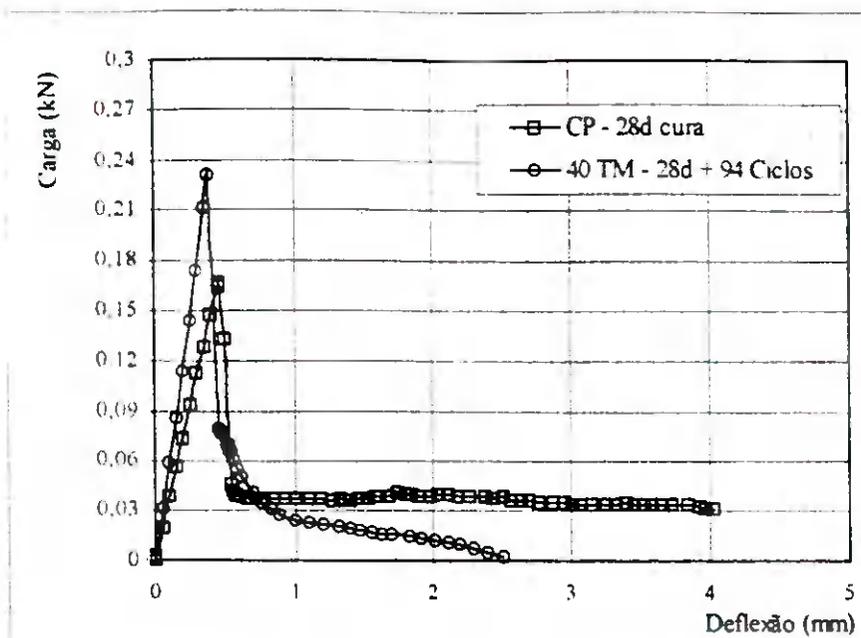


FIGURA 4.36: Curva carga x deflexão dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por tijolo moído - envelhecimento acelerado

A partir das curvas carga x deflexão obtidas nos ensaios, calculou-se o módulo de ruptura (σ_b) e os índices de tenacidade T_{JCI} e FT. Esses parâmetros são utilizados para avaliação da durabilidade do compósito e são apresentados na Tabela 4.11. Nessa Tabela apresenta-se os valores médios de três ensaios e o coeficiente de variação (CV).

TABELA 4.11 - Índices σ_b , T_{JCI} , FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por tijolo moído, submetidos ao envelhecimento acelerado através de ciclos alternados de molhagem e secagem

Mistura	Idade (ciclos w/d)	σ_b (MPa) - CV (%)	T_{JCI} KN.mm - CV (%)	FT (MPa) - CV (%)
CP 28d cura	28	4,14	0,09	1,27
20 TM 28d + 94 w/d	94	5,63 - 2,89	0,07 - 1,48	0,95 - 4,60
30 TM 28d + 62 w/d	62	5,84 - 3,13	0,08 - 4,92	1,07 - 8,26
30 TM 28d + 125 w/d	125	5,89 - 8,85	0,08 - 20,8	1,12 - 19,5
40 TM 28d + 94 w/d	94	5,67 - 1,83	0,08 - 5,01	1,11 - 4,48

Os resultados obtidos para o compósito com 20% de tijolo queimado moído ensaiados após 94 ciclos alternando de molhagem e secagem indicam um aumento no módulo de ruptura de 36% e houve uma redução no índice de tenacidade (T_{JCI}) de 22%,

comparado com os resultados observados para o compósito a base de cimento portland ensaiado após 28 dias de cura em água, o que mostra ter havido uma fragilização da fibra.

Com relação as misturas com 30% de substituição do cimento portland por tijolo queimado moído, ensaiado após 62 ciclos alternados de molhagem e secagem, observou-se um aumento de 41% no parâmetro σ_b e uma redução na tenacidade do compósito de 22% em relação aos do compósito a base de cimento portland ensaiado aos 28 dias de cura em água. Após 125 ciclos, ocorreu um aumento de menos de 1% no módulo de ruptura e manteve-se a mesma tenacidade observada aos 62 ciclos. Ficando evidenciado que ocorreu fragilização do material.

Os resultados obtidos para o compósito com 40% de tijolo queimado moído, ensaiados após 94 ciclos de molhagem e secagem, indicam um aumento no módulo de ruptura de 37% e uma redução de 11% no índice de tenacidade T_{JCI} quando comparado com o compósito a base de cimento portland ensaiado aos 28 dias de cura em água. Esse resultado indica que a fragilização do material está ocorrendo, mas que foi menos que para os índices inferiores de substituição.

