CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



Dissertação de Mestrado

Myrtes Amaral da Silva

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE PAPEL DE EMBALAGENS DE CIMENTO.

Belo Horizonte

2013

Myrtes Amaral da Silva

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE PAPEL DE EMBALAGENS DE CIMENTO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Reciclagem de Materiais

Orientador: Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior

Co-Orientador: Dr. Weber Guadagnin Moravia

Belo Horizonte, 30 de janeiro de 2013.

S586 Silva, Myrtes Amaral da.
Obtenção e caracterização de compósitos cimentícios reforçados com fibras de papel de embalagens de cimento / Myrtes Amaral da Silva. - 2013.
108 f. : il., tabs., grafs., fotos. -
Orientador: Ezequiel de Souza Costa Junior.
Co-orientador: Weber Guadagnin Moravia.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013.
Bibliografia.
1. Cimento reforçado com fibras. 2. Adições no concreto. 3. Materiais compósitos de fibras. 4. Papel Kraft. I. Costa Junior, Ezequiel de Souza. II. Moravia, Weber Guadagnin. III. Título.
CDD: 620.11

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE EMBALAGENS DE CIMENTO.

Dissertação apresentada em 30 de janeiro de 2013 por Myrtes Amaral da Silva, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, aprovada pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior - Orientador

Doutorado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica - Área de concentração Biomateriais (UFMG). Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas com ênfase em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG. Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG

Prof. Dr. Joel Lima

Doutorado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG

Belo Horizonte, 30 de janeiro de 2013.

Ao meu orientador, Professor Doutor Ezequiel de Souza Costa Júnior,
por me ensinar que "*Deus sempre quer, o resto é comigo*".

A Antônio Augusto Silva e Conceição Menezes – avós paternos *(in memorian)*
Antônio Augusto Amaral e Hilda Oliveira Pinto – avós maternos (*in memorian*)
Moacir Menezes da Silva e Nilza Amaral Silva **–** pais (*in memorian*)
Mônica Amaral Silva – irmã (*in memorian*)
Stephania Amaral Silva Belo – filha
Ao melhor amigo, Marcílio Antônio Leite Lopes,
meu carinho eterno pela Alegria, participação constante
e apoio incondicional principalmente nas horas mais difíceis.

RESUMO

Produziu-se e se caracterizou compósitos de matriz cimentícia com adição de emulsão à base de poli(acetato de vinila) e fibras de papel *kraft* de embalagens de cimento, resíduo sólido cujo reaproveitamento é importante do ponto de vista socioeconômico e em relação à preservação ambiental, devido seu descarte em grandes volumes. A adição polimérica tem com o objetivo aumentar a compatibilidade entre a matriz de cimento e agregados. Os traços para os compósitos de referência constituem-se de dois percentuais em massa de cimento/areia, respectivamente 79-21 (BR1) e 77-23 (BR2). Os percentuais de cimento nos compósitos modificados foram, respectivamente, 76% e 68%. Caracterizou-se papéis e emulsão através de ensaios termogravimétricos (TGA). A degradação completa das amostras de embalagens de reensaque e descartadas ocorreu respectivamente aos 500° C e 600° C. Na emulsão à base de PVAc, ocorreram três etapas de perda significativa de massa, com a oxidação a 510° C. Foram praticamente inexistentes sinais diferenciados no perfil espectral entre as amostras dos papéis, característica consideradas relevante, pois demonstra que o papel descartado não perde características de resistência mecânica quando comparado aos papéis limpos. Os resultados de tenacidade variaram significativamente. No Grupo 2 (menor percentual de cimento) os compósitos de referência (BR2) apresentaram maior variabilidade que a ocorrida entre aqueles com acréscimo de fibras (KF2/RE2/DES2). Compósitos com fibras foram avaliados em relação às suas propriedades termofísicas pelo Método *Flash Laser* e pelo método geométrico. Os valores obtidos foram comparados a amostras padrão de Pirocerâmico 9606 (Netzsch) e de compósitos sem adições. Ensaios de difusividade identificaram um aumentou na capacidade de isolamento das placas de 55,3% para adições de 4% de fibras, em relação ao compósito de referência. Para acréscimos fibrosos de 12%, obteve-se metade da difusividade térmica em relação aos compósitos de referência e um quarto dos valores relativos ao Pirocerâmico 9606. O calor específico dos compósitos também apresentou variabilidade proporcional às adições. O uso de fibras celulósicas pode melhorar características térmicas e mecânicas de compósitos cimentícios de uso não estrutural.

Palavras-chave: papel *Kraft*; embalagens de cimento; PVAc; compósitos.

ABSTRAT

Was produced and characterized cementitious matrix composites with the addition of emulsion-based poly (vinyl acetate) and fibers of kraft paper packaging cement, solid residue whose reuse is important from the standpoint of socioeconomic and for environmental preservation due disposal at high volumes. The addition polymer is aiming to increase the compatibility between the cement matrix and aggregates. The traces for composites reference constitute two weight percentage of cement / sand, 79-21 respectively (BR1) and 77-23 (BR2). The percentages in cement composites were modified, respectively, 76% and 68%. Characterized by paper and emulsion tests thermogravimetric (TGA). The complete degradation of the samples packaging reensaque and disposed respectively occurred at 500° C and 600° C. On the basis of PVAc emulsion occurred three steps significant loss of weight through oxidation at 510° C. Were virtually absent in the differentiated signal spectral profile between samples of papers, feature considered important because it demonstrates that the waste paper will not lose mechanical strength characteristics when compared to paper clean. The results varied significantly toughness. In Group 2 (lower percentual cement) composites reference (BR2) showed greater variability that occurred among those with added fiber (KF2/RE2/DES2). Composite fibers were evaluated for their thermophysical properties by laser flash method and the geometrical method. The values obtained were compared with standard samples of Pirocerâmico 9606 (Netzsch) and composites without additions. Assays identified a diffusivity increased in insulating ability of the plates to 55.3% additions of 4% fiber in relation to the composite reference. For fibrous additions of 12% was obtained half the thermal diffusivity compared to composites and fourth reference values on the Pirocerâmico 9606. The specific heat of composites also showed variability proportional additions. The use of cellulosic fibers can improve thermal and mechanical characteristics of cementitious composites nonstructural use.

Keywords: Kraft paper, packaging of cement; PVAc; composites.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Dimensão das partículas de cimento, a partir da análise de resultados fornecida pelo fabricante (HOLCIM BRASIL) 41
Gráfico 5.1 – Espectros de absorção de infravermelho da areia fina lavada 52
Gráfico 5.2 – Espectros de absorção de infravermelho do filme polimérico 53
Gráfico 5.3 – Espectros de absorção de infravermelho do papel kraft 54
Gráfico 5.4 – Espectros de absorção de infravermelho de embalagens 55
Gráfico 5.5 – Espectros de absorção de infravermelho do Cimento *Portland* CP-V ARI 56
Gráfico 5.6 – Difratograma de raios-X da areia 56
Gráfico 5.7 – Padrão de difração do quartzo 57
Gráfico 5.8 – Difratograma de raios-x do Cimento *Portland* CP-V ARI 57
Gráfico 5.9 – Difratograma de raios-x do filme polimérico 58
Gráfico 5.10 – Difratograma de compósito de referência (BR1) 59
Gráfico 5.11 – Difratograma de amostra de compósito DES1 60
Gráfico 5.12 – Difratograma de amostra de compósito BR2 60
Gráfico 5.13 – Difratograma de amostra de compósito DES2 61
Gráfico 5.14 – TGA da areia 68
Gráfico 5.15 – TGA do filme polimérico 69
Gráfico 5.16 – TGA do cimento *Portland* 70
Gráfico 5.17 – TGA de embalagem de reensaque 70
Gráfico 5.18 – TGA das embalagens descartadas - partes interna e externa 71
Gráfico 5.19 – Difusividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2) 73
Gráfico 5.20 – Condutividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2) 74
Gráfico 5.21 – Calor Específico dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2) 75
Gráfico 5.22 – Densidade dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2) 76
Gráfico 5.23 – Compósitos do Grupo 1 - Tensão Máxima (MPa) 80
Gráfico 5.24 – Compósitos do Grupo 2 - Tensão Máxima (MPa) 81
Gráfico 5.25 – Resultados de MOE (em GPa) Grupo 1 84
Gráfico 5.26 – Resultados de MOE (em GPa) Grupo 2 84
Gráfico 5.27 – Tenacidade para Grupo 1 86
Gráfico 5.28 – Tenacidade para Grupo 2 86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fibrilas da celulose 29

Figura 3.2 – Estrutura da celulose 30

Figura 3.3 – Estrutura química dos polímeros PVAc/PVA 33

Figura 3.4 – Processo de hidrólise do PVAc 33

Figura 3.5 – Fonte do *laser* acionada 38

Figura 4.6 – Fluxograma do procedimento experimental 40

Figura 4.7 – Variáveis avaliadas no estudo dos compósitos com adição de fibras 42

Figura 4.8 – Classificação para nomenclatura das amostras 43

Figura 4.9 – Tela, moldes e CPs 45

Figura 4.10 – Moldagem dos compósitos com acréscimo de fibras 46

Figura 4.11 – Amostras dos Compósitos 46

Figura 4.12 – Placas de compósito para retirada dos CPs utilizados nos ensaios 49

Figura 5.13 – M.O. da folha interna de embalagem descartada 62

Figura 5.14 – (a) Aparência superficial homogênea com aparecimento de bolhas em CP do compósito RE1 62

Figura 5.15 - Variabilidade dimensional das fibras 63

Figura 5.16 – M.E.V. do filme polimérico a base de PVAc 64

Figura 5.17 – M.E.V. de papel *kraft* e embalagem descartada de cimento em aumentos de 200 vezes 64

Figura 5.18 – Bolhas superficiais no compósito RE1 e variabilidade dimensional das fibras celulósicas. 65

Figura 5.19 – Fotomicrografias de região fraturada do compósito RE2 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Traços do consumo dos materiais para amostras de 300(g) 43
Tabela 4.2 – Proporções dos materiais (em gramas) para amostras do GRUPO 1 44
Tabela 4.3 – Proporções dos materiais (em gramas) para amostras do GRUPO 2 44
Tabela 4.4 – Equipamentos utilizados no preparo das amostras 44
Tabela 5.5 – Modos de vibração e picos correspondentes para PVA e PVAc 53
Tabela 5.6 – pH da emulsão polimérica e de águas drenadas no preparo de polpas 67
Tabela 5.7 – Difusividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2) 73
Tabela 5.8 – Dados do Pirocerâmico 9606 para comparação com os compósitos 76
Tabela 5.9 – Resultados de tensão máxima do Grupo 1 80
Tabela 5.10 – Resultados de tensão máxima do Grupo 2 81
Tabela 5.11 – Resultados de Módulo Elástico do Grupo 1 84
Tabela 5.12 – Resultados de Módulo Elástico do Grupo 2 84
Tabela 5.13 – Resultados de Tenacidade do Grupo 1 86
Tabela 5.14 – Resultados de Tenacidade do Grupo 2 86
Tabela 5.15 - Resultados de tensão máxima do Grupo 1 88
Tabela 5.16 - Resultados de Módulo Elástico do Grupo 1 89
Tabela 5.17 - Resultados de Tenacidade do Grupo 1 89
Tabela 5.18 - Resultados de tensão máxima do Grupo 2 89
Tabela 5.19 - Resultados de Módulo Elástico do Grupo 2 90
Tabela 5.20 - Resultados de Tenacidade do Grupo 2 90

ANEXOS

Gráfico 1 – Certificado de Análise Cimento *Portland* CP V - ARI 104

Tabela 1 – Métodos de Ensaio do Cimento Portland CP V-ARI 105

Tabela 2 – Especificações do fabricante para a emulsão polimérica utilizada para o preparo dos compósitos com adição fibrosa 106

APÊNDICES

Gráfico 1 - Difração de raios-X de CPs de referência (BR1/BR2) e com fibras (DES1/DES2) 107

Gráfico 2 - Difração de raios-X de CPs com fibras (KF1, KF2, RE1 e RE2). 108

Tabela 1 - Resultados do Ensaio de flexão simples (Três pontos) 109

Gráfico 3 - Compósitos do Grupo 1 em flexão 110

Gráfico 4 - Compósitos do Grupo 2 em flexão 111

LISTA DE ABREVIATURAS

Å – O ângström (Å) (1 Å = 10^{-10}m). É a unidade de medida comumente utilizada para lidar com grandezas da ordem do átomo ou dos espaçamentos entre dois planos cristalinos.

