



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**DESENVOLVIMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE
BAIXA ALCALINIDADE PARA A PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS REFORÇADOS EM BENEFÍCIO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

AUTOR: CLÁUDIO BATISTA DOS SANTOS

ORIENTADOR: PROF. ANTÔNIO FARIAS LEAL

SUPERVISORA: PROF^a. VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO

Campina Grande, PB – Brasil.

Outubro de 2007

**DESENVOLVIMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE
BAIXA ALCALINIDADE PARA A PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS REFORÇADOS EM BENEFÍCIO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

AUTOR: CLÁUDIO BATISTA DOS SANTOS

**MONOGRAFIA SUBMETIDA À SUPERVISORA E À COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE, COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL.**

Aprovada por:



Profª Dra. VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO
(Supervisora)

Campina Grande, PB – Brasil.

Outubro de 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Julho de 2021.

Sumé - PB

*Aos meus familiares pelo apoio,
confiança, amizade e carinho. Sentimentos
que foram fundamentais para que eu
chegasse até aqui.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por todos os dons dados a mim fazendo com que eu seja o que sou hoje e por ter me dado uma família tão maravilhosa, a qual eu não seria nada sem eles. E por me permitir viver ao lado de amigos tão especiais e conseguir superar todos os obstáculos com muita garra e humildade.

A minha mãe, Cleide, que sempre se dedicou com muito amor para proporcionar condições para os meus estudos fazendo com que eu chegasse aqui.

Aos meus avós, Creuza e José Batista, pelo amor, incentivo, carinho, e, principalmente pelo exemplo de honestidade e dignidade.

A minha irmã Michelle, pela amizade e por ter me acolhido, estando ao meu lado todo este tempo.

Aos meus tios e tias que sempre me apoiaram e incentivaram, proporcionando condições para que eu vencesse com louvor mais uma etapa de minha vida.

A Neto e Fernanda, casal que muito me ensinou durante toda a pesquisa.

A minha grande amiga Cibelle, companheira de pesquisa e de curso, que sempre me ajudou nas horas em que precisei.

Ao professor Antônio Leal, responsável por todo projeto, foi com ele que aprendi muito sobre a pesquisa, e, com quem também amadureci como pessoa.

A professora Veruschka que com muita paciência me orientou durante este tempo.

A minha prima Cláudia que me ajudou nas horas em que a ela recorri.

Ao SEBRAE, órgão que financia a pesquisa.

A UFCG por se o intermediador de todos os conhecimentos técnicos adquiridos.

A todos que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE BAIXA ALCALINIDADE PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS EM BENEFÍCIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na construção civil os compósitos à base de cimento são os mais utilizados. Porém, as matrizes desses compósitos não apresentam boa resistência a esforços de tração, dessa maneira faz-se o reforço das matrizes com outros materiais. O reforço com fibras vegetais têm tido notável destaque pelo fato dessas fibras serem elementos orgânicos renováveis e não agressivos ao homem. As matrizes de cimento Portland apresentam elevada alcalinidade, isso se torna prejudicial à resistência e durabilidade dos compósitos pelo fato das fibras serem degradadas pelo hidróxido de cálcio dissolvido, reduzindo sua capacidade de conferir resistência desejada ao compósito. Com a finalidade de reduzir a alcalinidade dos compósitos cimentícios sem alterar suas propriedades mecânicas, na presente pesquisa substituiu-se 50% do cimento portland por metacaulinita e resíduo cerâmico, que são materiais pozolânicos. Esta pesquisa tem como objetivo a obtenção de uma matriz cimentícia de baixa alcalinidade através da substituição parcial de cimento Portland por metacaulinita e resíduo cerâmico. Essa substituição visa o completo consumo do hidróxido de cálcio gerado a partir da hidratação de silicatos de cálcio presentes no cimento, diminuindo a alcalinidade da matriz. Dessa forma, permite-se um posterior reforço dessa matriz com fibras vegetais. Utilizaram-se cinco proporções diferentes de substituição ao cimento. Para analisar o efeito das substituições nas propriedades mecânicas da matriz foram realizados ensaios de compressão simples. Ensaios de análise térmica diferencial (ATD) foram realizados para observar a redução da alcalinidade. Diante dos resultados obtidos, foi verificada no ensaio de ATD a redução da alcalinidade para os teores de substituição utilizados. Já para a resistência, foi verificada que os maiores valores apresentaram-se nas maiores concentrações de metacaulinita associadas a um traço com menor percentual de areia.

Palavras-chave: Compósitos, metacaulinita, resíduo cerâmico, resistência e redução da alcalinidade.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF CEMENT MATRIX OF LOW ALKALINITY FOR THE PRODUCTION OF REINFORCED COMPOSITES IN BENEFIT OF THE BUILDING SITE

In the building site the composites to the cement base are the more used. However, the matrix of those composites don't present good resistance to traction efforts, in that way it is made the reinforcement of the matrix with other materials. The reinforcement with vegetable fibers has been having notable highlights for the fact of those fibers be renewable organic elements and no aggressive to the man. The portland cement matrix presents high alkalinity, that if it turns harmful to the resistance and durability of the composites for the fact of the fibers they be degraded by the hydroxide of dissolved calcium, reducing his/her capacity to check resistance wanted to the composite. With the purpose of reducing the alkalinity of the cement composites without altering their mechanical properties, in the present research it was substituted 50% of the portland cement by metakaolin and ceramic residue, that it are material addictive minerals. This research has as objective the obtaining of a cement matrix of low alkalinity through the partial substitution of Portland cement for metakaolin and ceramic residue. That substitution seeks the complete consumption of the hydroxide of calcium generated starting from the hydration of present calcium silicates in the cement, reducing the alkalinity of the matrix. In that way, it is permitted a subsequent reinforcement of that matrix with vegetable fibers. Five proportions different from substitution were used to the cement. To analyze the effect of the substitutions in the mechanical properties of the matrix rehearsals of simple compression they were accomplished. Rehearsals of differential thermal analysis (ATD) they were accomplished to observe the reduction of the alkalinity. Before the obtained results, it was verified in the rehearsal of ATD the reduction of the alkalinity for the substitution tenors used. Already for the resistance, it was verified that the largest values came in the largest metakaolin concentrations associated to a line with smaller percentile of sand.