4.4.2.3 Compósitos com metacaulinita

A Figura 4.37 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) e submetido ao envelhecimento acelerado por 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

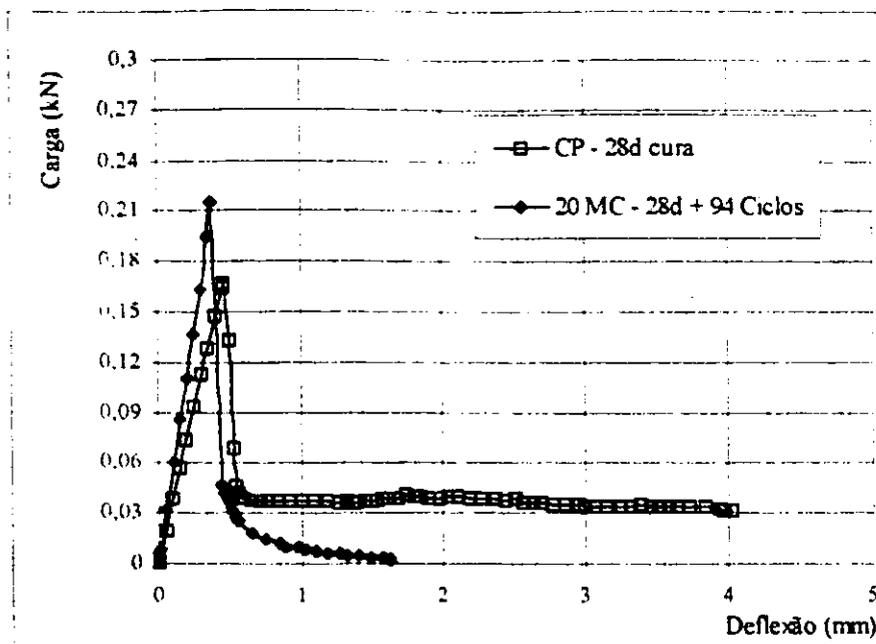


FIGURA 4.37: Curva carga x deflexão dos compósitos com 20% de substituição do cimento portland por metacaulinita - envelhecimento acelerado

A Figura 4.38 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) e submetido ao envelhecimento acelerado por 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

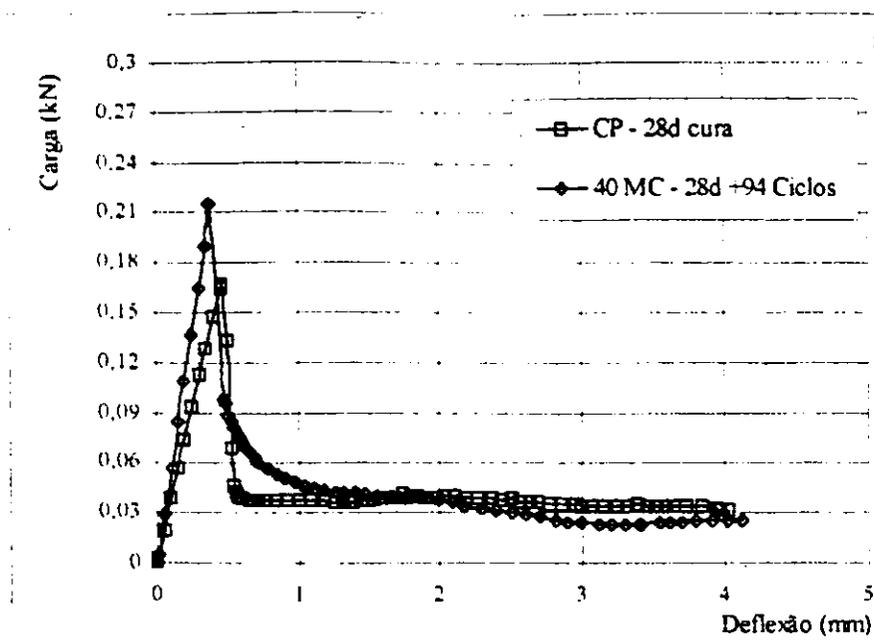


FIGURA 4.38: Curva carga x deflexão dos compósitos com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita - envelhecimento acelerado

A Figura 4.39 mostra o comportamento na flexão do compósito com matriz a base de cimento portland (CP) curado em água por 28 dias e do compósito com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita (MC) e submetido ao envelhecimento acelerado por 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, iniciados após a cura em água por 28 dias.

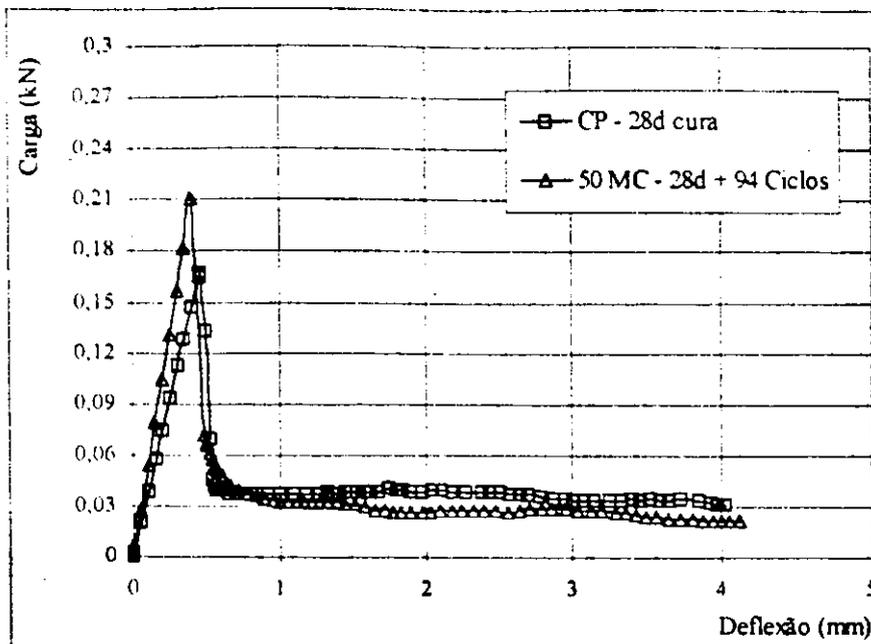


FIGURA 4.39: Curva carga x deflexão dos compósitos com 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita - envelhecimento acelerado

A partir das curvas carga x deflexão obtidas nos ensaios, calculou-se o módulo de ruptura (σ_b) e os índices de tenacidade T_{JCI} e FT. Esses parâmetros são utilizados para avaliação da durabilidade do compósito e são apresentados na Tabela 4.12. Nessa Tabela apresenta-se os valores médios de três ensaios e o coeficiente de variação (CV).