ABCP **–** Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT **–** Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c **–** Razão de água/cimento no traço do concreto

ANOVA **–** The one-way analysis of variance **–** Teste de Comparações Múltiplas

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CNTP – Condições normais de temperatura e pressão

CPs – Corpos de prova

EMIC – Máquina universal de ensaios mecânicos destrutivos

Eva – Poli(etileno-co-acetato de vinila)

FTIR – Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

GH – Grau de hidrólise

g/L – Grama por Litro

GPa – Gigapascal

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

M.E.V. – Microscopia Eletrônica de Varredura

mesh – Padrão americano para peneiras de classificação de materiais granulados

MMA – Ministério do Meio Ambiente

M.O. – Microscopia Óptica

MPa – Megapascal

μm **–** micrometro (1×10^{-6} m)

NBR **–** Norma Brasileira

NIR **–** Espectroscopia no Infravermelho Próximo

nm – Nanômetro (1×10^{-9} m);.

p/c **–** Razão de polímero/cimento na formulação do concreto

pH **–** Potencial hidrogênio iônico

PLS – *Partial Least Squares* (Mínimos quadrados parciais)

PVA – Poli(álcool vinílico)

PVAc – Poli(acetato de vinila)

SE – Detector de elétrons secundários (MEV)

TAPPI – *Tecnical Association of the Pulp and Paper Industry* (Associação Técnica da Indústria de Papel e Celulose)

TGA – Análise por termogravimetria

XRD – Difração de raios-X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **16**

1.1 RELEVÂNCIA **18**

2 OBJETIVOS **19**

2.1 OBJETIVO GERAL **19**

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS **19**

3 REVISÃO DA LITERATURA **20**

3.1 O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PARA A GERAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS **20**

3.2 COMPÓSITOS **24**

3.2.2 A influência das cargas nos compósitos **25**

3.3 O USO DE POLÍMEROS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS **26**

3.4 A SELEÇÃO DE MATERIAIS **27**

3.4.1 Embalagens de papel *kraft* **27**

3.4.2 Água **30**

3.4.3 Areia fina **31**

3.4.4 Cimento *Portland* **31**

3.4.5 Polímeros **32**

3.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO **34**

3.5.1 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) **34**

3.5.2 Difração de Raios-X (XRD) **35**

3.5.3 Potencial hidrogênio iônico (pH) **35**

3.5.4 Análise termogravimétrica (TGA) **35**

3.5.5 Microscopia óptica (M.O.) **36**

3.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) **36**

3.5.7 Propriedades termofísicas (difusividades térmica, condutividade térmica e calor específico pelo Método *Flash Laser* e medida da densidade pelo método geométrico) **37**

3.5.8 Flexão simples (Três pontos) **39**

4 METODOLOGIA **40**

4.1 FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL **40**

4.2 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS **40**

4.3 MÉTODOS **42**

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DEPROVA **47**

4.4.1 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) **47**

4.4.2 Difração de Raios-X (XRD) **47**

4.4.3 Microscopia óptica (M.O.) **48**

4.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) **48**

4.4.5 Potencial hidrogênio iônico da água e papéis (pH) **48**

4.4.6 Termogravimetria (TGA) **49**

4.4.7 Difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico (Método *Flash Laser*) e densidade (Método Geométrico) **49**

4.4.8 Flexão simples (Três pontos) **51**

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES **52**

5.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER **52**

5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (XRD) **56**

5.2.1 Comparativo entre os resultados difratoméricos dos compósitos de referência e descartados **59**

5.3 MICROSCOPIA ÓPTICA (M.O.) **62**

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (M.E.V.) **63**

5.4.1 ASPECTOS SUPERFICIAIS COMPÓSITOS BR1 e DES1 **65**

5.5 POTENCIAL HIDROGÊNIO IÔNICO (pH) **67**

5.6 TERMOGRAVIMETRIA (TGA) **68**

5.7 DIFUSIVIDADE TÉRMICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO (MÉTODO *FLASH LASER)* e DENSIDADE (MÉTODO GEOMÉTRICO) **72**

5.8 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO SIMPLES **77**

5.8.1 Comportamentos dos compósitos em flexão **77**

5.8.2 Módulo de ruptura – Tensão máxima (MPa) **79**

5.8.3 Módulo elástico – E (MOE) **83**

5.8.4 Tenacidade (J/m^3) **85**

5.8.5 Análise estatística **88**

CONCLUSÕES **91**
REFERÊNCIAS **96**
ANEXOS **103**
GLOSSÁRIO **106**
APÊNDICE **107**

1 INTRODUÇÃO

Em várias partes do mundo, estudos sobre ciclo de vida de produtos ligados ao setor da construção civil têm buscado formas de retirar, entre outros rejeitos, o maior volume possível de embalagens de cimento descartadas em aterros ou lixões. O reaproveitamento desse material vem se tornando importante sob a ótica socioeconômica e ambiental, por seu descarte ocorrer em grandes volumes. Neste trabalho, foram produzidos e caracterizados compósitos de matriz cimentícia com adição de fibras de papel *kraft* oriundas das embalagens de cimento e emulsão à base de poli(acetato de vinila), também denominado PVAc, nos traços investigados.

O elevado crescimento dos resíduos sólidos (industriais, urbanos e da área da saúde) está relacionado ao aumento no consumo de materiais de difícil degradação, potencialmente agressivos ao homem e ao ambiente (MORAES et al.,1994).

A construção civil, em seu processo produtivo e de manutenção, é um dos maiores geradores de resíduos na atualidade. As técnicas construtivas convencionais, em suas várias etapas, produzem um percentual de perdas elevado e, ainda hoje, muito pouco desses materiais é aproveitado na própria obra ou transformado em insumos para outros setores. Os produtos desse segmento disponibilizados no comércio não levam em conta seu ciclo de vida ou procedimentos técnicos que incrementem sua reciclagem. Alguns desses produtos são impactantes ao meio ambiente devido às características químicas e físicas de seus compostos, constituídos por uma variedade de materiais de concentrações distintas de matérias-primas diversas (CHAHUD et al., 2007).

Os grandes volumes de resíduos e seus impactos negativos evidentes levaram à criação do conceito *Green Building* (design ecológico ou ecodesign), tendência mundial nos campos da arquitetura, engenharia e design, com o objetivo de desenvolver produtos, sistemas e serviços que reduzam o uso de recursos não renováveis ou minimizem impactos ambientais (SILVA et al., 2009).

A lei que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), foi sancionada em agosto de 2010, tornou-se o marco legal que define princípios e diretrizes para a gestão de resíduos sólidos urbanos, hospitalares e industriais. Uma vez que a inovação constante de processos que considerem a reutilização de

resíduos é imprescindível para o desenvolvimento sustentável (CHAHUD et al., 2007).

Na etapa de produção dos corpos de prova (CPs), foram utilizados traços sem fibras e com fibras das sacarias de cimentos juntamente com o PVAc. A seguir foram feitas caracterizações físico-químicas dos papéis e emulsão polimérica, bem com dos CPs. Ambos foram avaliados por termogravimetria (TGA), difração de raios-X (XRD), microscopia óptica (M.O.), microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) e espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR).

A degradação completa das amostras de embalagens de reensaque e descartadas ocorreu respectivamente aos 500° C e 600° C. A análise do filme polimérico mostrou que ocorreram três etapas de perdas significativas de massa, com oxidação a 510° C. Os compósitos foram analisados por TGA, FTIR e XRD, além de observações em lupas estereoscópicas, M.O. e M.E.V.. Ensaios mecânicos de flexão (3 pontos), além de levantamento experimental quanto ao comportamento termofísico (calor específico, difusividade e condutividade térmica) pelo Método *Flash Laser* e densidade (método geométrico) foram realizados.

Os compósitos de referência (BR1 e BR2) apresentaram valores de condutividade térmica dentro dos padrões para os concretos com agregados de quartzo. Para aqueles com percentual de adição de 4% de fibras, obteve-se uma condutividade térmica aproximada de 1.1 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Os ensaios de difusividade identificaram um aumento na capacidade de isolamento das placas. Para acréscimos fibrosos de 12%, obteve-se metade da difusividade térmica em relação aos compósitos de referência.

O calor específico dos compósitos apresentou variabilidade proporcional às adições.

1.1 RELEVÂNCIA

O uso de fibras das embalagens de cimento pode melhorar características térmicas e mecânicas de placas de compósitos cimentícios de uso não estrutural em paredes de vedação e outros projetos construtivos.

Segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), a construção civil é a atividade econômica de maior consumo de recursos naturais do planeta, responsável por cerca de 1/3 do uso total de energia, 20% da água potável consumida pela sociedade, além de ser um dos principais responsáveis pelo aumento das emissões de CO_2, e pela geração de cerca de 30% do volume de resíduos depositados em aterros. Estima-se que o setor vem aumentando o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos, nos últimos 20 anos, a um crescimento médio de 1,5% ao ano (UNEP/PNUMA, 2011).

A norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004), define como “resíduos sólidos” aqueles encontrados nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. Incluem-se os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, assim como líquidos cujas propriedades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos e corpos de água ou exijam soluções técnicas e economicamente inviáveis face à melhor tecnologia disponível.

Em 2011, no Brasil, foram consumidos mais de 65 milhões de toneladas de cimento, o que representa um aumento de cerca de 8,3% em relação a 2010, dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Desse total, 77% corresponde ao cimento ensacado, o que representa 50 milhões de toneladas.

Cada embalagem vazia de cimento com capacidade para 50 kg pesa 150 g, (em média). Foram envasadas aproximadamente 1 bilhão de embalagens de cimento ou um total de 150 mil toneladas papel, apenas em 2011. Presume-se que a quase totalidade desse material foi descartada na natureza, sem nenhum tratamento, ou em lixões, potencializando vários problemas ambientais (SNIC, 2012). A reutilização dessa matéria-prima permite mitigar a demanda de insumos e a geração de resíduos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Buscar obter CPs de referência ou com acréscimo de material fibroso e caracterização (física e mecânica) desses compósitos de matriz cimentícia que empreguem fibras celulósicas de embalagens de cimento nos processamentos dos traços (Grupo 1 com 4% de fibras e Grupo 2 com 12% de fibras). Sendo os percentuais de cimento, respectivamente, 76% e 68% nestes compósitos modificados.

Os traços para os compósitos de referência selecionados para esta pesquisa constituem-se de duas proporções de cimento/areia (percentual em massa) respectivamente 79-21 (BR1) e 77-23 (BR2).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Selecionar traços para a produção de CPs com o intuito de reaproveitar as embalagens de cimento;

Identificar características e variabilidade microestrutural dos compósitos processados;

Avaliar a performance mecânica dos compósitos de diferentes traços;

Estudar as propriedades térmicas para se conhecer o comportamento desses materiais, em aplicações que priorizem o conforto ambiental, a partir de variações da temperatura.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PARA A GERAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Segundo Chahud et al. (2007), alguns resíduos de edificações podem se revelar materiais potencialmente adequados à reciclagem. O potencial de reaproveitamento dos resíduos da construção civil deve ser avaliado.

Sistemas de avaliação ambiental de edificações, propostos mundialmente, incluem os resíduos de construção no item “Uso de Materiais”, não existe um item específico com critérios e pontuação para o aproveitamento de cada um. Como exemplo, o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), pontos ponderados levam a um índice de desempenho ambiental denominado *Environmental Performance Index* (EPI), cuja certificação permite comparações entre empreendimentos, com classificações e avaliações de gestão, saúde e conforto, uso de energia e transporte, uso de água, uso de materiais, uso de solo, poluição e ecologia local.

No método BREEAM, para a capacidade de reciclagem, reuso de estruturas, fachadas e materiais (inclusive os agregados e madeiras destinados à reciclagem que tenham sido triturados por processos sustentáveis) caberiam 4,4% do peso total correspondente a 10% da avaliação. O valor pode parecer pequeno ao se considerar todo o ciclo de vida da edificação, porém, representa um impacto ambiental significativo, quando se leva em consideração a construção e a demolição, geradores de grandes percentuais de resíduos (CHAHUD et al., 2007).