Keywords: Composites, metacaulinita, ceramic residue, resistance and reduction of the alkalinity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metacaulinita	15
Figura 2a - Lixo das cerâmicas	16
Figura 2b - Resíduo cerâmico moído e passado na peneira 200	16
Figura 3a - Planta de sisal	19
Figura 3b - Fibra de sisal	19
Figura 4a - Corpos-de-prova no molde	24
Figura 4b - Corpos-de-prova desmoldados	24
Figura 5 - Ensaio de compressão simples.	25
Figura 6 - Equipamento no qual se realiza o ensaio de ATD	26
Figura 7 - Valores de resistência dos corpos-de-prova aos 14 dias de idade	27
Figura 8 - Valores de resistência dos corpos-de-prova aos 28 dias de idade	28
Figura 9 - Valores de resistência dos corpos-de-prova com adição de superplastificante... ..	29
Figura 10 - Análise térmica diferencial: (a) Mistura 0a, (b) Mistura Ia, (c) Mistura IIa, (d) Mistura IIIa, (e) Mistura IVa, (f) Mistura Va	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos das propriedades das fibras de sisal	20
Tabela 2 – Propriedades químicas e físicas dos aditivos minerais	22
Tabela 3 – Dados técnicos do superplastificante	23
Tabela 4 – Teores de substituição do cimento por aditivos minerais	23
Tabela 5 – Teores de adição de superplastificante	25
Tabela 6 – Composição das misturas submetidas ao ensaio de ATD	26

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Considerações iniciais	11
1.2. Objetivos.....	12

CAPÍTULO 2

2. Revisão Literária	13
2.1. Materiais compósitos.....	13
2.2. Matriz cimentícia.....	13
2.3. Aditivos Minerais	14
2.3.1. Metacaulinita	14
2.3.2. Resíduo cerâmico.....	15
2.4. Fibras Naturais	17
2.4.1. Fibras Naturais vegetais	17
2.4.1.1. A fibra de Sisal.....	19
2.5. Reforço de matrizes com fibras naturais	20

CAPÍTULO 3

3. Material e Métodos	21
3.1. Características dos materiais	21
3.1.1. Cimento	21
3.1.2. Aditivos minerais: metacaulinita e resíduo cerâmico	21
3.1.3. Areia.....	22
3.1.4. Superplastificante	22
3.1.5. Água	23
3.2. Procedimentos experimentais	23
3.2.1. Composição das misturas sem adição de superplastificante.....	23
3.2.2. Composição das misturas com adição de superplastificante.....	24

3.2.3. Análise Térmica Diferencial	25
CAPÍTULO 4	
4. Resultados e Discussão	27
4.1. Ensaio de compressão simples	27
4.1.1. Misturas sem adição de superplastificante	27
4.1.2. Misturas com adição de superplastificante	29
4.1.3. Ensaio de análise térmica diferencial	30
CAPÍTULO 5	
5. Conclusões	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

CAPÍTULO 1

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

Diante da grande preocupação mundial com o meio ambiente e os impactos causados pela as atividades do homem, a engenharia tem buscado avanços em técnicas de reaproveitamento dos resíduos da construção civil e da indústria. A partir daí torna-se viável o surgimento de novos materiais com propriedades mecânicas adequadas e durabilidade. Um dos materiais que apresenta grande potencial de aplicação, os materiais compósitos, são formados pela união de dois ou mais matérias, que juntos, produzem propriedades as quais não podem ser obtidas com qualquer um dos seus componentes individuais (GONÇALVES, 2005).

Nos dias atuais, os compósitos a base de cimento são os mais empregados na construção civil, são eles: pastas, argamassas, etc. Eles apresentam como grande vantagem o fato de serem constituídos de elementos de construção simples, de baixo custo e fácil aquisição, além de permitir uma moldagem fiel à forma desejada.

As matrizes desses compósitos são frágeis e rompem com pequena facilidade sob esforços de tração. Para compensar essa deficiência, outros materiais são empregados como reforço dos materiais à base de cimento. Atualmente, para este reforço tem-se dado grande preferência às fibras vegetais, como no caso das fibras de sisal, pelo fato de serem elementos orgânicos renováveis e não agressivos ao homem e por contribuírem como fonte alternativa de renda para produtores rurais de regiões carentes. As fibras vegetais ainda apresentam outras vantagens tais como: sua abundância, baixo custo e consumo de energia, representando assim uma alternativa para a indústria da construção civil na produção de elementos de cobertura e revestimento, painéis divisórios e componentes habitacionais e, conseqüentemente, podem contribuir para o rápido desenvolvimento da infra-estrutura do país (MELO FILHO, 2005).

Entretanto, sabe-se que tais matrizes cimentíceas apresentam elevada alcalinidade pela presença de grande quantidade de íons $(OH)^{-1}$ dissolvidos na pasta que

degradam severamente a estrutura das fibras. Por esse motivo, no presente trabalho, a substituição parcial do cimento por metacaulinita e resíduo cerâmico foi adotada como solução para o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio, de forma que não altere a integridade da fibra e as propriedades mecânicas do compósito.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo a obtenção de uma matriz cimentícia de baixa alcalinidade através da substituição parcial de cimento Portland por metacaulinita e resíduo cerâmico. Essa substituição visa o completo consumo do hidróxido de cálcio gerado a partir da hidratação de silicatos de cálcio presentes no cimento, diminuindo a alcalinidade da matriz. Dessa forma, permite-se um posterior reforço dessa matriz com fibras vegetais.

CAPÍTULO 2

2. Revisão Literária

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos podem surgir de combinações entre metais, material cimentício, cerâmicas, polímeros e outros. As possíveis combinações dependem das condições de processamento e das prováveis incompatibilidades entre os componentes. Compósitos, para aplicações estruturais, geralmente utilizam fibras – metálicas sintéticas e naturais – como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, como mantas e estruturas têxteis de diferentes arquiteturas (SILVA, 2003).

Materiais frágeis perdem a sua ductilidade após a primeira fissura. Para contornar tal problema, o reforço com diferentes tipos de fibras vem sendo estudado a fim de aumentar a ductilidade e obter melhores propriedades mecânicas para esses materiais. Ao se adicionarem fibras às matrizes, verificam-se, nas suas propriedades, mudanças consideráveis, que vão depender de fatores tais como: tipo de fibra, fração volumétrica de fibras, resistência, módulo de elasticidade, relação de aspecto, características da superfície e orientação das fibras. Os efeitos da adição de fibras são mais evidentes após a fissuração da matriz. Depois desse estágio, percebe-se que o compósito apresenta um comportamento mais dúctil ao invés da ruptura brusca que ocorreria na ausência dessas fibras (MELO FILHO, 2005).

2.2. Matriz cimentícia

As matrizes cimentícias mais utilizadas na produção de compósitos são formadas por cimento portland, agregados e água. Uma grande vantagem da matriz cimentícia é o fato de ser um material de construção simples e barato que pode ser produzido com uso de equipamentos simples e pode ser moldado adquirindo qualquer forma, sendo um material de boas propriedades de resistência e vida útil.

2.3. Aditivos Minerais

Pesquisadores têm verificado os benefícios da substituição de parte do cimento por aditivos minerais (microsilica, cinza volante, metacaulinita, residuo cerâmico, e outros) que tenham atividade pozolânica, proporcionando assim uma estrutura de poros mais densa e, em consequência, aumento de resistência química, aumento de resistência à compressão e impermeabilidade nos componentes à base de cimento.

O papel desses aditivos é provocar reações pozolânicas as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). A essa capacidade de reagir quimicamente com o cimento Portland, dá-se o nome de atividade pozolânica que pode ser determinada através da avaliação da resistência mecânica. Quanto mais reativo for o material pozolânico, maior será o consumo de hidróxido de cálcio, portanto maior será sua atividade pozolânica culminando em uma matriz de menor valor alcalino e menos nociva às fibras vegetais de reforço. Entretanto, Gonçalves (2005) afirma que o desempenho de uma dada pozolana no concreto depende de uma combinação de diversos fatores como composição química, teor de fase vítrea, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, granulometria, forma e massa específica, proporção dos materiais, relação água/cimento, tipo de cimento e agregado, aditivos químicos, idade e grau de hidratação do concreto.