TABELA 4.12 - Índices σ_b , T_{JCI} e FT para as espécimes com substituição parcial do cimento portland por metacaulinita, submetidos ao envelhecimento acelerado através de ciclos alternados de molhagem e secagem

Mistura	Idade (ciclos)	σ_b (MPa) - CV (%)	T_{JCI} KN.mm - CV (%)	FT (MPa) - CV (%)
CP 28d cura	28	4,14	0,09	1,27
20 MC 28d + 94	94	5,39 - 1,40	0,07 - 6,94	0,93 - 7,75
40 MC 28d + 94	94	5,60 --	0,11 --	1,35 --
50 MC 28d + 94	94	5,07 --	0,11 --	1,33 --

Os resultados obtidos para o compósito com 20% de metacaulinita ensaiados após 94 ciclos alternados de molhagem e secagem indicam um aumento no módulo de ruptura de 30% e uma redução no índice de tenacidade (T_{JCI}) de 22%, quando comparado com os resultados observados para o compósito a base de cimento portland

ensaiado após 28 dias de cura em água. Isso indica que houve uma fragilização do material.

Com relação as misturas com 40% de substituição do cimento portland por metacaulinita, ensaiado após 94 ciclos alternados de molhagem e secagem, observou-se um aumento de 35% no parâmetro σ_b e de 22% no índice de tenacidade T_{JC1} em relação aos do compósito a base de cimento portland ensaiado após 28 dias de cura em água.

Os resultados obtidos para o compósito com 50% de metacaulinita após 94 ciclos alternados de molhagem e secagem indicam um aumento no módulo de ruptura de 22% e de 22% quanto no índice de tenacidade T_{JC1} quando comparados com os compósito a base de cimento portland ensaiado após 28 dias de cura em água.

Dos resultados apresentados fica evidenciado que houve uma evolução nas propriedades do compósito a medida que aumentou-se o teor de substituição do cimento portland por metacaulinita. Esse fato está associado a redução na presença do hidróxido de cálcio, um dos principais agentes causador da fragilização do reforço quando usa-se fibra natural. Essa redução que já havia se revelado após 28 dias de cura em água através dos ensaios de termogravimetria e difratometria apresentados no item 4.2.1 pode ser observado também nos ensaio realizado a partir do ensaio de difratometria de raio-x realizado após 94 ciclos de molhagem e secagem nas pastas com 20, 40 e 50% de substituição do cimento portland por metacaulinita, que revela pequenas contagens nos picos característicos da presença do hidróxido de cálcio (ver Figura 4.34). Fica evidenciado que nos teores superiores a 40% de substituição do cimento por metacaulinita os compósito além de melhorarem a carga pré-pico melhoraram também sua tenacidade.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pode-se tirar as seguintes conclusões:

a) a adição de metacaulinita e tijolo moído queimado aumentou, para todas as porcentagens de substituição, a resistência à compressão da argamassa de cimento portland. A resistência à flexão não foi significativamente afetada pela presença dos materiais pozolânicos.

b) com relação ao desenvolvimento da resistência com o tempo, os ensaios realizados indicaram que a resistência à compressão simples da argamassa de referência apresentou maior elevação de resistência, atingindo 55% após 200 dias de cura úmida. No mesmo período, as argamassas contendo 30% de tijolo moído e metacaulinita experimentaram acréscimos de, respectivamente, 26,6% e 12,6%. Os resultados indicaram, no entanto, um melhor comportamento, em todas as idades estudadas, da argamassa contendo metacaulinita ou tijolo moído queimado.

c) a utilização do tijolo moído e da metacaulinita reduziu os teores de hidróxido de cálcio decorrentes da hidratação do cimento portland. A redução foi mais significativa para teores de materiais pozolânicos maiores ou iguais a 40%. A metacaulinita mostrou-se mais eficiente que o tijolo moído para a mesma proporção de adição.

d) com relação a durabilidade dos compósitos envelhecidos ao ar, verificou-se que ocorreu uma evolução na sua resistência e tenacidade até a idade de 180 dias, indicando a eficiência dos tratamentos utilizados.