Para o Ministério do Meio Ambiente, o Plano Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), elaborado pelo Comitê Interministerial e lançado em 2008, expõe a necessidade de maiores esforços para que 20% do total de resíduos sólidos do país sejam reciclados até 2015. É consenso que processos que utilizam recursos renováveis ou recicláveis visem proteger o meio ambiente, propiciem a criação de ambientes saudáveis e não tóxicos, e mantenham a qualidade do ambiente construído (MMA, 2011).

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil identifica que o grupo de materiais “Papéis, papelão e TETRAPAK®” representa 13,1% dos 41,94% dos

resíduos sólidos urbanos totais, e chega a 7,2 milhões de toneladas anuais coletados de forma adequada no país (ABRELPE/ISWA, 2011).

A utilização de embalagens descartadas de cimento para a produção local de compósitos cimentícios reforçados por fibras atende a alguns dos princípios propostos por meio do uso eficiente de materiais não nocivos, energias renováveis e conservação da biodiversidade, o que minimiza o consumo de insumos e maximizando a reutilização de recursos (CHAHUD et al., 2007).

De acordo com o Perfil de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil, existem cinquenta tipos de resíduos com destinação classificada. As embalagens de papel *Kraft* com resíduos de cimento e argamassa (Classe C), são consideradas “resíduos cuja destinação para reaproveitamento e reciclagem, com restrições por serem considerados contaminados com resíduos de cimento ou de outros materiais de construção” (CUNHA Jr., 2005).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil produz 140 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e apenas uma pequena fração (entre 3% e 5%) é reciclada. Estima-se que 39% dos resíduos metropolitanos se compõem de papel e papelão (IBGE, 2011).

Para Monteiro e d’Almeida (2012), o aumento da pressão social para o uso racional dos recursos naturais, nas duas últimas décadas, fez com que o uso de fibras lignocelulósicas fosse considerado vantajoso para aplicações industriais, por se tratar de um resíduo renovável, de baixo custo se comparado às fibras sintéticas e neutro em relação às emissões de CO_2.

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1970 (ANJOS, 2003). As fibras naturais são resistentes, abundantes, não tóxicas, de baixo custo e provém de fontes renováveis de matéria-prima, podendo servir como um excelente agente de reforço para os polímeros, contribuindo para a redução da poluição ambiental e melhor utilização de recursos naturais. O Brasil, com sua reserva de recursos naturais, tem investido no domínio da tecnologia de produtos reforçados com fibras vegetais (SAVASTANO, 2001).

Os diferentes tipos de materiais compósitos que apresentam a fase dispersa reforçadora da matriz contínua na forma de fibras têm, como principais vantagens, resistência mecânica e módulo de elasticidade excepcionalmente elevados quando comparados a materiais da mesma densidade. Devido à natureza oca das fibras

vegetais, estas apresentam propriedades específicas benéficas ao isolamento acústico (SAVASTANO, 2001). A crescente verticalização das estruturas também incentiva mundialmente a busca por materiais que ofereçam melhorias na resistência mecânica, redução de massa e seção, maior durabilidade e reciclagem ambientalmente correta (SICHIERI, 2007).

Algumas das principais vantagens do uso de cimento para a produção de placas não estruturais, comumente utilizadas em edificações que utilizam estrutura metálica, estão relacionadas ao uso de equipamentos e consumo de energia nos processos, com custos relativamente baixos, ao controle da mistura e manuseio das argamassas serem bastante conhecidos e pelo fato de a secagem e desidratação do resíduo não serem necessárias, visto que o cimento precisa de água para sua hidratação e posterior endurecimento. Ainda deve ser considerada a possibilidade de controle da resistência mecânica e permeabilidade dos materiais de construção e, principalmente, a utilização do resíduo localmente (CHAHUD et al., 2007).

As matrizes empregadas pela construção civil são, em geral, pastas, argamassas e concreto, em grande parte derivadas de aglomerantes minerais, que se rompem facilmente, a partir de deformações plásticas quase nulas. Apesar de resistentes a esforços de compressão, essas matrizes não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Para compensar essa deficiência, outros materiais são empregados como reforço (BUSON, 2009).

Fibras naturais têm sido usadas como preenchimentos orgânicos ou reforços para termoplásticos, devido ao baixo custo da matéria-prima, degradabilidade e propriedades mecânicas conferidas aos compósitos. Além da importância social e econômica e do interesse industrial por produtos ecologicamente corretos através da substituição de elementos sintéticos por fibras naturais, há significativo interesse pela identificação da correlação entre estrutura e propriedades dos compósitos e a redução do custo dos compósitos com a utilização de fibras naturais por não oferecerem risco à saúde (SILVA et al., 2009).

Para o reforço de materiais de construção civil, podem ser empregadas fibras normalmente rejeitadas pelas indústrias de amarra, estofados e tecelagem. Embora apresentem elevada resistência à tração, o baixo módulo de elasticidade dessas fibras condiciona sua eficiência como reforço a deformações elevadas do compósito à base de cimento (SAVASTANO, 2001).

Foram produzidas no país, apenas em 2008, cerca de 8 milhões de toneladas de papel e, segundo estimativas, a produção nacional de celulose deve atingir 18,3 milhões de toneladas até 2016 (alta de 30,9% em relação a 2011), em função da elevada competitividade da celulose nacional (IBGE, 2011). Mesmo com uma desaceleração da economia chinesa de 8,5% a.a. para 7,5% a.a. entre 2012 e 2016, o mercado global ainda pode absorver cerca de 1,3 milhão de toneladas adicionais por ano, o que incentiva empresas a manter projetos de expansão da capacidade produtiva (BRACELPA, 2011).

Atualmente, cerca de 50% do papel consumido no Brasil é reciclado (NIT-CMRR, 2011) e o percentual varia de acordo com o tipo de papel. Os benefícios gerais da reciclagem do papel apontam, principalmente, para a redução no consumo de água e energia utilizada na produção, muito embora os números sejam bastante divergentes de uma empresa para outra, pois depende do tipo de tecnologia empregada e da eficiência do processo. Calcula-se que, para cada tonelada de papéis usados na reciclagem, deixa-se de cortar de 15 a 20 árvores (CEMPRE, 2010).

O papel *Kraft* é um produto produzido a partir de polpas de fibras celulósicas longas, que mantém suas propriedades mecânicas por não passar por nenhum processo responsável pelo enfraquecimento de suas fibras. Sua reciclagem gera uma economia considerável de recursos como água, energia, madeira reflorestada e outros insumos (BRACELPA, 2011).

O maior volume de toda produção de papel *Kraft* é direcionado para as embalagens das indústrias de cimento, açúcar e de bandejas de ovos. Todas as categorias de embalagens à base de celulose apresentam índices econômicos positivos e tendência à manutenção destes índices em curto e médio prazos. Desde 2005, a produção vem crescendo e um dos motivos é o fato de que o papel causa menor impacto ambiental, se comparado a outros materiais (EMBALANEWS, 2007).

As fibras vegetais de natureza celulósica são, de forma geral, descontínuas. Sua morfologia diversificada é especialmente importante nos produtos naturais, pois pode revelar sua origem (MANO, 2004).

As fibras vegetais de natureza celulósica são, de forma geral, descontínuas. Sua morfologia diversificada é especialmente importante nos produtos naturais, pois pode revelar sua origem (MANO, 2004).

Algumas fibras naturais podem ser modificadas industrialmente por processos químicos, para atender a exigências específicas. A classificação atual considera a forma física. As cargas fibrosas são as fibras de amianto, de vidro, celulósicas e sintéticas (RABELO, 2000).

Aparentemente, as fibras naturais acrescentam poucas vantagens, pois, em geral, as propriedades mecânicas não são muito alteradas. Contudo, a pesquisa científica tornou viável o uso das fibras de origem natural em compósitos estruturais, ampliou-se sua aplicação industrial, em vista de seu baixo custo, baixa densidade, pelo fato de causarem menor abrasão em máquinas processadoras, apresentarem boa adesão à matriz e se originarem de fontes renováveis (OLIVEIRA, 2007).

Matrizes alcalinas, como as de cimento *Portland,* são utilizadas no acondicionamento de resíduos por seu custo e tecnologia acessível. A elevada alcalinidade reduz a solubilidade de muitos resíduos inorgânicos tóxicos e perigosos, inibindo processos microbiológicos. Porém, podem incorporar resíduos líquidos, pastosos ou úmidos (RIBEIRO, 2011). Para o aproveitamento de resíduos e materiais com fibras, deve-se considerar as condições climáticas do lugar onde serão utilizados os compósitos (BUSON, 2009).

3.2 COMPÓSITOS

Compósitos são materiais conjugados por, no mínimo, dois componentes ou fases: **fase matriz**, que pode ser cerâmica, polimérica ou metálica, e **fase dispersa**, geralmente composta por fibras ou partículas que servem como carga, empregadas para realçar propriedades mecânicas, eletromagnéticas, físicas ou químicas do material como um todo (PEREIRA, 2002). A interação química e/ou física entre as duas fases é necessária para que ocorra a transferência de esforços mecânicos da matriz para os reforços fibrosos (BRASKEM, 2002).

O concreto, empregado como material estrutural, é um material obtido pela composição de cimento, agregados e água, pode conter aditivos que alteram seu desempenho. A proporção entre os constituintes (traço) deve atender às condições requeridas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade (MORAVIA, 2007).

Nos últimos 30 banos, polpas de celulose foram aplicadas como reforço na produção de compósitos à base de cimento por não representarem risco à saúde

humana ou animal. Porém, até o momento, para os comportamentos físico e mecânico, os resultados apresentam-se compatíveis aos observados em compósitos de cimento-amianto apenas para curtos períodos de utilização, por causa dos mecanismos de deterioração regidos pela umidade. Por esse motivo, uma das abordagens para o desenvolvimento decompósitos com melhor desempenho é a modificação da matriz, com a substituição parcial do cimento comum pelo finamente moído contendo misturas minerais reativas e alto teor de sílica (RODRIGUES et al., 2010).

3.2.2 A influência das cargas nos compósitos

Cargas são materiais sólidos, independente da forma e função que exercem, podem ser orgânicas ou inorgânicas, de origem natural ou sintética. Podem ser adicionadas aos polímeros e compósitos para diminuir os custos ou alterar suas propriedades físicas, melhorar a estabilidade dimensional e diminuir a retração no resfriamento e cura. Elas influenciam a viscosidade dos compostos e a contração final, muitas vezes exigindo alterações no processo de produção dos materiais, e podem ser adicionadas para proporcionar dureza, tenacidade, rigidez, resistência à abrasão, mudanças na condutividade elétrica, alteração de propriedades dinâmicas e reduzir custos; podem também promover o retardamento de chamas, alterações de cores e propriedades térmicas, elétricas e reológicas (RABELO, 2000).

Os agregados são cargas granulares, anteriormente considerados inertes (não reativos). De dimensões e propriedades adequadas para uso em concretos e argamassas, participam das reações químicas na zona de transição influenciando o comportamento das argamassas. São genericamente conhecidos como areias, de origem natural ou industrializada (MORAVIA, 2007).

De acordo com a Norma Brasileira Registrada NBR 7211 – Agregados para Concreto, o agregado miúdo é definido como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis (ou a mistura de ambas), cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm – peneira nº 200 (ABNT, 1982). Suas propriedades mais importantes (distribuição granulométrica, forma e textura dos grãos) apresentam resultados em função do grau de esfericidade e arredondamento e definem os teores de água e cimento necessários

para a trabalhabilidade das argamassas, influenciando sua compacidade, durabilidade e resistência (MANSUR, 2007).

A indústria do gesso acartonado *(drywall*) tem forte participação de multinacionais que estão se fixando no país. O Brasil detém reservas significativas de gipsita localizadas nas regiões norte, nordeste e centro oeste do país. Posiciona-se como o 16º produtor mundial, a produção supre basicamente o consumo interno. Operam, na mineração de gipsita, dezenas de empresas que lavram ou beneficiam o minério, algumas delas integradas com a calcinação de gesso. O principal problema ambiental na mineração de gipsita é o capeamento, cujo aproveitamento ainda não foi viabilizado. A calcinação do gesso quando feita na zona produtora do semiárido acarreta poluição do ar e devastação de matas para uso como lenha, gerando um passivo que deve ser superado. A maioria das empresas é controlada por capital nacional.

3.3 O USO DE POLÍMEROS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Há patentes registradas desde a década de 20, evidenciando a potencialidade das inclusões de polímeros como modificadores das propriedades de argamassas e concretos.