Aliada à importância de consumo do hidróxido de cálcio da matriz, a adição de materiais pozolânicos ainda apresenta-se eficiente no preenchimento dos espaços capilares maiores, culminando em redução dos poros, melhora na zona de transição fibra/matriz e aumento da impermeabilidade do sistema.

Com o aproveitamento desses materiais, acrescenta-se à viabilidade de substituição do cimento na matriz por produtos pozolânicos o fato de reduzir o custo final do compósito e reciclar elementos poluentes do ambiente (LEAL, 2004).

2.3.1. Metacaulinita

A metacaulinita (Figura 1) é uma sílica amorfa obtida pela calcinação de argila caulinitica (caulim), a temperaturas entre 500°C e 650°C; moída até a finura de 700m²/kg ou 900 m²/kg, o que resulta num material de grande pozolanicidade (LIMA, 2004).

Vários estudos realizados confirmam a eficiência da substituição de parte do cimento por metacaulinita no consumo do hidróxido de cálcio.



Figura 1 - Metacaulinita

LIMA (2004) constatou, através de análises térmicas, a ausência total de Ca(OH)_2 para pastas com teores de 30% de metacaulinita, sendo essa conclusão baseada em ensaios realizados em amostras curadas por 28 dias e 2 anos, comprovando a eficiência da metacaulinita na eliminação do Ca(OH)_2 .

2.3.2. Resíduo cerâmico

A reciclagem e a reutilização de determinados tipos de resíduos industriais contribuem para diminuir a demanda por matéria prima e o consumo de energia, e protegem o meio-ambiente de resíduos, que levariam, em muitos casos, milhões de anos para serem decompostos pela natureza. Além dos custos ambientais, há também os custos referentes ao gerenciamento da deposição clandestina e do não aproveitamento de resíduos que poderiam ser reciclados e utilizados como matéria prima em outros processos industriais (COSTA, 2004).

O resíduo cerâmico (Figura 2) é um material oriundo da moagem de produtos de cerâmica vermelha não aproveitados pelo comércio ou rejeitados pela indústria.

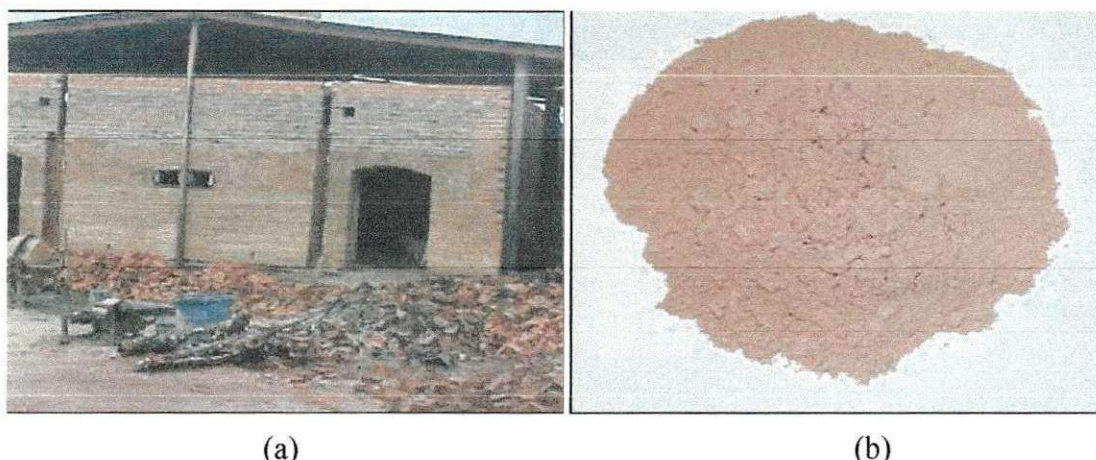


Fig. 2 – (a) Resíduos de cerâmicas. (b) Resíduo cerâmico moído e passado na peneira 200

De acordo com a ABCERAM (2003), o setor industrial da cerâmica pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos. A indústria da cerâmica vermelha compreende os materiais empregados na construção civil, tais como tijolos, blocos, telhas e tubos cerâmicos, manilhas e argila expandida. No Brasil o setor de cerâmica vermelha conta com cerca de 11.000 empresas, que são em sua maioria de micro ou pequeno porte. Existem grandes produtores da indústria cerâmica em todas as regiões do país. Atualmente, a indústria cerâmica vermelha brasileira produz cerca de 65 milhões de toneladas por ano gerando um resíduo de cerca de 19,5 milhões de toneladas (ABCERAM, 2003). O volume de resíduo gerado é significativo, ocasionando problemas de transporte, de estocagem, e manutenção dos depósitos e ambientais (GONÇALVES 2004).

Gonçalves (2004) e Anjos (2003) mostraram que a substituição de 20% de resíduo cerâmico mantém as propriedades mecânicas e promove maior refinamento da estrutura de poros, reduzindo a absorvidade e a penetração acelerada de íons cloretos aumentando a resistência ao ataque por sulfato de magnésio. Tudo isso acarreta em economia no produto final, considerando-se que a pozolana foi produzida a partir de resíduos de tijolos.

2.4. Fibras Naturais

As fibras naturais são subdivididas de acordo com a sua origem, podendo ser de origem vegetal, animal ou mineral. As fibras de origem mineral vêm sendo usadas há bastante tempo, sendo as principais, as fibras de amianto. As fibras de origem vegetal são uma matéria prima renovável e possuem um baixo custo, tendo um futuro promissor. Um grupo de fibras naturais – fibras de coco, sisal, bambu, banana, celulose, entre outras – tem sido motivo de vários estudos para a sua possível aplicação como reforço.

As fibras naturais como reforço em concreto consistem, na maioria dos casos, em fibras curtas sendo dispersas aleatoriamente nas matrizes cimentícias. As fibras atuam nas microfissuras restringindo o crescimento de fissuras quando submetidas a tensões que levam a ruptura do compósito. A dispersão de fibras em matriz frágil oferece um meio conveniente e prático de alcançar melhorias em muitas propriedades dos materiais de engenharia, como fratura, módulo de elasticidade na flexão, fadiga e resistência a impacto (MELO FILHO, 2005).

2.4.1. Fibras Naturais vegetais

As fibras vegetais apresentam uma série de vantagens sobre as fibras sintéticas justificando assim o seu uso como reforço em matrizes tanto cimentícias como poliméricas. Além disso, estas fibras servem como um substituto natural para o amianto. Algumas vantagens e desvantagens da fibra vegetal em relação à sintética podem ser observadas:

Vantagens:

- Conservação de energia.
- Grande abundância.
- Baixo custo.
- Não é prejudicial à saúde.
- Possibilidade de incremento na economia agrícola.
- Prevenção de erosão.
- Baixa densidade.
- Biodegradáveis.

Desvantagens:

- Baixa durabilidade quando usada como reforço em matriz cimentícia.
- Variabilidade de propriedades.
- Fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes.