e) para os compósitos que foram submetidos ao envelhecimento acelerado, os resultados apresentados indicaram que houve uma evolução no módulo de ruptura para todos as mistura até 30% de substituição. Entretanto, verificou-se uma fragilização do material até esse teor de substituição. Misturas com teores de metacaulinita de 40% e 50% consumiram praticamente todo o hidróxido de cálcio mantiveram a tenacidade e aumentaram a resistência do compósito após 180 dias de exposição natural ou 94 ciclos de molhagem e secagem. As misturas com 40% de tijolo moído aumentaram a módulo de ruptura do compósito mas apresentaram uma redução de cerca de 11% na tenacidade após 94 ciclos de molhagem e secagem.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., "Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento, NBR – 5752, 1992.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., "Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão", NBR - 7215.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., "Areia normal para ensaio de cimento", Especificação Brasileira, NBR – 7214, 1982. EB-1133.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação de Massa específica Real, NBR-6474, 1984.
- ASTM D.1435-85. Standard Practice for Outdoor weathering of Plastics, 1988.
- AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S.L. "Concrete reinforce with natural fibre". In: Swamy, R. N. ed. Natural fibre reinforced cement and concrete. London: Blackie and Son Ltd., 1984, v.5, Cap. 3, pp. 106-140.
- BAHIA. Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária, Coordenação de Economia Rural. O Sisal na Bahia, Salvador, 1991, 41p.
- BARONIO, G., BINDA, L. "Pozzolanicity of bricks and claysd"
- BARROS, M.A.L.; CARVALHO, O.S.; SILVA, O.R.R.F., "Economia e situação da cultura do sisal". Embrapa-CNPA, Campina Grande, 1999 13-23pp.
- BERGSTRÖN, SVEN G.; e HANS-ERIK GRAM†. "Durability of alkali-sensitive fibres in concrete". The International Journal or Composites and Lightweight Concrete – Vol, 6, Nº 2, Maio 1984, pp. 75-80.

- BERHANE, Z. "Durability of Mortar Roofing Sheets Reinforced With Natural Fibre: Symposium on Building Materials, for Low-Income Housing , Bangkok, Tailandia, Jan. 20-26, 1987, pp. 321-327.
- BERHANE, Z. "Performance of Natural Fibre reinforced Mortar Roofing Tiles". *Materials and Structures*, 1994. Pp. 347-352.
- BEZERRA, J.E.S.; SILVA, O.R.R.F.; SANTOS, J.W.; MOREIRA, J.A.N. "Estudo comparativo do comportamento de bulbilhos oriundos da Tanzânia, agrave hibrido 11648 e Sisalana no carri paraibano. In: Embrapa, CNPA, Relatório técnico anual, 1987-1989. Campina Grande, 1991, pp. 591-592.
- BRS., Building Research Station, 1970.
- CABRERA, J.G.; LYNSDALE, C.J. "The effect of superplasticisers on the hydration of normal portland cement", *L'industria Italiana del Cemente*, 1996, pp. 532-541.
- CANOVAS, M. F.; N. H. SELVA; G. M. KAWICHE. "New economical solutions for improvement or durability of Portland mortars reinforced with sisal fibres". *Materials and Structures*, 1992. pp. 417-422.
- GRAM, H.E., "Durability of Natural Fibres in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1983, 225 pp.
- GRAM, H.E. "Natural Fibre Concrete Roofing", *Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Vol. 5, Edited by R.N.Swamy, Blackie and Son Ltd, Londres, 1988, pp. 256-285.
- GRANNER, E.A.; GODOY JUNIOR. "Cultura da fazenda brasileira" , Melhoramentos, São Paulo, 1967, 461p.
- JCI SF4, "Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of fibre Reinforced Concrete", JCI 'Standarts for Test Metods of Fibre Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute, Japão, 1983, pp. 45-51.
- KAWICHE, G.M. "Estudio de Morteros Reforzados com Fibras de Sisal", Ph.D. Thesis, Universidad de Madrid, Spain, 1991.
- KHATIB, J.M., WILD, S., "Pore Size Distribution of Metakaolin Paste", in *Cement and Concrete Research*, vol.26, n° 10, 1996, pp. 1545-1553.
- KHATIB, J.M., SABIR, B.B., WILD, S., "Some Properties of Metakaolin Paste and Mortar", In: *Concrete for Environment enhancement and Protection*, Londres, 1996, pp. 637-643.

- LEAL, E.; SILVA, G.B.; COSTA, I.C.; SILVA, L.G.; PEREIRA, M.M.B.; QUEIROGA, O.M.; MIRANDA, O.V. "Sistema Agroindustrial do Sisal na Paraíba", UFPB, Campina Grande, 1997, 41p.
- LIWTZENBERGER, S.C. "Guide for field crops in the tropics and subtropcs, Agency for International Development, Washington, 1974, 321p.
- MARQUES, N. "O sisal na Bahia", Salvador, 1978, 67p.
- MEDINA, J. C. "O Sisal", Secretaria da Agricultura, São Paulo, 1954, 254p.
- MEDINA, J.C. "Plantas fibrosas da flora mineral". Instituto Agronômico – Campinas, 1959.
- MEDINA, J.C. "Multiplicação do sisal (agave sisalana perrine) por bulbilhos e rebentões e métodos de preparo e plantio das mudas", *Bragantia*, 1963, vol. 22, pp. 359-574.
- MOREIRA, J.A.N.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, °R.R.F, "Botânica e Morfologia do Sisal". In: *Agronegócio do Sisal*. Embrapa-CNPA, Campina Grande, 1999, 25-34 pp.
- MUKHERJEE, K.G., SATYANARAYANA, K.G., "Structure and Properties of some Vegetable Fibres. Part 1: Sisal Fibre", *Journal of Materials Science* 19, 1984, pp. 3925-3934.
- NETO, M.S.A.; BELTRÃO, N.E.M. "Agronegócio do Sisal no Brasil", Embrapa, SPI, CNPA, Campina Grande, 1994, pp. 44-53.
- NILSSON, L., "Reinforcement of Concrete with Sisal and other Vegetable Fibres". Swedish Council for Building Research, Document N° D-14, Stockolm, 1975.
- PRATA, F.C. "Principais culturas do Nordeste", ESAM, Mossoró, 1983, 251p.
- RILEM DRAFT RECOMMENDATIONS. TESTING METHODS FOR FIBRE REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES. Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections. Vol. 17, n° 102, Nov/Dec. 1984.
- ROLIM, J.S., "Influência da adição de pozolanas na Resistência `a compressão de argamassas de cimento portland", Relatório Final, CNPq/PIBIC, Campina Grande, 1999, 27p.
- SABIR, B.B., WILD, S., KHATIB, J.M. "On the Workability and strength development of metakaolin concrete", R. K. Dhir e T. Dyer, Londres, 1996.