Com a ideia de que a atenuação da porosidade do concreto convencional poderia gerar benefícios idênticos, iniciou-se a busca por mecanismos capazes de aprimorar sua qualidade, tornou-o mais impermeável, resistente a esforços mecânicos e à ação de agentes agressivos. A pesquisa intensa conduziu ao desenvolvimento de produtos e sistemas para aplicações na indústria da construção, em função de resultados como alterações nas propriedades reológicas da argamassa modificada, implicando em alterações da microestrutura interfacial, sem alterar o grau de hidratação em maiores idades (MANSUR, 2007).

A adição de polímeros em argamassas colabora para o aumento da resistência mecânica entre a matriz de cimento e os agregados e tende a reforçar microfissuras, cavidades e planos de clivagem do hidróxido de cálcio. Como os monômeros são introduzidos na porosidade aberta do material, a polimerização provoca uma rede contínua de reforço, com melhorias nas propriedades de

compressão, observadas quando se compara argamassas de mesma consistência obtidas pela redução no teor água/cimento (a/c). Vitais na produção de compósitos, sua utilização deve ser ponderada em função do desempenho (MANSUR, 2007).

Nas argamassas modificadas com polímero, a porosidade capilar do sistema é reduzida e desloca a curva de distribuição de tamanho de poros para menores valores. Considerando-se o mecanismo como um reforço de particulado, em relações com maiores proporções polímero/cimento (p/c). A redução do caminho médio livre influencia a propagação de fissuras na pasta endurecida e a redução do ingresso de agentes agressivos. Em relação às resistências à tração e flexão das argamassas modificadas com polímero, considera-se que a atenuação da porosidade do concreto colabora para a diminuição da fragilidade e aumento da resistência mecânica dos materiais (MANSUR, 2007).

A adição de polímeros em sistemas cimentícios influencia os estados fresco e endurecido das pastas, argamassas e concretos, no que se refere à consistência**,** permitindo que apresentem maior resistência à deformações. De modo geral, as alterações da consistência dependem do tipo de polímero utilizado, formato das partículas, quantidade de ar incorporado durante a mistura e medida da adição (razão em peso do teor p/c). Em alguns casos, o aumento de fluidez não é verificado (MANSUR, 2007).

O fenômeno da incorporação de ar é ocasionado pelo processo de mistura mecânica, é também responsável pela remoção de pequenas bolhas ou formação de bolhas maiores, tendentes à flutuação. Nas argamassas modificadas por polímeros, a presença de surfactantes forma bolhas pequenas e estáveis, de difícil remoção. A incorporação de ar nas argamassas, favorável à trabalhabilidade, pode desfavorecera resistência mecânica (MANSUR, 2007).

3.4 A SELEÇÃO DE MATERIAIS

3.4.1 Embalagens de papel *kraft*

Papéis consistem, essencialmente, em um aglomerado de fibras celulósicas de diferentes tamanhos, entrelaçadas umas às outras e finamente prensadas, oferecem uma superfície adequada para colar, escrever ou imprimir. Sua resistência mecânica não depende somente do tamanho e da resistência individual de cada

fibra, mas do modo como estão dispostas; a qualidade é consequência da natureza das fibras, que variam conforme o vegetal que lhes deu origem, com diferenças entre a forma estrutural, tamanho e pureza (ROBERT, 2007).

A polpa *kraft* (palavra alemã que significa forte) origina papéis resistentes e de coloração escura. Segundo SAMISTRARO et al. (2009), o papel *kraft* é fabricado a partir de uma mistura de fibras de celulose curtas e longas, provenientes de polpas de madeiras macias. Essa mistura de fibras confere características de resistência mecânica e bom desempenho no processamento mecânico, além de relativa maciez.

Para a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA), as características dos produtos a serem embalados e a forma como serão realizados o ensacamento, o armazenamento e a distribuição por parte do cliente final, definem o modelo de saco de papel *kraft* a ser utilizado. Os sacos multifoliados de papel, com capacidade para 20 a 50 kg, servem para o ensacamento de numerosos produtos. A maior parte do cimento produzido no país é comercializada em embalagens de 50 kg; o número de folhas pode variar de uma a quatro, com gramaturas entre 60 e 120 g/m². Em casos específicos, acrescenta-se uma folha revestida com filme de polietileno (PE), cuja propriedade relevante é a resistência obtida durante a utilização e distribuição, permitindo melhor conservação do produto ensacado (BRACELPA, 2011).

As embalagens de papel *kraft* são as mais utilizadas para ensaque de cimento por diversas razões, porém, consomem, em sua produção, muita celulose nativa como matéria-prima, afetando questões ambientais de maneira significativa. Apesar de utilizada pela indústria do cimento há cerca de 80 anos, a embalagem de cimento sofreu pouca evolução constitutiva e apresenta aspectos negativos com relação ao transporte e conservação do produto (BRACELPA, 2011).

Comparadas às demais, as fibras do papel *kraft* são alongadas, o que confere às embalagens resistência ao rasgo em torno de 0,05%. A gramatura é o peso da folha de papel por unidade de superfície, expresso em gramas por metro quadrado.

Papéis (papelão e jornal) com alto teor de lignina (de 1/3 a 1/4 da massa da madeira) ficam amarelados rapidamente, devido à sua degradação com o ar. Por isso, uma das principais etapas da fabricação de papel é quando se reduz o conteúdo de lignina na polpa de madeira (ROBERT, 2007).

A indústria de papel é a maior consumidora de celulose do mundo, cuja fonte mais comum é o eucalipto, *Eucaliptussp*, da família das Mirtáceas. A morfologia das fibras naturais permite a identificação da sua origem botânica (FOELKEL, 2007).

No Brasil, a madeira para celulose e papel provém de espécies arbóreas de pinus *Pinuselliottii, Pinus taeda e Pinus caribea)*, bambu (em menor escala) e eucalipto, destaca-se *Eucalyptusgrandis, Eucalyptussaligna, Eucalyptusurophyla,* cultivados primordialmente com essa finalidade (SAMISTRARO et al., 2009).

A celulose é um polímero formado por longas cadeias de anéis de glucose, conectadas umas às outras por ligações glicosídicas, classificado como polissacarídeo ou carboidrato (PORTELLA, 2011). É um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas (cerca de 33% do peso da planta), em combinação com a lignina, a hemicelulose e a pectina (FOELKEL, 2007). Ocorre como fibrilas (Figura 3.1), que podem chegar a 15.000 Å de comprimento e diâmetro entre 30 e 300 Å. É abundante, no Brasil, em estado nativo ou em plantações e comumente atacável por microorganismos. Suas distintas cadeias justapostas de glucose originam fibras compactas que constituem a parede celular insolúvel à água nos vegetais. As aplicações mais conhecidas são como alimento, papel (a partir de polpa de madeira), fibra (de uso geral na indústria têxtil), na indústria de móveis e na construção civil (AKCELRUD, 2007).

As principais propriedades da celulose são boa resistência mecânica, baixa resistência ao calor e alta absorção de umidade, peso molecular variável e fórmula empírica$(C_6H_{10}O_5)_n$- com valor mínimo de n = 200, tipicamente de 300 a 700, pode passar de 7000 (MANO, 2004). A representação gráfica para suas regiões amorfa e cristalina pode ser vista na Figura 3.1:

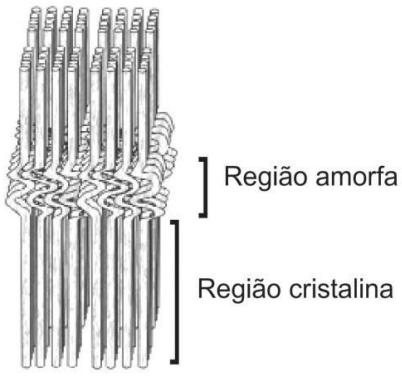


Figura 3.1 – Fibrilas da celulose
Fonte: Adaptado de SILVA, 2009, p.666.

Representativamente, o grau de cristalinidade da celulose se situa entre 60 a 80% (AKCELRUD, 2007). Já a Figura 3.2 representa a conformação estrutural linear tridimensional da celulose, com múltiplas ligações de hidrogênio entre hidroxilas:

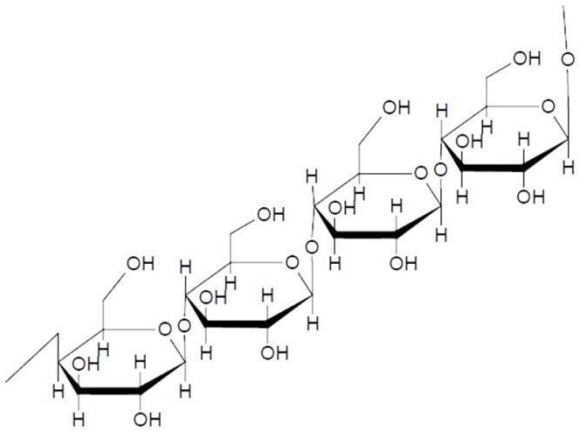


Figura 3.2 - Estrutura da celulose
Fonte: COSTA Jr., 2008, p.10

3.4.2 Água

A água hidrata o cimento e dá fluidez, plasticidade e trabalhabilidade ao concreto, deve ser sempre utilizada em doses mínimas, suficientes para as funções indicadas.

Geralmente, a relação a/c para a construção civil varia entre 0,4 a 0,7 - em peso. A resistência da mistura de cimento com outros materiais inertes é diretamente proporcional à quantidade de água usada (MANSUR, 2007).

O termo hidratação, na química do cimento, indica a totalidade das mudanças que ocorrem quando o cimento anidro reage com a água. Logo após a mistura, observa-se a formação de uma camada de gel sobre a superfície dos grãos, que pode ser menos visível em pastas de cimento com a relação a/c normal. Na etapa intermediária, cerca de 30% do cimento reage. Após 12 horas, ocorre a máxima liberação de calor que caracteriza o fim da pega, com produtos formados por mecanismos de dissolução e precipitação. Depois de 24 horas, com a redução da permeabilidade da casca dos produtos hidratados, os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) começam a se depositar dentro dos contornos originais dos grãos de cimento, avançam mais rápido que a retração do grão para o preenchimento da chamada casca vazia. Nesse estágio, as reações de hidratação prosseguem, no estado sólido, de forma mais lenta (MANSUR, 2007).

3.4.3 Areia fina

O agente antiumectante mais conhecido é a sílica (fórmula química: SiO_2), substância capaz de reduzir a higroscopicidade dos materiais, impedindo que partículas individuais sejam atraídas devido à umidade. A sílica ocorre em dezessete formas cristalinas distintas, estáveis em diferentes temperaturas. Em geral, cumpre a função de redução de custos (RABELO, 2000) ou para aumentar a nucleação, mantendo o grau de cristalinidade dos compostos (AKCELRUD, 2007).

Rochas sedimentares não consolidadas ocorrem naturalmente em grãos com diâmetros compreendidos entre 0,06 e 2,00 mm, que determinam sua classificação como areias finas (0,06 e 0,20 mm), areias médias (0,20 a 0,60 mm) e areias grossas (0,60 mm a 2,0 mm), obtidas pelo processo de peneiramento, após secagem em estufa (MORAVIA, 2007).

3.4.4 Cimento *Portland*

O sucesso do cimento pode ser julgado pelo número edifícios romanos, que ainda resistem há mais de 2.000 anos depois de sua construção (ASHBY, 2007).

O cimento *Portland* é um aglomerante hidráulico resultante da mistura finamente moída de clínquer, gesso e adições normalizadas e homogeneizadas a temperaturas em torno de 1450° C. Segundo a Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP, 2012), a finalidade dos elevados teores de adições nos cimentos *Portland* objetiva a redução no consumo de energia e matérias-primas, contribuindo para a diminuição das emissões de CO_2 durante o processo de fabricação, além de permitir a utilização de rejeitos industriais. O cimento *Portland* de alta resistência inicial é produzido com o mesmo clínquer utilizado para a fabricação do cimento convencional, porém, com maior dosagem de calcário e argila, e moagem diferenciada. Sua superfície específica confere alta resistência inicial ao concreto em suas primeiras idades e aumentos na resistência até os 28 dias. A resistência a sulfatos é devida à adição de cinza pozolânica, propriedade que o torna indicado para a produção de estruturas em ambientes agressivos e em obras onde seja necessária a desforma rápida de peças de concreto armado (ABCP, 2012).