Antes de se estudar o comportamento das fibras vegetais como reforço em uma matriz, seja ela frágil ou dúctil, se faz necessário o estudo e a análise das propriedades destas fibras.

Um problema encontrado nas fibras vegetais é decorrente de sua estrutura porosa, que causa elevada capacidade de absorção de água e inchamento, possibilitando uma diminuição da aderência na interface fibra/matriz (TOLEDO FILHO, 1997). A região interfacial é de fundamental importância na determinação das propriedades dos compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço. Métodos químicos e físicos podem ser usados para modificar a fibra e otimizar a interface (SILVA, 2003). A tensão de aderência da interface fibra/matriz pode ser melhorada por várias operações:

- Limpeza da superfície dessas fibras eliminando gorduras e camadas de restos de resinas e graxas;
- Reação das fibras com substâncias que proporcionassem às fibras vegetais uma menor capacidade de absorção de água;
- Reação das fibras com substâncias que tornem sua superfície mais protegida do meio externo, propiciando uma maior rugosidade para uma melhora na transferência de tensões;
- Um processo de moldagem que traga a melhor homogeneidade de distribuição das fibras no interior da matriz.

Outro problema encontrado com o uso destas fibras em matrizes cimentícias é relacionado à sua durabilidade ao ser inserida em meios alcalinos. Como alternativas para se evitar a deterioração das fibras vegetais, em consequência da alcalinidade ou da umidade do meio a que estão expostas, existem diversos procedimentos de aplicação viável. Um desses procedimentos é o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por pozolanas as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H (MELO FILHO, 2005).

2.4.1.1. A fibra de Sisal

O nome sisal é oriundo de uma cidade costeira em Yucatán, México, tendo como significado, água fria. O sisal (Figura 3) é uma das fibras vegetais que possui maior resistência à tração e uma das mais indicadas para o uso como reforço em argamassas.



(a)

Figura 3 – (a) Planta de sisal.

(b)

(b) Fibra de sisal.

A exploração do sisal no Brasil concentra-se no Nordeste, geralmente em áreas de pequenos produtores, cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis com escassa ou nenhuma alternativa para a exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. A Bahia e a Paraíba são os principais produtores de sisal. Ali, aproximadamente 1 milhão de pessoas dependem da cultura para a sua sobrevivência. Apesar da importância, a cultura do sisal é explorada com baixo índice de modernização e capitalização, o que tem dado origem, nos últimos anos, a um acentuado declínio, tanto na área plantada quanto na produção. O Brasil exporta cerca de 62% da produção de sisal, em forma de fibras e manufaturados. As exportações brasileiras no ano de 1996 ultrapassaram os 89 milhões de dólares. Dos 38% da produção brasileira, que é consumida internamente, o destaque é dado para as indústrias de pequeno e grande porte, na fabricação de fios, cordoalhas, mantas e tapetes.

Na Tabela 1 são apresentadas propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de sisal obtidas por Toledo Filho (1997).

Tabela 1 - Valores típicos das propriedades das fibras de sisal.

PROPRIEDADES	MÉDIA
Massa Específica (g/cm³)	0,90
Resistência à Tração (MPa)	615,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	18,82
Deformação na ruptura (%)	3,13
Absorção de água até a saturação (%)	220
Diâmetro (mm)	0,19

Fonte: TOLEDO FILHO (1997).

2.5. Reforço de matrizes com fibras naturais

A utilização de fibras vegetais em compósitos reforçados para a construção civil pode ser de grande interesse para os países em desenvolvimento e seria capaz de contribuir para o crescimento de suas infra-estruturas. As fibras vegetais são fibras de baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à tração. Seu emprego como reforço proporciona às matrizes cimentícias maior resistência ao impacto, causada por maior absorção de energia, possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado e um aumento na capacidade de isolamento termo-acústico. Por outro lado, o seu emprego ainda traz consigo algumas dificuldades associadas ao uso em compósitos à base de cimento e, por isso, a necessidade de aperfeiçoamento dessa tecnologia (SILVA, 2002).

A maior parte das pesquisas nos últimos anos sobre o uso de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias foi motivada pela grande quantidade de fibras disponíveis e pelo fato delas possuírem alta resistência mecânica. Combinado com o processo de fabricação simples, o qual permite a produção de compósitos de várias formas, esses tornam-se ideais para a utilização em residências de baixo custo. O papel das fibras naturais na resistência ao impacto, melhorando assim a ductilidade e a absorção de energia, é de considerável importância prática. Entretanto, a durabilidade em longo prazo destas fibras na matriz cimentícia tem ainda que ser estabelecida.

CAPÍTULO 3

3. Material e Métodos

Neste capítulo são apresentadas as descrições dos materiais utilizados na fabricação das matrizes, as dosagens, as técnicas de produção e os procedimentos experimentais dos ensaios realizados. Foram realizados ensaios de compressão simples de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996) para avaliação das propriedades mecânicas. Os ensaios de Análise Térmica Diferencial foram realizados para a verificação do consumo de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia. Apesar de se dispor de alguns poucos resultados de ensaios da fibra de sisal adicionados à matriz cimentícia, eles ainda não serão aqui apresentados por serem resultados preliminares.

Os traços I, II e III utilizados para a moldagem dos corpos-de-prova foram determinados baseados nos estudos feitos por Melo Filho (2005), que avaliou o comportamento mecânico de argamassas produzidas com teores de substituição e também com adição de superplastificante.

3.1. Características dos materiais

3.1.1. Cimento

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de Cimento Portland: CP III-40-RS-BC, por apresentar compatibilidade com o superplastificante GLENIUM 51, e o CP-IV-RS pelo fato de ser o único aglomerante disponível no mercado que não apresentava pozolanas em sua composição original, o que poderia dificultar o entendimento do efeito pozolânico real dos aditivos minerais nas misturas.

3.1.2. Aditivos minerais: metacaulinita e resíduo cerâmico

A metacaulinita utilizada foi fornecida pela empresa METACULIM do Brasil Indústria e Comércio LTDA. O resíduo cerâmico foi fornecido por uma indústria

cerâmica localizada em João Pessoa – PB. Na Tabela 2 é mostrada a caracterização química e física desses aditivos.

Tabela 2 – Propriedades químicas e físicas dos aditivos minerais.

Propriedades químicas e físicas	Metacaulinita	Resíduo cerâmico
SiO ₂ (%)	51,2	63,89
Al ₂ O ₃ (%)	35,30	25,49
Fe ₂ O ₃ (%)	4,00	7,73
CaO (%)	2,62	0,29
K ₂ O (%)	0,97	0,95
TiO ₂ (%)	0,41	-
MgO (%)	0,40	0,4
P ₂ O ₅ (%)	0,20	-
MnO (%)	0,16	-
SO ₃ (%)	0,09	-
Área superficial (m ² /Kg)	22,60	18,98
Densidade (g/cm ³)	2,65	2,65

Fonte: GONÇALVES (2005).

3.1.3. Areia

Foi utilizado areia quartzosa proveniente do leito do rio Paraíba cuja granulometria foi obtida por peneiramento de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987) sendo utilizado apenas a fração passante na peneira de 2 mm.