- SILVA, D.D. "Agricultura do Sisal", In: Seminário Nacional do Agronegócio do Sisal - J. Pessoa, Embrapa, CNPA, C. Grande, 1996a, pp. 19-35.
- SILVA, D.D. "Agricultura do Sisal", In: Seminário do Agronegócio do Sisal, Cruz das Almas 1996b, 22p.
- SILVA, O.R.R.F.; CARVALHO, O.S.; ALVES, I.; VALLE, L.V. "Evaluacion de un protótipo descortizador de hojas de sisal. In: Conferencia Internacional de Mecanizacion agrária, 25, Zaragoza, 1993, pp. 269-276.
- SILVA, O.R.R.F.; CARVALHO, O.S.; RAMOS, E.S.B.; "Cultivo do sisal no nordeste", In: O Agronegócio do Sisal no Brasil, Embrapa, CPI, CNPA, Campina Grande, 1999, pp. 53-92.
- SANTOS, J.D. "sisal", In: CONAB - Safra de Verão - Preço mínimo. Brasília, DF, 1991..
- SHIMIZU, G., JORILLO JR, P., "Coir Fibre Reinforced Cement Based Composite. Part I: Microstructure and Properties of Fibre Mortar", 4th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, Sheffield. Published by E & FN Spon, Londres, 1992.
- SINGH, S.M., "Alkali Resistance of Some Vegetable Fibre and their Adhesion with Portland Cement", Research and Industry, 15, 1985, pp. 121-126.
- SOUZA SOBRINHO, J.; SILVA, D.D.; SILVEIRA, T.S.; SILVA, F.A.S. "Plantio em alta densidade para o híbrido 11648 e agave sisalana na zona fisiográfica tabuleiro". Companhia de Celulose da Bahia, Salvador, 1985.
- SWIFT, D.G., R.S.L. SMITH. "Sisal Fibre Reinforcement of Cement Paste and Concrete". Materials of Construction for Developing Countries. Bangkok, Thailand, August, 1978, pp. 221-233.
- SWIFT, D.G., R.S.L. SMITH. "Sisal-cement Composites as Low-cost Construction Materials". Appropriate Technology, Vol 6 nº 3, Nov. 1979, pp. 6-8.
- SWIFT, D.G., "Sisal-cement composites and their Potential for Rural Africa". Composite structures 3, Elsevier Applied Science Publishers ed. por I. H. Marshall, 1985, pp. 774-787.
- TAYLOR, H.F.W. Cement chemistry. London. v.2, 1997. 459p.
- TOLÊDO FILHO, R. D., "Materiais Compósitos reforçados com fibras Naturais: Caracterização Experimental", Ph.D Thesis, DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College, London, U.K. 1997, 472pp.

- TOLÊDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K. Tensile properties of sisal and compression behaviour of cement mortar sisal composite. In: International conference on composite engineering, 3., New Orleans 1996.
- TOLÊDO FILHO, R.D.; "Materiais compósitos Reforçados com Fibras Naturais Vegetais", In: Simpósio XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Materiais não Convencionais para Construções Rurais", Campina Grande, 1997, pp 49-82.
- TOLÊDO FILHO, R.D. "Mechanical properties of RTM sisal fibre-epoxi composites". Submitted for publication. 1999.
- VELPARI, V., RAMACHANDRAN, B.E., BASHKARON, T.A., PAI, B.C. e BALASUBRAMANIAN, N., "Alkali Resistance of Fibres in Cement", Journal of Materials Science., 15. 1980, pp. 1579-1584.
- WILD, S., KHATIB, J., SABIR, B.B. e ADDIS, S.D. (1996), "The potential of fired brick clay as partial cement replacement material". Concrete for Environment Enhancement and Protection. Editado por R.K. Dhir e T.D. Dyer, E&FN Spon, Londres, pp. 685-696.
- ZAMPIERI, V.A., "Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolânas de Argilas Calcinadas", Dissertação de Mestrado. Instituto de Geo-Ciências da USP, São Paulo, 1989.