A alita, silicato tricálcico presente de 40 a 70% na composição, é o mais

importante constituinte; juntamente com a belita e o silicato dicálcico (15 a 35%) são responsáveis pela resistência do cimento. O aluminato tricálcico (5 a 10% de participação na fórmula) reage rapidamente com a água e favorece uma pega rápida indesejável, que pode ser alterada pela adição de agentes de controle como a gipsita. A ferrita influi nas reações de hidratação, que variam de acordo com a composição do cimento e tempo de cura da argamassa (MANSUR, 2007).

Logo após a mistura dos grãos de cimento com a água, inicia-se a pega e o endurecimento, que o tornam adequado para ser utilizado principalmente na produção de concreto armado, em argamassas de fixação e revestimento (ABCP, 2012). Após 15 minutos, o produto da reação de pega dá uma ligação fraca, quando os grãos são revestidos pelo hidrato C_3AH_6. A real resistência vem com a reação de endurecimento, que começa após três horas e apresenta aumento na densidade ao longo dos anos. O revestimento gel desenvolve protuberâncias que crescem e se transformam em bastões finos, densamente apinhados, que se irradiam como um ouriço do mar, a partir dos grãos individuais do cimento. Enquanto a hidratação continua, os espinhos ($C_3S_2H_3$) do segundo conjunto de reações crescem e penetram gradativamente na rede intertravada de agulhas, que se consolida às superfícies porosas das fibras presentes entre os grãos de cimento, agregados e outros materiais (ASHBY, 2007). Depois de endurecido, ganha características de rocha artificial e mantém suas propriedades, principalmente se permanecer imerso em água por aproximadamente sete dias (MANSUR, 2007).

3.4.5 Polímeros

De acordo com Aranha(2001), o poli(álcool vinílico) – PVA é o polímero sintético hidrossolúvel produzido em maior volume no mundo. Eventualmente identificado comercialmente ora por PVA, ora por PVAc, o poli(acetato de vinila) tem fórmula molecular $(C_4H_6O_2)_n$ e massa molar de 86.09 g/mol (AKCELRUD, 2007). É usado no processamento de papéis e fibras e como estabilizante de emulsões (ARANHA, 2001).

Materiais poliméricos contêm cadeias de diversos comprimentos que se distribuem de acordo com o mecanismo da reação de polimerização e as condições em que foi conduzida (AKCELRUD, 2007). As argamassas modificadas com

polímeros apresentam maior fluidez do que a argamassa não modificada para um mesmo traço e fator a/c, sendo o aumento de fluidez tanto maior quanto maior a adição de polímero, medida através da razão em peso do teor p/c. O aumento da consistência depende do tipo de polímero utilizado, porém, nem sempre ocorre aumento da fluidez (MANSUR, 2007).

A transformação reversível entre o PVA e o PVAc foi estudada por Staudinger, em 1961, por meio das reações de esterificação e saponificação (ARANHA, 2001). A solubilidade do PVA e do PVAc em água resulta da capacidade do polímero formar pontes de hidrogênio (MANSUR, 2007).

A Figura 3.3 abaixo representa a estrutura química dos polímeros que servem de base para a emulsão polimérica utilizada nos compósitos. E, na Figura 3.4, tem-se o processo de hidrólise do PVAc.



Figura 3.3 - Estrutura química dos polímeros PVAc / PVA.
Fonte: ARANHA, 2001, p.176

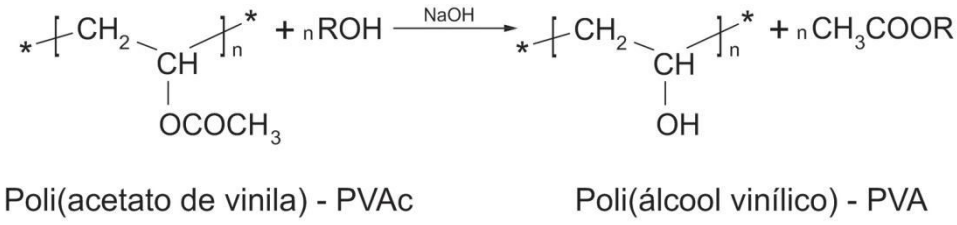


Figura 3.4 – Processo de hidrólise do PVAc.
Fonte: Adaptado de AKCERUD, 2007; ARANHA, 2001, p. 176.

O número total inicial de grupos acetila representa o grau de hidrólise (GH) do PVA. Esse parâmetro é importante na caracterização de suas propriedades, já que o aumento do GH implica em redução da solubilidade na água, estabilização energética e aumento da viscosidade, da resistência à tração e da adesão em

superfícies hidrofílicas (ARANHA, 2001).

A presença de polímeros e surfactantes pode alterar o estado de floculação do cimento e de outras suspensões. As interações podem ser de natureza física e/ou química. Polímeros que contêm grupos acetato de vinila, como o PVA (com grau de hidrólise <100%) - PVAc, e o copolímero poli(etileno-co-acetato de vinila) – EVA, sofrem hidrólise no ambiente da água do poro do cimento (MANSUR, 2007).

Estudos identificaram que o látex diminui as fraturas de estresse por compressão entre as 24 horas iniciais até 28 dias de hidratação, fenômeno que ocorre devido a um aumento da maleabilidade do sistema, atribuído a uma diminuição da porosidade dos compósitos (MANSUR, 2007), fator que influencia a resistência às fissurações (GOTO, 2006).

A adsorção e o molhamento da carga pelo polímero também influem no estado conformacional das macromoléculas e na cristalização do polímero, podendo atuar como nucleantes heterogêneos (RABELO, 2000).

Normalmente as falhas surgidas em compósitos originam-se de quebras na interface e nem sempre são devido a rompimento de componentes. Melhorias na aderência entre fibras e matriz podem elevar as performances mecânicas (FILHO & SAVI, 2001).

3.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR)

Dentre as diversas técnicas disponíveis para quantificação simplificada do teor do acetato de vinila, presente na emulsão polimérica, a espectroscopia na região do infravermelho tem sido uma das mais utilizadas (MANSUR, 2007). A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) permite análises químicas multielementares rápidas e não destrutivas, com preparação simplificada de amostras e limites de detecção comparáveis às técnicas de absorção e emissão atômica.

A radiação infravermelha corresponde à parte do espectro eletromagnético entre as regiões do visível e das micro-ondas. A porção de maior utilidade para a análise de grupos funcionais de estruturas orgânicas está situada entre 4000 e 400

cm^{-1}. A intensidade da banda é medida pela transmitância (razão entre a energia transmitida e a energia incidente na amostra analisada) ou pela absorbância ou o logaritmo na base dez do recíproco da transmitância (SILVERSTEIN, 1991).

3.5.2 Difração de Raios-X (XRD)

A difração de raios-X utiliza o espalhamento coerente da radiação-X por cristais, a fim de compreender e elucidar as frações cristalinas dos materiais (CANEVAROLO, 2007). A condição para que ocorra interferência construtiva é determinada pela geometria do reticulado (PADILHA, 2004).

3.5.3 Potencial hidrogênio iônico (pH)

O pH ou potencial hidrogênio iônico é um índice de acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio. Consiste na medida da concentração de íons hidrogênio em uma solução, em escala logarítmica inversa, com determinações de zero a quatorze, com escala de **pH< 7,0**para ácidos; **pH > 7,0**para alcalinos e básicos e **pH = 7,0** para neutros.

O pH afeta a degradação de alguns polímeros. Quanto menor é o valor do pH, maior é a quantidade de íons de hidrogênio presentes na solução, e mais elevada a acidez. Para elevados valores de pH, maior a alcalinidade (SEELEY, STEPHENS, TATE, 2003).

3.5.4 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) permite medir a variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, para a caracterização da decomposição, estabilidade térmica e exame da cinética dos processos físico-químicos que ocorrem na amostra. As medidas são realizadas utilizando o ar ou gás oxigênio, para uma atmosfera oxidante, ou gás nitrogênio, para condição de atmosfera inerte (HAINES, 1995).

As curvas TGA são normalmente expressas graficamente com a variação da massa (Dm) em porcentagem, no eixo das ordenadas, e temperatura (T) ou tempo (t), no eixo das abscissas. Os resultados podem ser usados de forma quantitativa e

se relacionam com a formação de produtos voláteis (na perda de massa) ou com a incorporação de átomos e moléculas, provenientes do gás de arraste (BITTENCOURT, 2008).

3.5.5 Microscopia óptica (M.O.)

Para Canevarolo (2004), a observação direta da estrutura morfológica de um objeto está limitada pelo poder resolvente do olho humano, cerca de 70μm. A função do microscópio óptico é produzir uma imagem ampliada do objeto, para a visualização da informação estrutural. É essencial que a estrutura apresente variações de intensidade luminosa ou de cor na imagem, características da luz para as quais a visão humana é sensível. Assim, resolução, ampliação, profundidade de campo, distorção e contraste são as características principais a considerar quando se pretende selecionar um sistema de microscopia para observar a morfologia de um objeto.

A resolução máxima de um microscópio óptico é de cerca de 0,1 μm (100 nm) e está limitada pela natureza da luz. A análise por microscopia requer o controle de parâmetros fundamentais da ampliação do objeto observado, no sentido de atribuir qualidade à imagem construída. Em materiais opacos à luz visível (cerâmicos e polímeros), apenas a superfície é submetida à observação. O modo de reflexão é o indicado para observação da distribuição superficial, das dispersões fibrosas e suas interações com a matriz (MANNHEIMER, 2002).

3.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.)

A microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) tem sua maior aplicação no exame de superfícies rugosas (contraste topográfico) com um poder de resolução de 10 a 150.000 vezes. Mediante a utilização de múltiplos efeitos de interação entre elétrons e matéria (que pode ser heterogênea e de origem orgânica ou inorgânica), permite-se obter a orientação cristalina, diferenciação entre elementos, potencial elétrico e campos magnéticos (MANNHEIMER, 2002), assim como a identificação das diferentes fases da região estudada e seu tamanho.

Os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. Os elétrons secundários fornecem imagens

topográficas superficiais da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução; os retroespalhados fornecem imagens características de variações da composição (BITTENCOURT, 2008).

3.5.7 Propriedades termofísicas (difusividades térmica, condutividade térmica e calor específico pelo Método *Flash Laser* e medida da densidade pelo método geométrico)

Quatro dimensões básicas são necessárias para o desenvolvimento da transferência de calor: comprimento(L), massa(M), tempo(t) e temperatura(T). Todas as outras grandezas físicas de interesse podem ser relacionadas a essas quatro dimensões básicas.

Condutividade térmica é a medida da capacidade de um material conduzir calor, pode também ser definida pela razão entre o fluxo de calor transmitido através de uma área unitária do material e o gradiente de temperatura, medida em Joules por segundo por metro quadrado da área de um corpo, para um gradiente de temperatura de 1ºC por metro de espessura desse corpo (MORAVIA, 2007).

A difusividade térmica é uma função do tempo (entre outras incógnitas) e a unidade de medida térmica no Sistema Internacional (SI) é mm^2/s. As diferenças de difusividade térmica são identificadas pelas variações de tempo (FERREIRA, 2011).

No método termo-analítico para caracterização de propriedades termofísicas (TPP), conhecido como *Flash Laser Calorimetry*, desenvolvido em 1961 por J. W. Parker e colaboradores, a face frontal da amostra em formato discoide é levemente aquecida por um pequeno pulso de *laser* ou luz de alta intensidade energética. A fonte de energia pode ser um feixe de *laser* (Método *Flash Laser*) ou um feixe de luz oriundo de uma lâmpada de xenônio (Método *Light Flash* ou *Nanoflash*®), conforme observam Rodrigues e Marchetto (2012). O aumento da temperatura na face inversa é identificado por meio de um detector de infravermelho. O valor da difusividade térmica da amostra é calculado a partir da espessura versus tempo necessário para a elevação da temperatura na face posterior, em porcentagens do valor máximo (FERREIRA, 2011).

A Figura 3.6 mostra a aquisição dos dados, que ocorrem quando a fonte do *laser* é acionada e o disparo atinge a face de incidência.