3.1.4. Superplastificante

É um aditivo que adicionado à matriz cimentícia permite uma melhor trabalhabilidade, com redução do fator água/cimento e moldagem fiel à forma desejável. O superplastificante utilizado foi o Glenium 51, com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado. Na Tabela 3 encontram-se os dados técnicos deste aditivo.

Tabela 3 – Dados técnicos do superplastificante

Item	Glenium 51
Função principal	Superplastificante de 3ª geração
Base química	Cadeia de éter carboxílico modificado
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Bege
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5 %
Viscosidade	95 a 160 cps

Fonte: DINIZ (2005).

3.1.5. Água

A água utilizada em todo o experimento foi proveniente do abastecimento público da cidade de Campina Grande – PB.

3.2. Procedimentos experimentais

3.2.1. Composição das misturas sem adição de superplastificante

Com a finalidade de reduzir a alcalinidade dos compósitos cimentícios sem alterar significativamente suas propriedades mecânicas, substituiu-se 50% do cimento Portland por metacaulinita e resíduo cerâmico nas proporções definidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Teores de substituição do cimento por aditivos minerais

MISTURA	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO
Mistura 0 (M0)	0% de substituição
Mistura I (MI)	20% MK* + 30% RC**
Mistura II (MII)	25% MK + 25% RC
Mistura III (MIII)	30% MK + 20% RC

*MK – Metacaulinita e **RC – Resíduo cerâmico

Para cada uma dessas misturas foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 4) em dois traços diferentes: traço I – 1:1:0,45 (aglomerante: agregado miúdo: fator água/cimento) e traço II – 1:1,5:0,45. Na confecção da argamassa utilizou-se o cimento Portland CP III-40-RS-BC. A mistura sem substituição de cimento Portland (Mistura 0) foi confeccionada para comparação dos resultados.

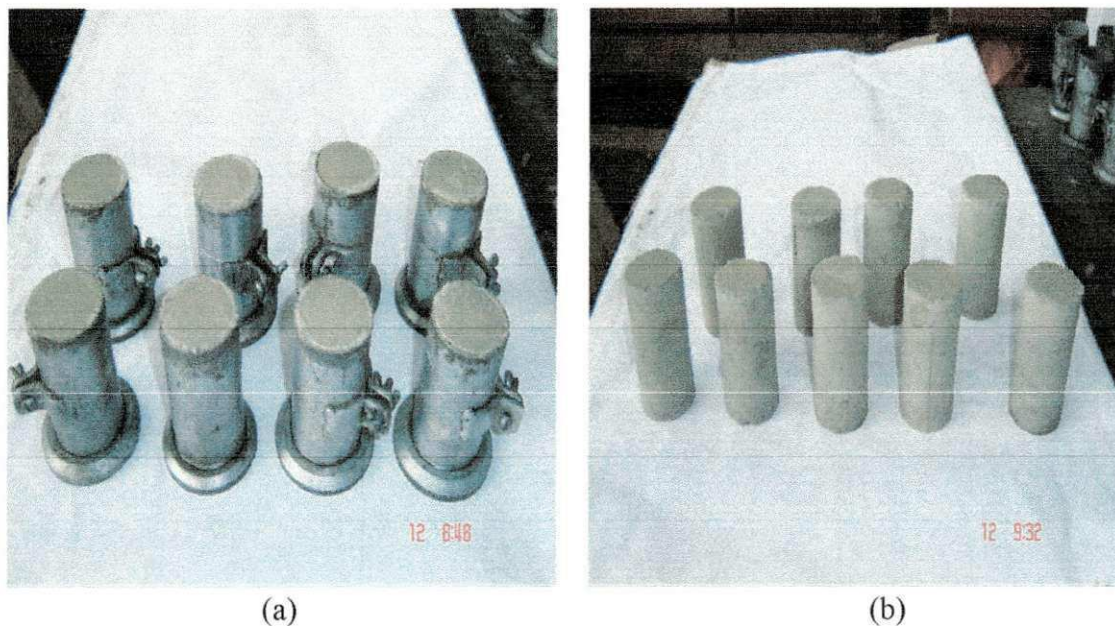


Figura 4 – (a) Corpos-de-prova no molde

(b) Corpos-de-prova desmoldados.

Os corpos-de-prova permaneceram na cura submersa em água até as idades de 14 e 28 dias donde, então, foram rompidos para determinação de sua resistência à compressão simples.

3.2.2. Composição das misturas com adição de superplastificante

As misturas com adição de superplastificante são compostas apenas por cimento, agregado miúdo e água. As proporções de adição de superplastificante foram 0,25 % e 0,5 % com relação à quantidade de cimento. Dessa maneira, foram definidas as misturas que estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Teores de adição de superplastificante

Mistura	Teor de adição de superplastificante
Mistura I SP*	0,25%
Mistura II SP	0,50%

*Superplastificante

Na confecção da argamassa utilizou-se o cimento Portland CP-III-40-RS-BC. Para cada uma das misturas foram moldados dez corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura no traço 1:2:0,45 (traço III). Os corpos-de-prova permaneceram na cura submersa em água e foram submetidos ao ensaio de compressão simples (figura 5) nas idades de 7, 14 e 28 dias.

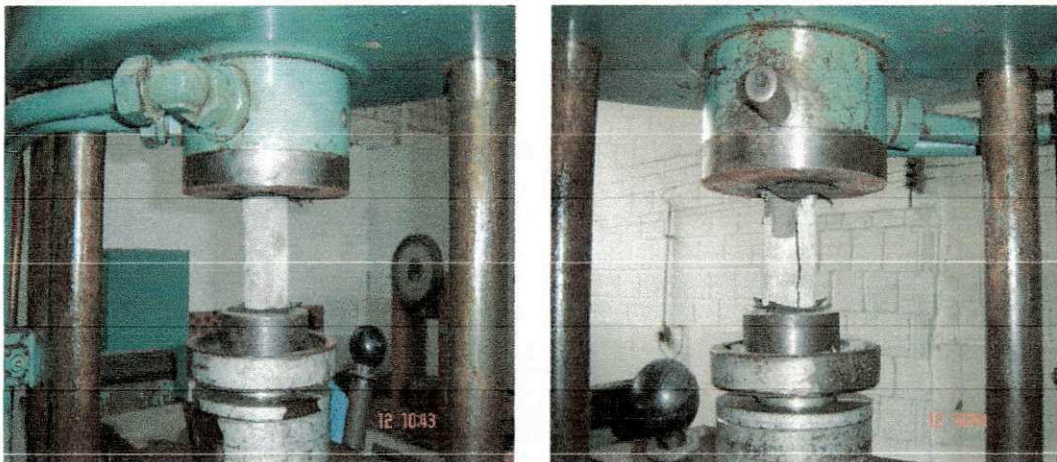


Figura 5 – Ensaio de compressão simples.