ANEXO I

ESTUDO TÉORICO DOS TERMOGRAMAS

Nos casos mais simples, a velocidade de reação de um processo químico pode ser representada sob a forma de uma equação diferencial de primeira ordem:

$$-\frac{dx}{dt} = k \cdot f(x) \quad (\text{A.1})$$

onde x representa a fração de matéria não alterada, no instante t . A função $f(x)$, mais ou menos simples, é proposta por estudos teóricos ou por resultados de experiências. Na análise termogravimétrica de compostos, k denominada constante cinética em termogramas isotérmicos, varia com a temperatura sob a forma:

$$k = g(T) \quad (\text{A.2})$$

onde T é a temperatura absoluta do sistema em evolução, dada por:

$$T = u \cdot t + T_0 \quad (\text{A.3})$$

onde u designa a velocidade de aquecimento e T_0 a temperatura absoluta inicial do sistema,

no instante $t = 0$.

Desta forma a equação A.1 pode ser reescrita como,

$$-\frac{dx}{f(x)} = \frac{1}{u} g(T) dT \quad (\text{A.4})$$

Ao integrarmos a equação A.4 desde a temperatura absoluta inicial T_0 até o fim da reação, ou de $t = 0$ ($x = 1$) até t teremos,

$$\int_x^1 \frac{dx}{f(x)} = \frac{1}{u} \int_{T_0}^T g(T) dT \quad (\text{A.5})$$

A função $g(T)$ definida pela Lei de Arrhenius é dada por:

$$g(T) = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (\text{A.6})$$

onde A designa uma nova constante; E representa a energia de ativação do processo químico, dado em calorias; R representa a constante de um gás perfeito, dado em $\text{cal} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mole}^{-1}$. T representa a temperatura absoluta do sistema.

Substituindo a equação A.6 em A.5 e desenvolvendo a integração do segundo membro teremos:

$$\int_x^1 \frac{dx}{f(x)} = \frac{A}{u} \frac{RT_0^2}{E} e^{-\frac{E}{RT_0}} \left[e^{-\frac{E(T-T_0)}{RT_0^2}} - 1 \right] \quad (\text{A.7})$$

Designando $F(x) = \int_x^1 \frac{dx}{f(x)}$ e $k_0 = A e^{-\frac{E}{RT_0}}$ e substituindo na equação A.7

teremos:

$$F(x) = \frac{k_0}{u} \frac{RT_0^2}{E} \left[e^{-\frac{E(T-T_0)}{RT_0^2}} - 1 \right] \quad (\text{A.8})$$

Quando T é suficientemente elevada com relação a T_0 , a unidade fica desprezível diante do elemento exponencial do segundo membro da equação A.8.

Utilizando um coeficiente $\alpha = \frac{E}{RT_0^2} \log e$ e aplicando o logaritmo aos dois lados da

equação teremos:

$$\log F(x) = \log \frac{k_0}{u} \frac{RT_0^2}{E} + \alpha(T - T_0) \quad (\text{A.9})$$

Esta equação mostra que, para temperaturas elevadas, $\log F(x)$ resulta uma função linear com a temperatura e que o ponto representativo da equação da direita é α , dado em $^{\circ}\text{K}^{-1}$.

ESTUDO EXPERIMENTAL DOS TERMOGRAMAS

A termogravimetria é considerada um dos métodos mais rápidos de exploração de sistemas químicos, sendo utilizada principalmente para o estudo de corpos intermediários em uma reação de uma determinada substância composta. Nesse caso, o termograma é comparado com termogramas de substâncias simples, como o da Figura A.1 para determinar se o mesmo tipo de reação aconteceu. Como exemplo, vamos analisar o termograma abaixo, obtido da queima de uma pasta de cimento portland hidratada.