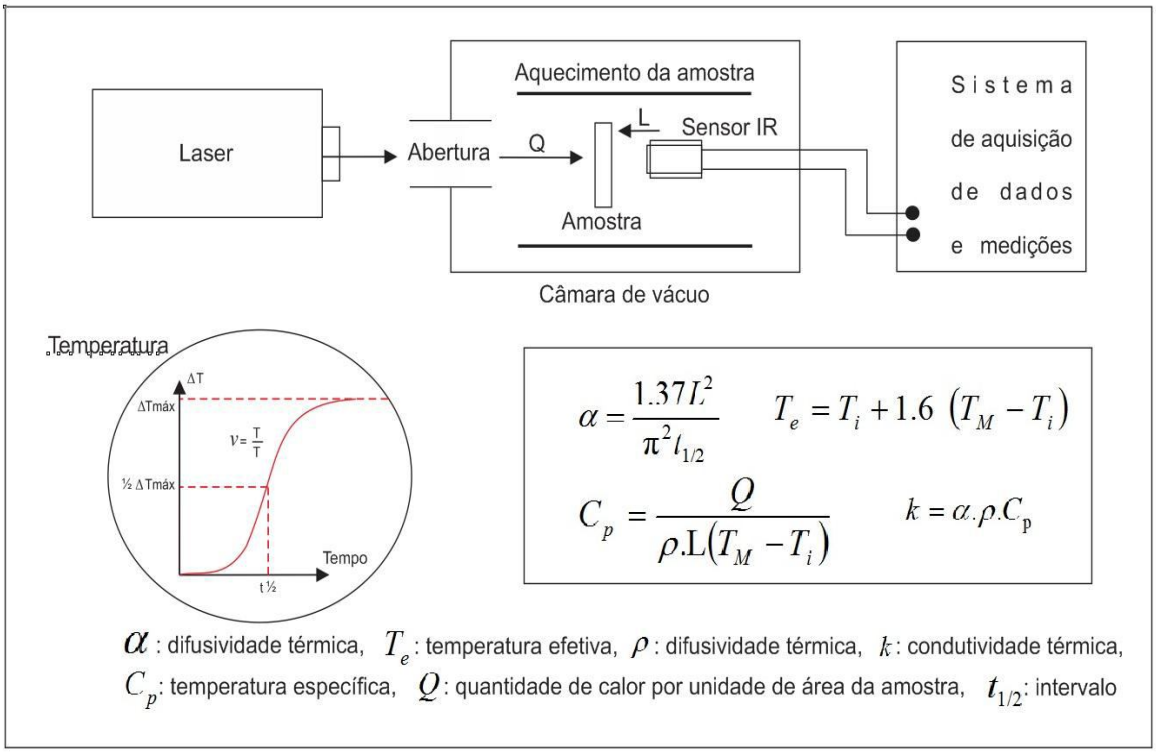


Figura 3.5 – Fonte do *laser* acionada.
Fonte: FERREIRA, 2011, p.3
Nota: Princípio do Método *Flash Laser.* Curva de análise LFA. Equação difusividade térmica.
Onde: α = difusividade térmica (cm^2/s); d^2 = espessura da amostra (cm) e t ½ = valor do tempo em 50% do aumento da temperatura na face superior traseira da amostra (s).

O aumento da temperatura na face frontal de incidência da amostra, criado pelo feixe de laser ou pelo feixe de luz difunde através da amostra, resulta num aumento da temperatura na face traseira superior ou inversa. Se as amostras em formato discoide possuíssem superfícies especulares, o feixe de *laser* seria refletido de volta para sua fonte de energia. Para evitar esse fenômeno, ambas as faces da amostra, a frontal incidente e a superior traseira ou inversa, são recobertas com uma fina camada de carbono, da ordem de 50 μm (FERREIRA, 2011).

Para o sistema *laser*, é necessário um porta-amostras de carbono posicionado para o mínimo contato com o suporte, evitando perdas de calor do laser incidente da amostra para o conjunto. Geralmente utiliza-se o *laser* do tipo Nd:GGG, que permite o ajustamento do comprimento do feixe (entre 0,2 e 1,2 ms). A energia do feixe é selecionada pelo operador e ajustada pelo *software* de análise. É importantíssimo o alinhamento do *laser*, da amostra e do detector, para que se obtenha um resultado sem interferências (FERREIRA, 2011).

O modelo de transferência de calor fornece resultados mais precisos na identificação da difusividade e da condutividade térmicas (RODRIGUES & MARCHETTO, 2012). Para a caracterização da difusividade térmica, o detector apresenta um sinal típico onde há o aumento da temperatura na parte superior traseira ou inversa, causado pelo feixe de *laser* ou de luz, disparado com determinada energia de pulso e comprimento versus tempo. Os dados são registrados graficamente, com resultado em m/s (FERREIRA, 2011).

Os ensaios seguiram determinações da ASTM – INTERNATIONAL E 1461–07 (*Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method*). A norma determina que uma pequena amostra fina discoide seja sujeita a uma alta intensidade de energia radiante de curta duração de pulso. A energia do pulso é absorvida na superfície frontal da amostra. O aumento da temperatura resultante é registrado na face posterior pelo termograma (RODRIGUES & MARCHETTO, 2012).

A espessura mínima da amostra é determinada pela exigência de que a duração do *flash* curto deve ser comparada com o tempo em que a temperatura começa a subir para a superfície traseira. Para ensaios utilizando luz de *flash*, a espessura adequada é de cerca de 1 mm para amostras de difusividade menor que 0,2 cm^2/sec e até 3 mm para aquelas de maior difusividade (PARKER et al., 1960). Por outro lado, se a amostra for demasiadamente espessa, a sensibilidade é reduzida com o tempo e a possibilidade de ocorrer perda de energia aumenta.

3.5.8 Flexão simples (Três pontos)

De acordo com Garcia et al. (2012), o ensaio de Flexão em três pontos consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada e biapoiada, e carga aplicada na distância média entre apoios. São utilizados, para cerâmicos, concreto e madeira, entre outros, por fornecer dados quantitativos da deformação dos materiais sujeitos a cargas de Flexão. Os resultados dependem da temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais, características microscópicas e, principalmente, da geometria da seção transversal da amostra. Durante o ensaio, ocorrem esforços normais e tangenciais na seção transversal do corpo de prova, que resultaram em um estado de tensões em seu interior.

ensaiados papéis de três origens:

PAPEL TIPO *KRAFT*: Gramatura 115. Sem uso. Formato da folha de 0,66 x 0,96 m; peso médio 71,1g. Peso médio da pasta (uma folha): 61,40 g.

EMBALAGENS MULTIFOLIADAS DE REENSAQUE (folha dupla/50 kg): Peso médio: 134,32 g. Peso médio da pasta (1 unidade): 109,19g.

EMBALAGENS MULTIFOLIADAS (50 kg) descartadas: Peso médio 182,43 g. Peso médio da pasta (1 unidade): 114,73 g.

CIMENTO *PORTLAND*CP V-ARI: Amostras obtidas do material (pó), até que 100% fosse passante nas peneiras de 75 µm (200 mesh) e retida na peneira de 37 µm (400 mesh). O material foi seco em estufa a 105° C, por 24 horas, e acondicionado em embalagens herméticas após o resfriamento.

Área superficial do cimento 2,19 m^2/g, massa específica de 3,09 g/cm^3 e dimensão média das partículas 9,6 µm. No Gráfico 4.1, tem-se a evolução do peneiramento do cimento segundo Normas constantes (ANEXO A).

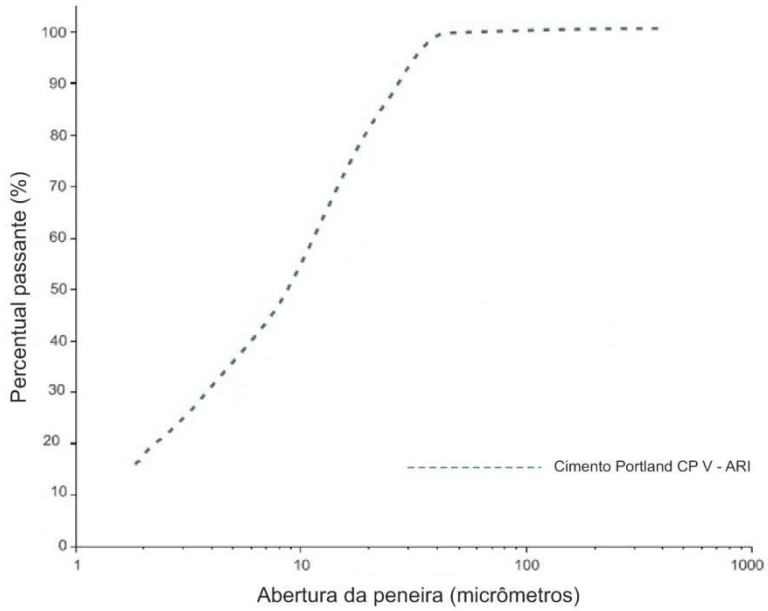


Gráfico 4.1 – Dimensão das partículas de cimento, a partir da análise de resultados fornecida pelo fabricante (HOLCIM BRASIL).
Fonte: Dados da pesquisa
Nota: Anexos A e B

AREIA FINA LAVADA: Obtida em depósito de materiais de construção; peneirada até que 100% dos grãos fossem passantes na peneira de abertura 4,8 mm e ficassem retidos na peneira de abertura 0,075 mm (ABNT NBR 7211/83);

previamente seca em estufa a 105° C ± 5° C, por 24 horas. Dimensão média das partículas, segundo Escala de Krumbein: >64 µm / <2 mm (KRUMBEIN & SLOSS, 1963).

EMULSÃO POLIMÉRICA À BASE DE PVAC (EM DISPERSÃO AQUOSA): utilizada à temperatura ambiente, conforme fornecida pelo fabricante.

4.3 MÉTODOS

Foram preparadas dezesseis amostras (duas para cada composição), nas medidas de 125 x 125 mm.

A partir de cada amostra, foram obtidos três corpos-de-prova, medindo aproximadamente 125 x 40 mm, num total de seis unidades retilíneas de material homogeneizado, para cada formulação ensaiada.

Do total de 48 corpos-de-prova, foram produzidos 6 compósitos de referência, denominados BR1 e BR2, utilizou-se cimento, areia e água.

Os compósitos com adição de fibras (4 e 12%) receberam 3% de emulsão polimérica a base de PVAc e 20% de areia fina lavada. Na Figura 3.8, as variáveis avaliadas neste estudo.

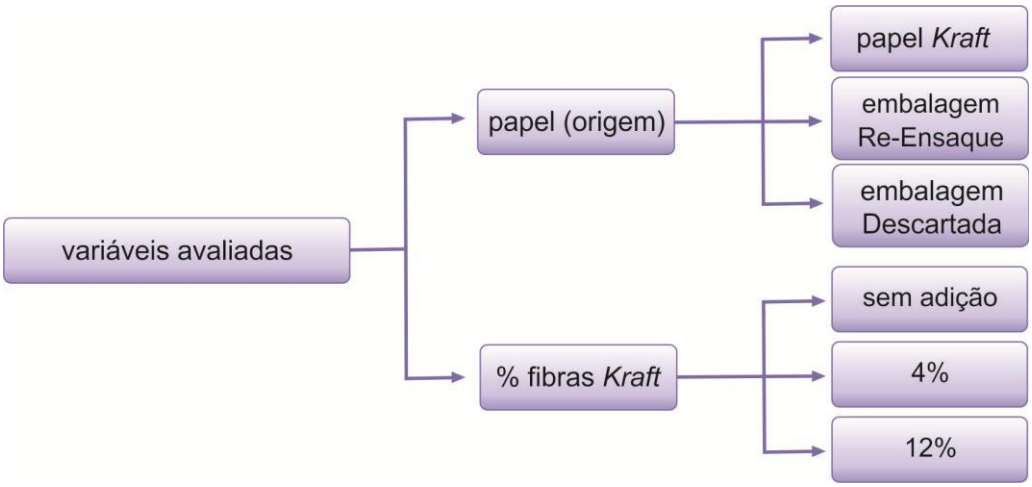


Figura 4.7 – Variáveis avaliadas no estudo dos compósitos com adição de fibras.
Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 4.9, observa-se o fluxograma com a nomenclatura adotada para as amostras com os três tipos de papel em análise.