3.2.3. Análise Térmica Diferencial

A análise térmica diferencial (ATD) consiste na medida da diferença de temperatura que pode existir entre uma substância (amostra) e outra substância, de referência inerte, quando ambos os materiais ao mesmo tempo sofrem um aquecimento ou resfriamento controlado. A medida da diferença de temperatura realiza-se com a ajuda de três termopares, dois deles colocados em contato com os suportes onde se encontram as substâncias e um terceiro termopar permite a medida da temperatura do sistema (forno), como mostra a Figura 6. Através deste método é possível detectar uma multiplicidade de transformações que implicam em reações energéticas, estas podem ser devido a fenômenos físicos ou químicos. E as reações podem ainda ser endotérmicas

(absorção de calor) ou exotérmicas (liberação de calor). Para se ter um resultado destes ensaios, deve ser controlado diversos fatores, tais como: equipamento de medida, a natureza e preparação das amostras, velocidade de aquecimento, a atmosfera que circunda a amostra, etc.

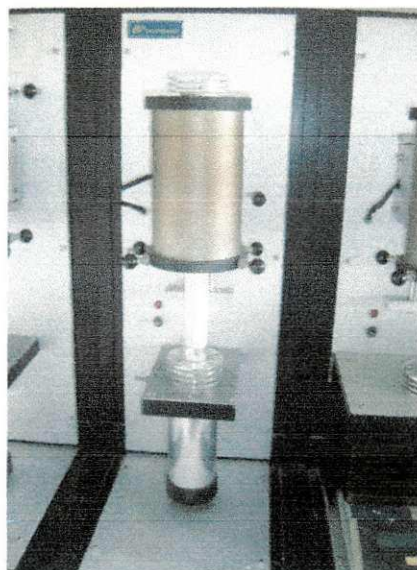


Figura 6 – Equipamento no qual se realiza o ensaio de ATD.

O ensaio de análise térmica diferencial (ATD) foi realizado nas pastas das misturas definidas na Tabela 6, a fim de se verificar o consumo de hidróxido de cálcio para as substituições feitas ao cimento Portland na matriz cimentícia.

Tabela 6 – Composição das misturas submetidas ao ensaio de ATD.

MISTURAS	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO
Mistura 0a	0% de substituição
Mistura Ia	50 % de Metacaulinita
Mistura IIa	50 % de Resíduo cerâmico
Mistura IIIa	20% Metacaulinita + 30% Resíduo cerâmico
Mistura IVa	25% Metacaulinita + 25% Resíduo cerâmico
Mistura Va	30% Metacaulinita + 20% Resíduo cerâmico

Para essas misturas foram moldados pequenos corpos de prova cilíndricos. Utilizaram-se o cimento Portland CP III-40-RS e fator água cimento 0,4. Aos 28 dias de cura, submersa em água, os corpos de prova foram triturados e passados na peneira 200. Em seguida, as misturas foram submetidas ao ensaio de ATD.

CAPÍTULO 4

4. Resultados e Discussão

4.1. Ensaio de compressão simples

4.1.1. Misturas sem adição de superplastificante

Nas Figuras 7 e 8 encontram-se organizados os resultados dos ensaios de compressão simples para os traços I e II em função da idade de ruptura dos corpos-de-prova, respectivamente.

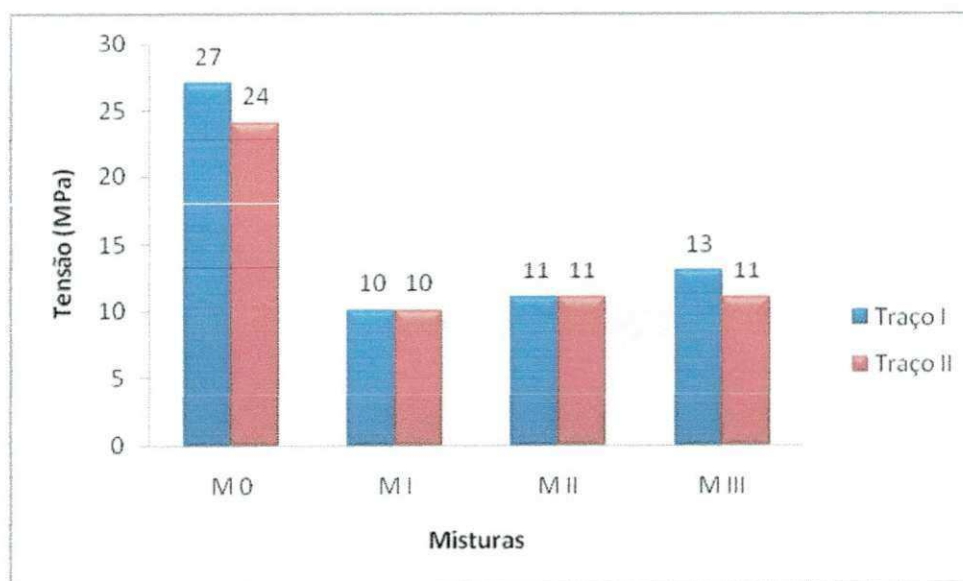


Figura 7 – Valores de resistência dos corpos-de-prova aos 14 dias de idade.

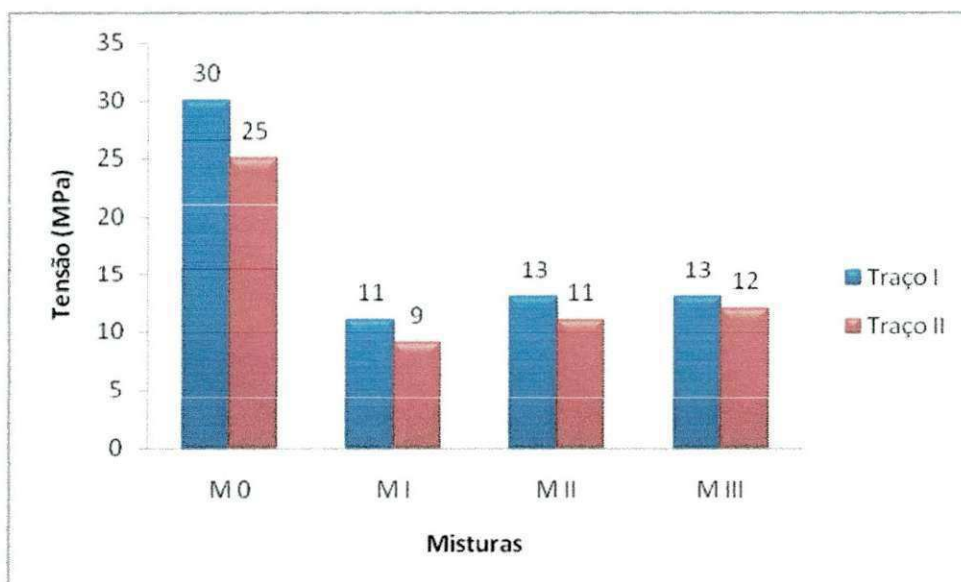


Figura 8 – Valores de resistência dos corpos-de-prova aos 28 dias de idade.

Os resultados apresentam semelhanças entre si pelo fato dos traços usados não diferirem muito um do outro. Tanto na figura 7 quanto na figura 8, os maiores valores foram obtidos para a Mistura 0 que possui 100% de cimento Portland. Quanto aos traços estudados, observam-se os maiores valores para o Traço I nas idades de 14 e 28 dias, isso em razão da maior concentração de aglomerante (cimento) em função da quantidade de agregado (areia) utilizado.