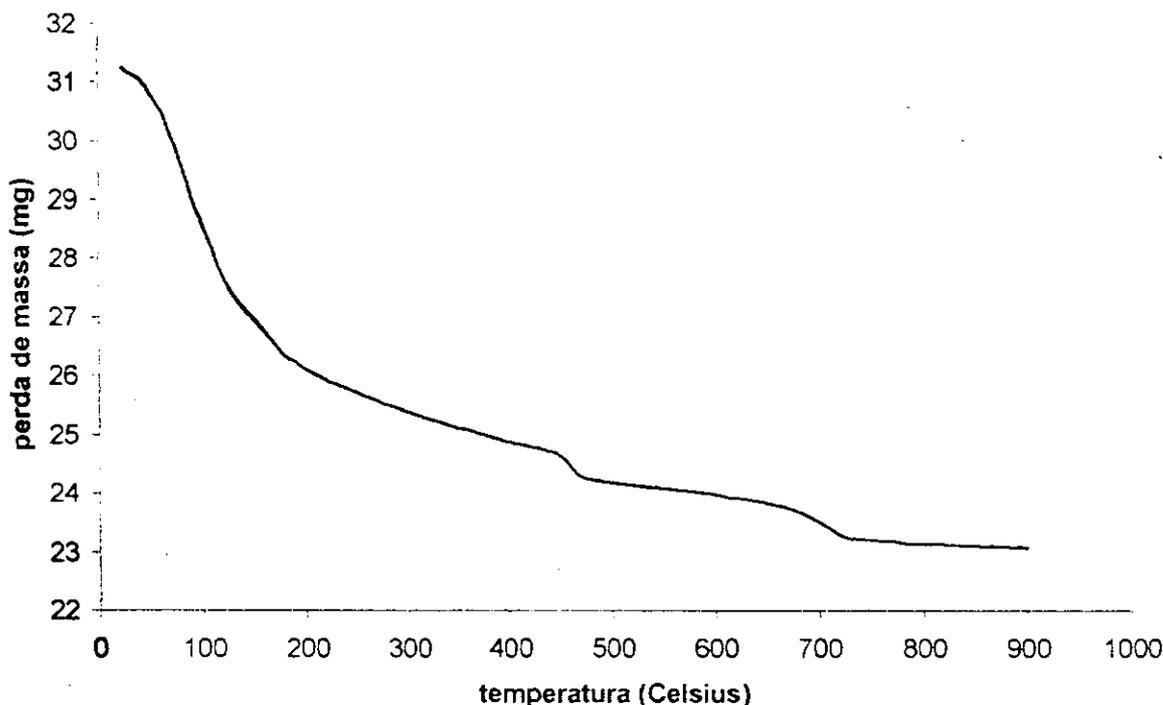


FIGURA A.1: Queima de pasta de cimento portland hidratada, com amostra de 31,27 mg, taxa de aquecimento de 10 C/min e fluxo de N₂ de 50 ml/min

O termograma apresenta uma perda de massa inicial devida à evaporação de água livre e continua perdendo massa lentamente até apresentar uma primeira perda mais acentuada entre 400 e 500°C, e logo após outra perda entre 600 e 800°C. A partir da composição inicial da pasta de cimento, e pela comparação com termogramas de substâncias mais simples, pode-se definir que a reação entre 400 e 500°C corresponde à desidratação do hidróxido de cálcio, que sofre eliminação de água por aquecimento, segundo a reação:



A reação que acontece entre 600°C e 800°C é devida à decomposição

térmica do carbonato de cálcio, definida pela equação A.11.

Devido aos diversos fatores que influenciam a forma do diagrama termogravimétrico, não é possível definir com certeza, somente a partir do diagrama, os pontos de início e fim das reações e a conseqüente a perda de massa devida a cada uma delas. Por esse motivo, geralmente o ensaio termogravimétrico deve ser acompanhado por outros ensaios termométricos como a Análise Térmica Diferencial (ATD) e a Análise Termogravimétrica Derivada (TGD).

No caso da impossibilidade de desenvolvimento simultâneo de outros métodos, pode-se fazer uma análise experimental dos termogramas, com o objetivo de calcular a fração x de uma determinada substância. De acordo com a equação A.9, cada reação, que causa a decomposição de uma substância x , será representada por uma reta cujo início encontra-se a uma temperatura T_0 e cujo final a uma temperatura T . Desta forma, cada ponto de inflexão desta nova curva representa o fim de uma reação química e o início de uma nova reação.

Seja, por exemplo, determinar a quantidade de água liberada pela reação 10 de desidratação do hidróxido de cálcio. Inicialmente, deveremos determinar a quantidade de água quimicamente combinada no termograma da Figura A.1. Para um termograma realizado com amostra de 50 mg, taxa de aquecimento de 10 K/min e fluxo de N_2 de 15 ml/min, TAYLOR (1997) indica que os voláteis retido em torno de 150°C correspondem a água não-evaporável, e aqueles retidos em torno de 90°C correspondem a água residual ou com 11% de umidade relativa. Levando em consideração que a reação de dissolução do carbonato de cálcio inicia em torno de 520°C, podemos então definir que a quantidade de água quimicamente combinada na pasta de cimento hidratada possui valor máximo, $x = 1$, a uma temperatura de 150°C e valor mínimo, $x = 0$, a 520°C, como é apresentado no gráfico da Figura A.2.

Seja agora determinar os pontos de início e fim da reação dada pela equação A.10. Para isso, deveremos utilizar a A.9, adotando $F(x) = \log \frac{1}{x}$ obteremos uma função linear da temperatura. Os pontos de inflexão, neste nova curva, entre as temperaturas 400 e 500°C deverá indicar o intervalo exato onde ocorre a reação, possibilitando o cálculo da massa de água liberada.