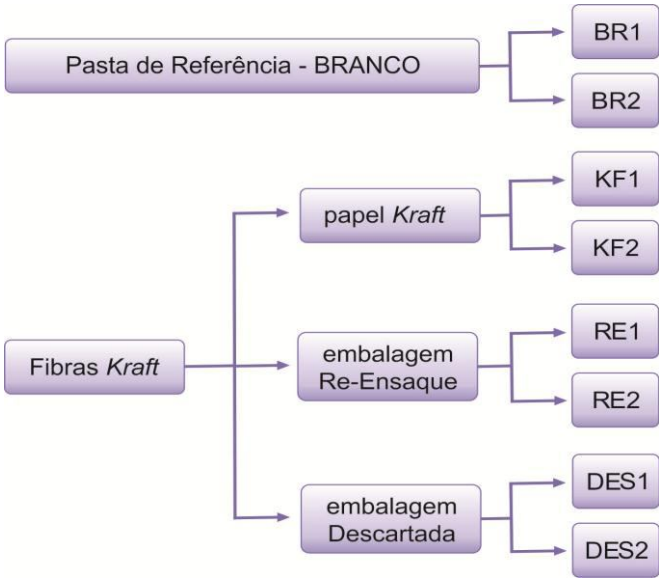


Figura 4.8 – Classificação para nomenclatura das amostras.
Fonte: Dados da pesquisa

O teor polimérico dos experimentos foi determinado ao se levar em consideração a ocorrência (em quantidade não determinada) de filmes de polietileno (PE), divulgada pelos fabricantes, com a finalidade de melhorar o desempenho das embalagens. A densidade dos materiais compósitos aumenta com o acréscimo de partículas pequenas de agregado que preenchem os espaços entre as partículas maiores.

Nas aglomerações mais densas, ocorre o preenchimento de vazios, que são indesejáveis por permitirem a penetração de água, que enfraquece e causa trincas. Na Tabela 4.1, são apresentados os traços utilizados na produção dos compósitos.

Tabela 4.1 – Traços do consumo dos materiais para amostras de 300 (g)

Traços	**Cimento**	**Areia**	**Fibras**	**H_2O**	**PVAc**	**Fator p/c(1)**	**Fator a/c(2)**	**Fator c/f(3)**	**Fator c/a(4)**
BR1	79	21	-	115	-	-	0,50	-	3,77
BR2	77	23	-	106	-	-	0,52	-	3,35
KF1 / RE1 / DES1	76	20	12	228	10	0,13	1	19	3,8
KF2 / RE2 / DES2	68	20	36	340	10	10	1,67	5,7	3,4

Fonte: Dados da pesquisa
Nota: Compósitos: BR1 (288g); BR2 (264g); KF1 / RE1 / DES1/ KF2 / RE2 / DES2 (300g)
Percentuais: PVAc/cimento (1); água/cimento (2); cimento/fibras (3); cimento/areia (4)

Nas Tabelas 4.2 e 4.3, o peso dos materiais (em gramas) e o total dos sólidos utilizados no preparo das amostras dos compósitos de referência BR1 e BR2 (respectivamente 288 e 264 g) e com acréscimo de fibras (300 g):

Tabela 4.2 – Proporções dos materiais (em gramas) para amostras do GRUPO 1.

GRUPO 1

Identificação Amostras		Sólidos (g)			Líquidos (g)		Total Sólidos (g)
F:C:A (%)	Código	Fibras	Cimento	Areia	Água	Adesivo à base de PVA	
(0;79;21)	BR 1	–	228	60	115	–	288
(4;76;20)	KF 1	12	228	60	228	10	300
	RE 1	12	228	60	228	10	
	DES 1	12	228	60	228	10	

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 4.3 – Proporções dos materiais (em gramas) para amostras do GRUPO 2.

GRUPO 2

Identificação Amostras		Sólidos (g)			Líquidos (g)		Total Sólidos (g)
F:C:A (%)	Código	Fibras	Cimento	Areia	Água	Adesivo à base de PVA	
(0;77;23)	BR 2	–	204	60	106	–	264
(12;68;20)	KF 2	36	204	60	340	10	300
	RE 2	36	204	60	340	10	
	DES 2	36	204	60	340	10	

Fonte: Dados da pesquisa

São necessários cerca de 2 litros de água para cada embalagem de cimento (aproximadamente 150 gramas de papel *kraft)*. A maior parte da água foi drenada em uma moldura de *silk-screen*, com tela de *nylon* de 0,06 mm de diâmetro. O processo de produção constou do corte das folhas e embalagens pré-umidificadas, processadas por 4 minutos. A Tabela 4.4 apresenta os equipamentos utilizados no preparo das amostras.

Tabela 4.4 – Equipamentos utilizados no preparo das amostras

Equipamentos	Características
tesoura comum	15 cm
balança de precisão	0,01 g
liquidificador	potência 350 w
tela de *silk-screen* (para drenagem da polpa)	diâmetro do *nylon* (0,06 mm)
estufa de esterilização e secagem	220 Volts / capacidade 100 litros
batedeira planetária de eixo vertical para construção civil	modelo para 20 litros / copo metálico
serra circular de bancada para corte dos corpos-de-prova	Makita (de 235 mm)
molduras de para moldagem dos corpos-de-prova	compensado naval (madeirite)
câmera fotográfica digital	Samsung ST64 14.2 MP LCD 2,7"

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 4.9 mostra (a) fotografias da tela de *silkscreen* (para drenar a polpa batida); (b) molde de compensado naval que serviu de estrutura para o preparo das amostras. De cada amostra, foram retirados três corpos de prova (c).

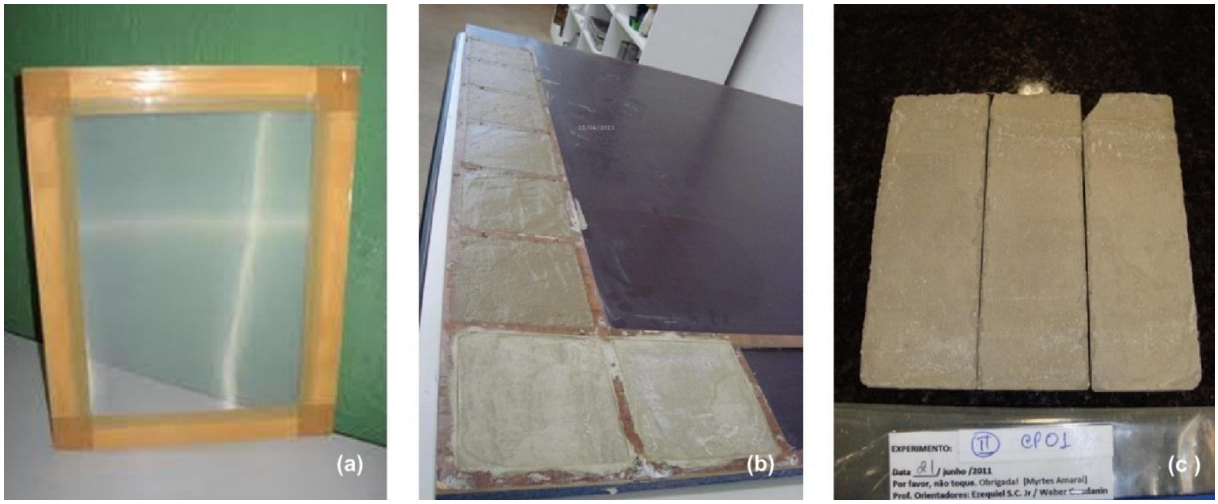


Figura 4.9 – Tela, moldes e CPs.
(a) Tela de *silkscreen;* (b) Moldes em compensado naval; (c) CPs (formato final)
Fonte: Dados da pesquisa

As polpas foram secas em estufa, pesadas e acondicionadas em embalagens plásticas hermeticamente fechadas.

Para a moldagem, utilizou-se a polpa pré-umidificada, com a dosagem de água definida em função dos sólidos. À medida que se acrescentavam as fibras, foram realizadas correções, sempre em volumes mínimos, para garantir a trabalhabilidade dos moldados.

Para a obtenção da argamassa, utilizou-se uma argamassadeira de movimento planetário.

Utilizou-se velocidade baixa da pá do misturador (62 ± 5 rotações por minuto), durante 4 minutos (NBR 7215,1996)

Os compósitos moldados não foram prensados, apenas mantidos em laboratório à temperatura ambiente para secagem ao ar (evaporação lenta) e cura de vinte e oito dias.

Aos três dias de cura, as amostras foram retiradas dos moldes para corte.

Na Figura 4.10, as fotografias ilustram o processo de mistura dos materiais, inicialmente pelos pós, seguido pelo acréscimo da fibra hidratada, com posterior homogeneização.



Figura 4.10 – Moldagem dos compósitos com acréscimo de fibras.
(a) Mistura dos pós (b); adição da polpa hidratada aos pós (c); consistência durante o processo de mistura mecânica; (d) consistência de moldagem dos CPs.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 4.11 apresenta amostras dos compósitos (a) com adição de 4% (DES1) e (b) com adição de 12% (DES2) de fibras. A porção superior da amostra é apresentada à direita e o verso à esquerda, nas duas figuras.

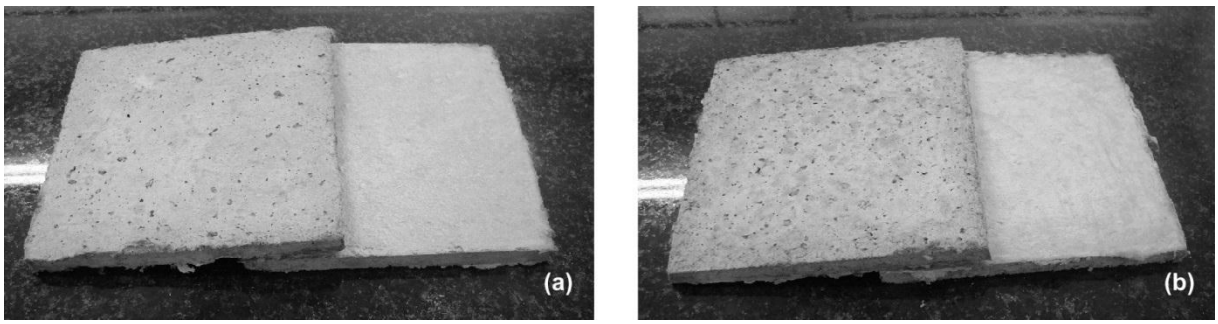


Figura 4.11 – Amostras dos compósitos.
(a) DES1 (4% fibras).; (b) DES2 (12% fibras).
Fonte: Dados da pesquisa

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.4.1 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR)

Para as amostras de cimento e areia, os ensaios foram realizados por reflectância difusa. Utilizou-se um espectrofotômetro da marca *Shimadzu*, modelo IR *Prestigie* 21, sendo feitas 32 varreduras entre 400 e 4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1} e intervalo de 2 cm^{-1}.

Os papéis tipo *kraft,* folhas internas e externas de embalagens de reensaque e de cimento (amostras de 50 x 50 x 10mm/10mg), foram secos em estufa antes dos ensaios, à temperatura de aproximadamente 60 ± 5°C, por 2 horas e colocados diretamente no porta-amostras para análise.

A faixa espectral variou entre 1100 e 2500 nm ao se utilizar a técnica de reflexão total atenuada.

Os valores de referência foram obtidos atendendo normas e métodos convencionais de determinação das propriedades seguidos pela indústria de papel e celulose, divulgadas pela *Tecnical Association of the Pulpand Paper Industry* – TAPPI (SAMISTRARO et al., 2009).

O filme da emulsão polimérica foi obtido por desidratação em mufla, à temperatura de 40° ± 5° C, por 24 horas.

4.4.2 Difração de Raios-X (XRD)

As análises pelo método do pó foram executadas no equipamento *Shimadzu* 7000 sob condições de operação de radiação Cu Kα, (λ= 1,54056), sob tensão de 35 kV; tubo de 40 mA, velocidade do goniômetro de 0,02° a 2θ por passo, tempo de contagem de 0,6 segundos por passo e varredura de 3 a 90°. Os dados foram coletados por meio de fendas de divergência de 1 grau, dispersão de 1 grau e recebimento 0,3 mm. Efetuou-se a interpretação qualitativa do espectro por comparação utilizando referências da literatura e o banco de dados PDF02, do *software X-Powder* - Versão 2010.01.14 (ICDD–PDF02, 2005).

4.4.3 Microscopia óptica (M.O.)

Os papéis foram diretamente colocados no suporte da Lupa Espectroscópica *WILD HEERBRUG* G binocular, para avaliação da superfície.

Utilizou-se uma Lupa Estereoscópica binocular *Metrimpex Hungary PZO – Labimex* básica*,* sem acessórios especiais, para análise superficial dos compósitos, no modo de reflexão. O preparo prévio dos materiais consistiu em secagem dos CP sem estufa à temperatura de aproximadamente 60° ± 5° C, por 2 horas.