O principal mecanismo pelo qual a pozolana contribui para a resistência à compressão da matriz cimentícia é a reação pozolânica. Cada massa unitária de cimento libera, durante a hidratação, certa massa de hidróxido de cálcio que por sua vez pode ser convertida em uma quantidade de silicato de cálcio hidratado adicional quando combinado com a sílica disponível na pozolana e água. Segundo os estudos desenvolvidos por Gonçalves (2005), a metacaulinita possui um índice de atividade pozolânica superior ao resíduo cerâmico. Assim, este fato é comprovado analisando-se os resultados obtidos quanto à substituição ao cimento, onde nota-se que as misturas que continham maior concentração de metacaulinita foram as que apresentaram maiores valores de resistência à compressão.

Porém sabe-se que só é permitida por norma uma queda de no máximo 10% dos valores de resistência de misturas com teores de substituição comparados a misturas sem substituição, percebe-se que os valores apresentados não são satisfatórios.

Resultados obtidos por Gonçalves (2005) mostram que a adição de resíduo cerâmico e metacaulinita em proporções superiores a 30% causam uma significativa queda na resistência. Este fato é atribuído a redução da concentração de cimento na mistura, havendo uma indisponibilidade de hidróxido de cálcio para a formação de novos hidratos. Assim a metacaulinita e o resíduo cerâmico estão atuando como filler. Dessa forma, os melhores teores de substituição do cimento por aditivos minerais variam entre 20 e 30%.

4.1.2. Misturas com adição de superplastificante

Os resultados obtidos através dos ensaios de compressão simples dos corpos-de-prova foram agrupados na Figura 9, onde se observa que os maiores resultados foram obtidos para a Mistura I SP, que possui 0,25 % de superplastificante.

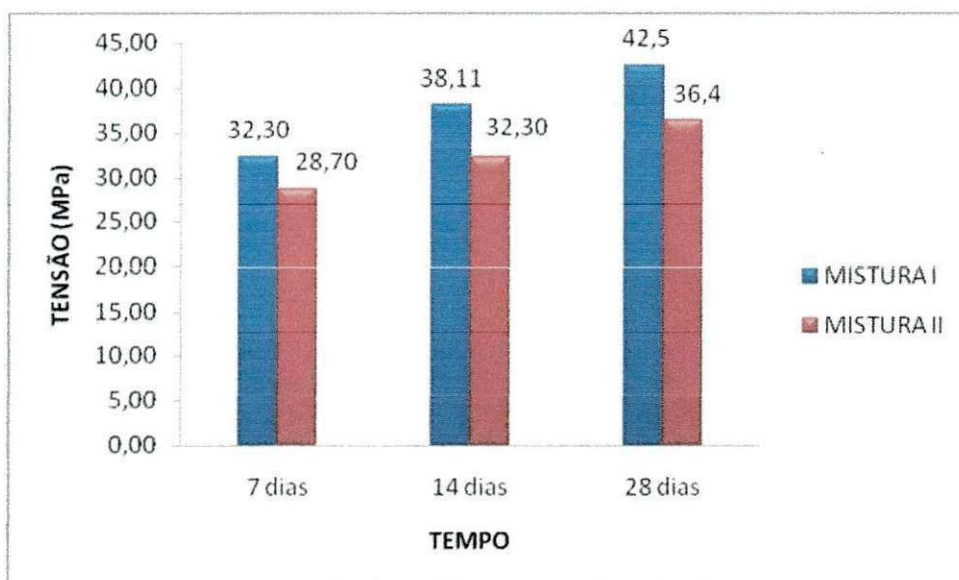
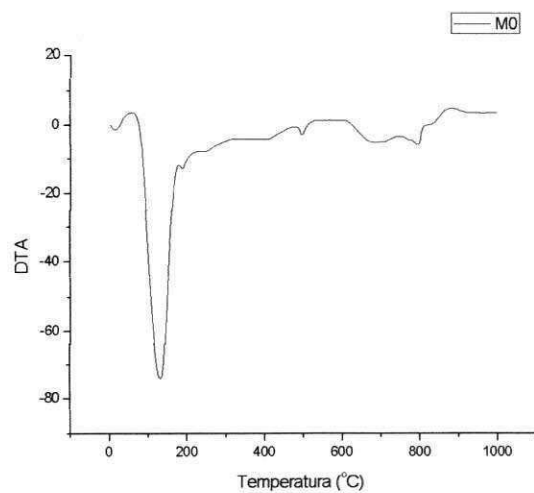


Figura 9 – Valores de resistência dos corpos-de-prova com adição de superplastificante.

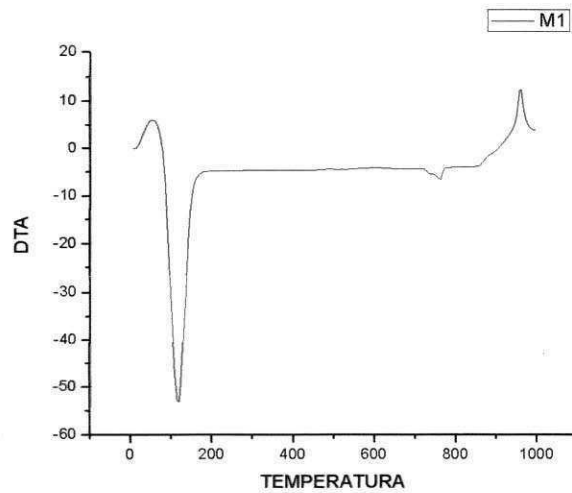
Diante dos resultados obtidos, pode-se dizer que provavelmente um teor de adição superior a 0,5 % estaria ultrapassando o ponto de saturação da mistura. Tal ponto de saturação limita a quantidade de superplastificante, ou seja, teores acima dele não trariam mais nenhum benefício para a matriz cimentícia. O superplastificante incrementa o valor da resistência por reduzir o fator água/cimento.

4.1.3. Ensaio de análise térmica diferencial

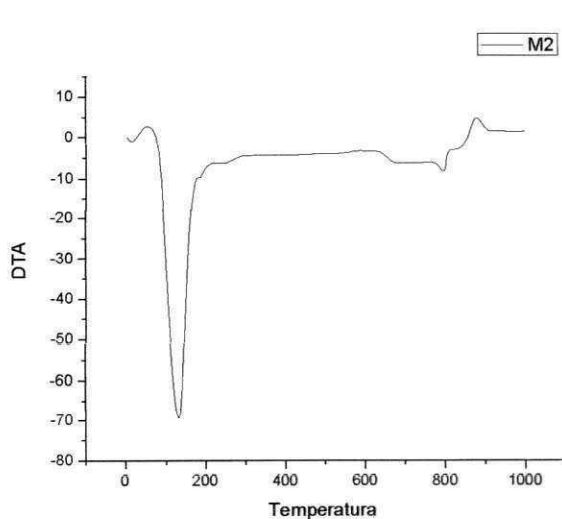
Na Figura 10 estão representados os termogramas obtidos no ensaio de análise térmica diferencial. Na Figura 10a, que corresponde à mistura com 0% de substituição, pode-se observar a formação de um pequeno pico voltado para baixo entre as temperaturas de 400 °C e 600 °C indicando a formação de hidróxido de cálcio, que ocorre entre esses valores de temperatura. Já se observando as Figuras 10b, 10c, 10d, 10e e 10f (correspondente as misturas com 50% de substituição ao cimento), percebe-se que não houve a formação deste pico acentuado. Assim, pode-se dizer que provavelmente ocorreram reações pozolânicas provocadas pelos aditivos minerais. Tais reações consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Dessa maneira obtém-se uma matriz com baixo teor de OH ou de baixa alcalinidade.