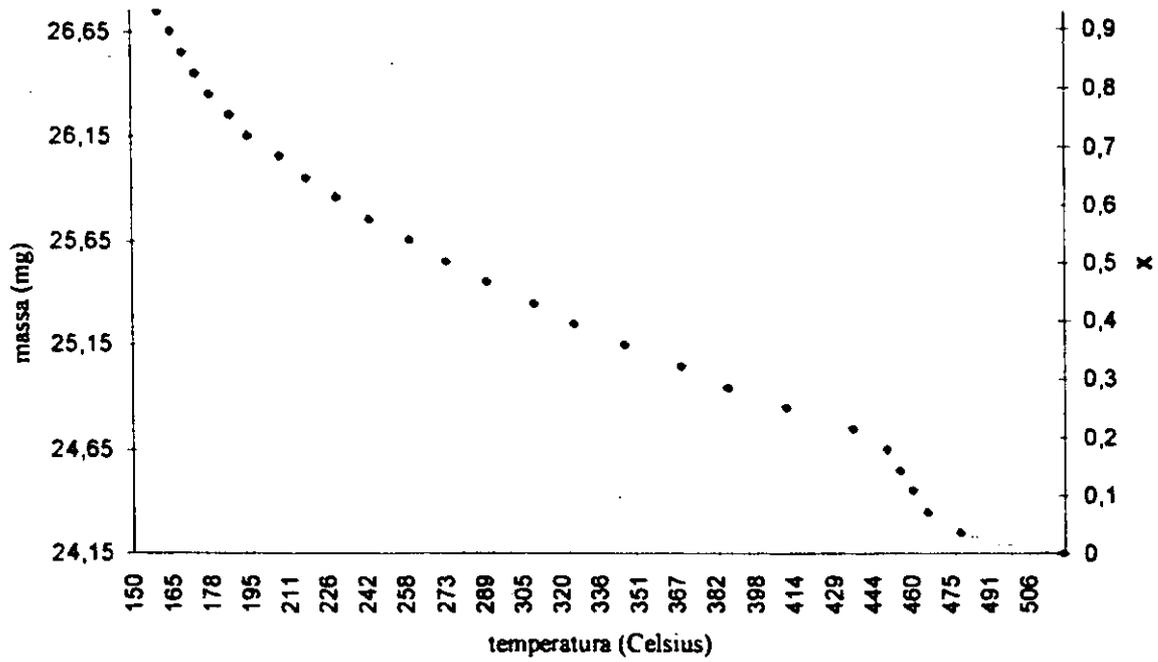


FIGURA A.2: Perda de água quimicamente combinada (x) em uma queima de pasta de cimento portland hidratada

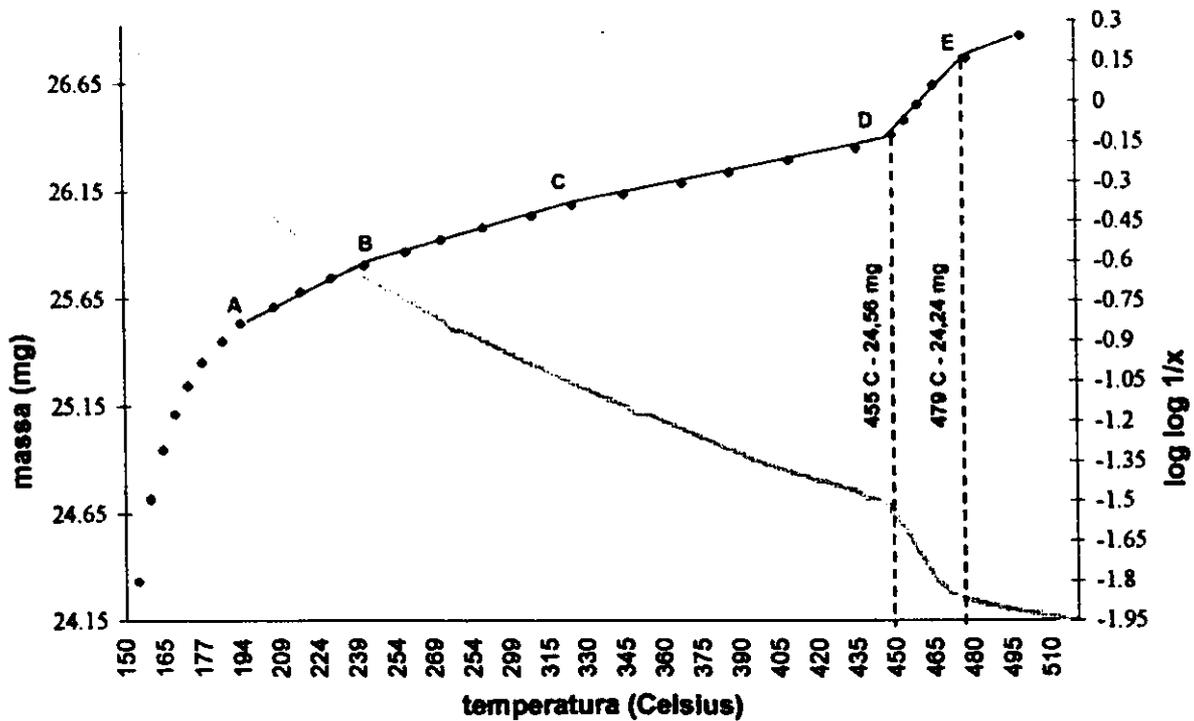
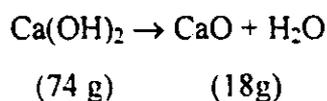


FIGURA A.3: Termograma da queima de um pasta de cimento portland hidratada e sua correspondente transformada bilogaritmica

Analisando a Figura A.3, podemos então calcular a porcentagem da massa de água liberada durante a queima do hidróxido de cálcio:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{455} - m_{479}}{m_{150} - m_{520}} \cdot 100$$
$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{24,56 - 24,24}{26,95 - 24,15} \cdot 100 = 11,43\%$$

Através de valores teóricos de perda de massas de Ca(OH)_2 pode-se quantificar o hidróxido de cálcio presente em funda da temperatura (CABRERA, J.F., LYNSDALE, C.J.,1996). As reação referentes a esse processo é representada a seguir:



Desta equação pode-se mostrar quanto foi a perda de massa ocorrida para uma molécula-grama de água (18g) originada da desidratação de uma molécula de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 (74 g)

Desta equação pode-se mostrar quanto foi a perda de massa ocorrida para uma molécula-grama de água (18g) originada da desidratação de uma molécula-grama de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (74g).