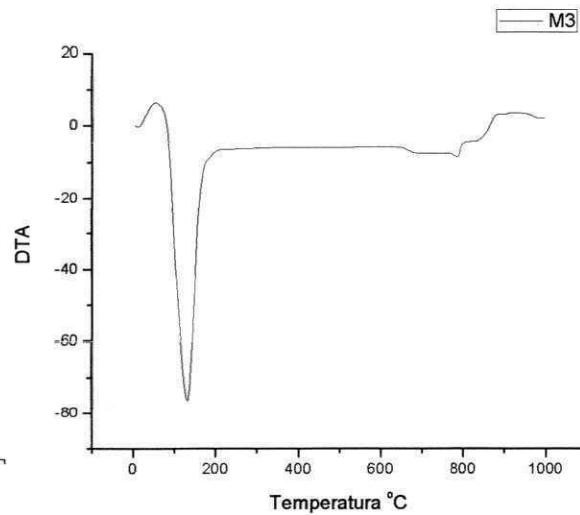
(a)



(b)



(c)



(d)

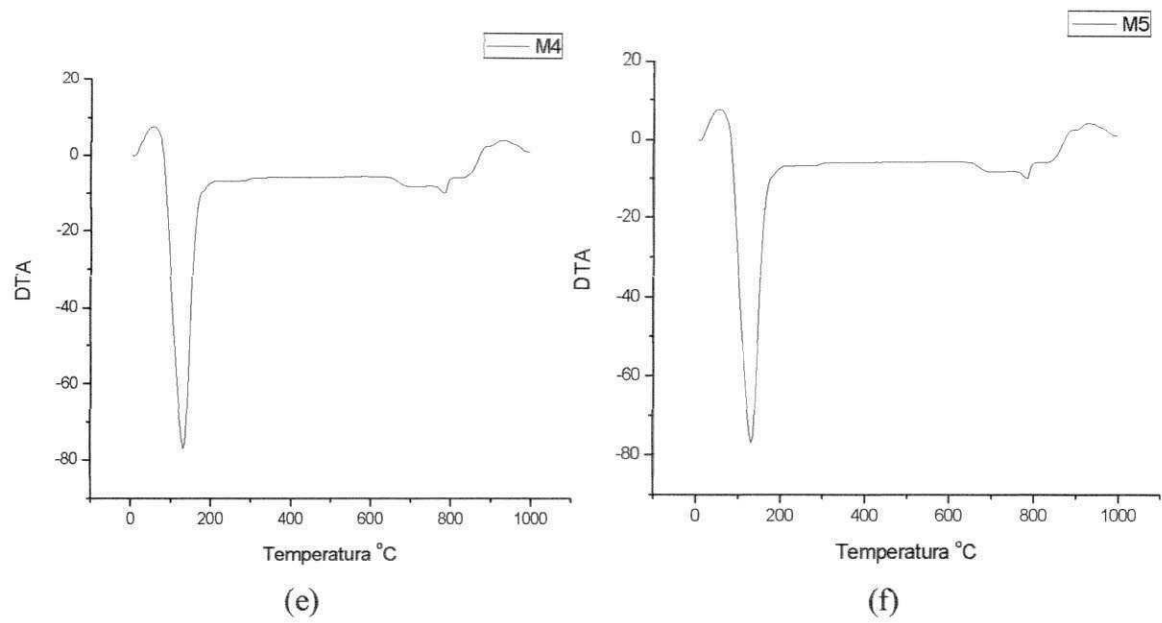


Figura 10 – Análise térmica diferencial: (a) Mistura 0a, (b) Mistura Ia, (c) Mistura IIa, (d) Mistura IIIa, (e) Mistura IVa, (f) Mistura Va.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões

Os ensaios de análise térmica diferencial nas pastas das misturas mostraram que a utilização de aditivos minerais (metacaulinita e resíduo cerâmico) como substituição parcial do cimento Portland em teores de 50% foram eficientes para o consumo do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia.

Porém, ao analisar as propriedades mecânicas nos teores de substituição utilizados através dos ensaios de compressão simples, percebe-se que os valores da resistência estão muito abaixo dos obtidos para a mistura com 0 % de substituição. Isto pode ter ocorrido provavelmente devido às condições em que estavam armazenados os materiais utilizados na confecção das argamassas, falhas na moldagem dos corpos de prova ou até erros durante a execução do ensaio de compressão simples. Tendo em vista que por norma, para adição de pozolanas na matriz cimentícia, é permitida apenas uma queda de no máximo 10 % nos valores de resistência à compressão, pode-se dizer que os resultados obtidos neste ensaio não foram satisfatórios. Porém, confirmaram pelos valores encontrados para a mistura III (30% de metacaulinita e 20% de resíduo cerâmico), que maiores concentrações de metacaulinita são responsáveis por um maior valor da resistência quando se substitui parte do cimento.

Analisando os valores obtidos também no ensaio de compressão simples das misturas com superplastificante, percebe-se que a adição deste aditivo além de melhorar a trabalhabilidade da argamassa, proporciona um aumento significativo na resistência se utilizado em proporções adequadas.

Com os resultados obtidos até o presente momento e tendo em vista a continuidade desta pesquisa, que é a criação de um compósito a partir da junção da matriz cimentícia com a fibra do sisal, espera-se que a utilização de aditivos minerais como substitutivos parciais do cimento portland apresente-se como uma possível solução para obtenção de uma matriz à base de cimento com baixo teor alcalino mais adequada ao uso de fibras vegetais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 - Materiais Pozolânicos – Especificação, 1992.

ANJOS, M A. S. **Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, pp.346-349, 2003.

COSTA, C. E. S. **Imobilização do Resíduo da Fabricação do Sulfato de Alumínio em Matrizes Cerâmicas Parte 1: Comportamento Mecânico.** NOCMAT, Novembro, 2004.

DINIZ, F. E. G. **Utilização de resíduo cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios auto-adensáveis.** Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, 2005.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial.** Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento de materiais utilizando argila calcinada como substitutivo parcial do cimento portland.** Seminário de Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

LEAL, A. F. **Utilização de resíduos das indústrias de cerâmicas e de calçados na elaboração de materiais e produtos á base de cimento Portland reforçados com fibras de sisal.** Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, 2004.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal.** Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 2004.

MELO FILHO, J. de A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados Cimentíceos Reforçados com Fibras Longas de Sisal.** Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA C. S., **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação de mestrado.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** Ciência e Engenharia de Materiais/USP, São Carlos, 2003.

TOLÊDO FILHO, R. D. **Natural fibre reinforced mortar composites: experimental characterisation, 1997.** Tese de Doutorado em Engenharia - DECPUC-Rio / DEC Imperial College, Rio de Janeiro, 1997.