4.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.)

Para este ensaio, adotou-se o mesmo preparo prévio da M.O., tanto para os papéis quanto para os compósitos, com des-umidificação e metalização com ouro pelo método *Sputtering* (por aspersão), por se tratarem de amostras não condutoras. Utilizou-se o equipamento marca Sanyu Electron, modelo Quick Electron – SC 701. A formação das imagens para análise morfológica e microcavidades dos compósitos ocorreu por detecção de elétrons secundários e elétrons retroespalhados, com energia do feixe de 15 kV. Para obtenção das micrografias de alta resolução de todos os materiais sob análise, utilizou-se um equipamento da marca *Shimadzu*, modelo *Super Scanning Electron Microscope* para o registro superficial de papéis e filme polimérico e de superfícies de fratura, bordas, poros, microfissuras e distribuição das fibras dos CPs dos compósitos, obtidas sob as mesmas condições do equipamento.

4.4.5 Potencial hidrogênio iônico da água e papéis (pH)

Determinou-se o potencial hidrogênio iônico dos materiais por meio do peagâmetro modelo mPA 210, como instrumento de medição. Considerou-se os valores de medição do pH da água utilizada no preparo da polpa e da emulsão polimérica, tal como fornecida, para comparação com os dados fornecidos pelo fabricante. Ambas as medições foram realizadas com os materiais à temperatura ambiente. As análises foram realizadas em triplicata.

Constatou-se variação dos pesos unitários das folhas papel *Kraft* (média de

71,06 g); das embalagens de reensaque (média de 134,32 g) e das embalagens descartadas (média de 182,43 g). A quantificação da água ocorreu após um período de 24 horas de imersão total de papéis e embalagens em recipiente tampado. No processo, utilizou-se 2 litros de água e uma embalagem ou folha (seca) para cada ensaio.

4.4.6 Termogravimetria (TGA)

Para a determinação da Termogravimetria (TGA) das amostras de papel *Kraft*, embalagens (partes interna e externa) e filmes (emulsão polimérica à base de PVAc), utilizou-se o equipamento DTG – 60 / 60 A. Observou-se que a faixa de temperatura variou de ambiente até 600° C, por 24 horas, com taxa de aquecimento de 10° C por minuto, atmosfera de N_2 e fluxo de 15 ml por minuto, a 40 kV e 30 mA. Para o cimento e a areia, a faixa de temperatura foi de ambiente a 1400° C, com os mesmos parâmetros.

4.4.7 Difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico (Método *Flash Laser*) e densidade (Método Geométrico)

Foram caracterizadas amostras cilíndricas de 8 mm de diâmetro, com tolerância de + 0,001; - 0,100 e espessura na faixa de 2,5 a 3 mm. As faces foram planificadas com tolerância de 0,005 mm. Na Figura 4.12, tem-se fotografias de placas moldadas para a retirada dos CPs BR1, BR2, DES1, DES2 e amostra preparada para a análise (fixados por parafusos no anel de molibdênio).

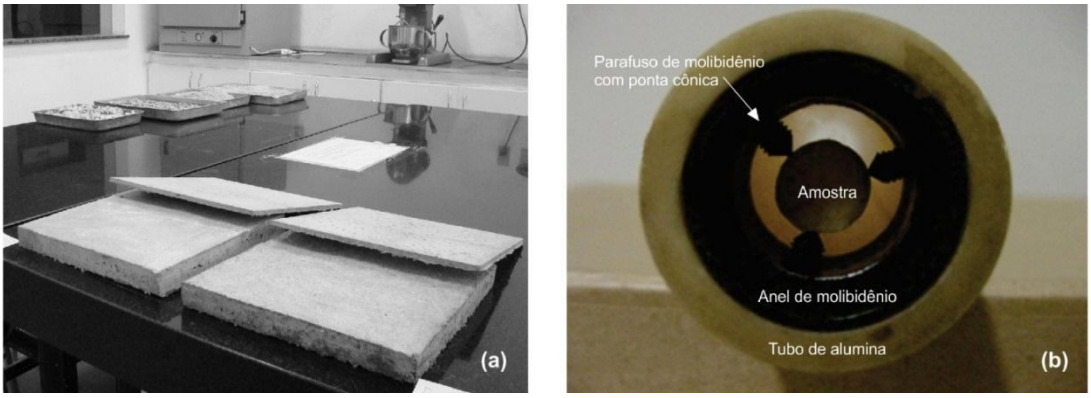


Figura 4.12 – Placas de compósito para retirada dos CPs utilizados nos ensaios.
Fontes: (a) Dados da pesquisa; (b) LMPT/CDTN.
Nota: Porta-amostra para os ensaios termofísicos

Obteve-se a espessura exata para a determinação das propriedades termofísicas dos compósitos no Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (LMPT/CDTN), com a ajuda de um micrômetro com resolução de 0,001mm.

A densidade foi geometricamente determinada por meio de balança analítica (resolução de 0,0001g) e micrômetro. Realizou-se dez medições de diâmetro e dez medições de espessura em cada amostra, para a determinação de valores médios. Para a massa, também se realizou dez medições em cada amostra, para isso utilizou-se balança analítica com resolução de 10^{-4} (g). As densidades foram geometricamente determinadas, a partir da expressão $\rho = 4.m / \pi.d^2.L$, onde *m* é a massa média, *d* o diâmetro médio e *L* a espessura média da amostra.

Para determinação da difusividade térmica α e do calor específico C_p, realizou-se cinco medições à temperatura ambiente, em cada amostra, empregou-se o Método *Flash Laser*, de acordo com a norma ASTM-E-1461-07.

Todas as medições termofísicas foram realizadas no LMPT/CDTN.

O sistema utiliza um *laser* de CO_2 selado, com potência máxima de 100 W. A duração do *flash* foi fixada em 15 ms e a potência do laser em 93 W. A difusividade térmica foi calculada pela equação abaixo:

$$\alpha = \frac{1{,}37L^2}{\pi^2 .\ t_{1/2}} \qquad (1)$$

Onde: α= difusividade térmica [$m^2 \cdot s^{-1}$];*L* = espessura da amostra [m] e $t_{1/2}$ = tempo de meia excursão [s].

O calor específico (C_p) foi calculado pela equação a seguir:

$$Cp = \frac{Q}{\rho.L(T_M - T_i)} \qquad (2)$$

Onde: *Q* = quantidade de calor absorvida na face da amostra [$J \cdot m^{-2}$]; ρ = densidade da amostra [$kg \cdot m^{-3}$]; *L* = espessura da amostra [m]; T_i = temperatura inicial da amostra [*K*] e T_M = temperatura máxima atingida na face oposta da amostra [*K*].

Para obtenção dos valores de *Q* e C_p de cada amostra, empregou-se uma

amostra padrão de Pirocerâmico 9606 (Netzsch), como referência para comparação com dados obtidos a partir dos compósitos ensaiados. Foram realizadas cinco medições para a obtenção do *Q*, com os mesmos parâmetros empregados nas medições das amostras, ou seja, duração do *flash* de 15 ms e potência do *laser* de 93 W. A condutividade térmica *k* foi calculada pelo produto da difusividade térmica pela densidade e pelo calor específico, conforme a equação abaixo:

$$k = \alpha.\rho.C_p \quad (3)$$

Onde: α = difusividade térmica [$m^2 \cdot s^{-1}$]; ρ = densidade da amostra [$kg \cdot m^{-3}$] e C_p = calor específico [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

4.4.8 Flexão simples (Três pontos)

Utilizou-se a Prensa Universal de Ensaios Destrutivos/EMIC - modelo DL 30000 N; com Célula Trd 23, capacidade de carga de 200 kg e extensômetro Trd 10 (posicionado ao centro, entre dois apoios num vão de 100 mm). A taxa de deformação foi ajustada para 0,5 mm/min^{-1}.

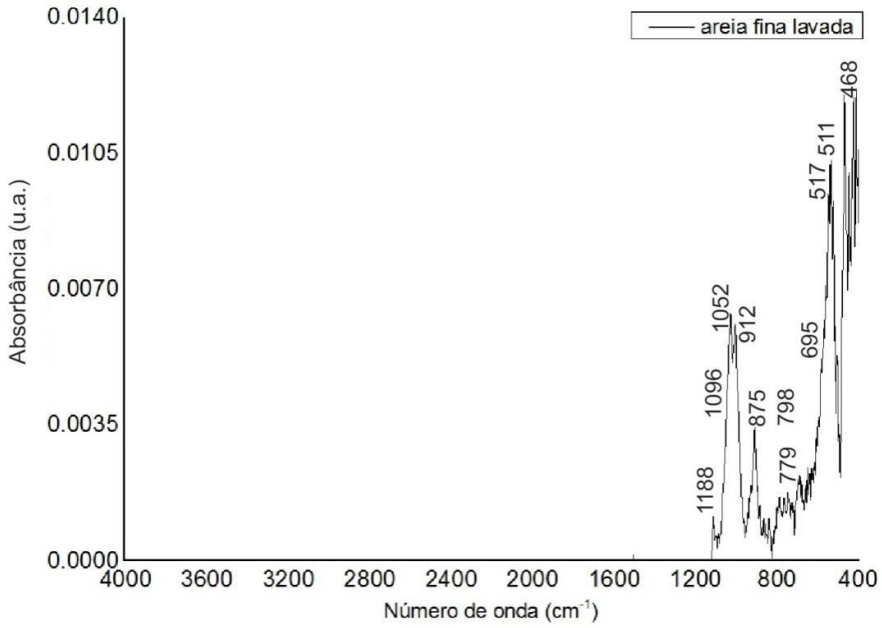
Tanto para as argamassas de referência quanto para os compósitos com carga de fibras, foram empregados CPs prismáticos medindo aproximadamente 125 x 40 mm^2, cortados com serra circular Makita (de bancada), de 235 mm. Programa utilizado para análise dos dados: Tesc - Versão 3.04. Os dados obtidos foram gerados pelo *software* Excel, em gráficos de barras de erros e desvios padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

O Gráfico 5.1 traz a curva para a fração de agregado miúdo utilizada.

Gráfico 5.1 – Espectros de absorção de infravermelho da areia fina lavada



Fonte: Dados da pesquisa

Podem ser observados picos na região da impressão digital (1188 cm^{-1}, 1096 cm^{-1}, 875 cm^{-1}, 798 cm^{-1}, 695 cm^{-1}, 517 cm^{-1} e 468 cm^{-1}), todos associados ao quartzo (MANSUR, 2007). No espectro, também se utilizou picos relacionados a feldspatos (1052-1096 cm^{-1}), minerais cauliníticos (912, 2132, 2236, 2358, 3620 e 3694 cm^{-1}) e calcita (1421 cm^{-1}) - minerais encontrados usualmente em rochas quartzíticas. É possível que esses minerais não tenham sido identificados nos ensaios de difração pelo tamanho reduzido de amostras estudadas.

A absorção do número de onda de 3424 cm^{-1} pode estar associada à presença de água aprisionada na matriz de quartzo. O aumento de picos entre 3600-3700 cm^{-1} se relacionam a vibrações de hidroxilas encontradas em materiais argilosos e cauliníticos (MANSUR, 2007).

A Tabela 5.5 apresenta os grupos químicos e números de onda correspondentes às vibrações observadas nos espectros. Como se pode observar

no Gráfico 5.2, os espectros apresentaram picos específicos relacionados ao PVA e ao PVAc, e alguns picos associados a ambos (as regiões 1583 cm^{-1} e 1558 a 1568 cm^{-1} determinam elementos químicos diferentes).

Tabela 5.5 - Modos de vibração e picos correspondentes para PVA e PVAc.

Número de onda (cm^{-1})	**Grupo característico**	**Polímero correspondente**
3550-3200	**ν** (OH)OH...OH	PVA e PVAc
2937-2870	**ν** (CH)	PVA e PVAc
1730-1712	**ν** (C=O)	PVAc
1650-1630	δ (OH)OH...OH	PVA e PVAc
1558-1568	**($-COO^-$)**	**PVA***
1461-1417	δ (CH) – CH_2	PVA
1376	δ (CH) – R-CH_3	PVAc
1329	δ (OH) – C-OH	PVA
1270	ν_{as}(=C-O-C)	PVAc
1141	**ν** (=C-O)	PVA
1093-1096	**ν** (=C-O) – C-OH	PVA
1023	ν_s(=C-O-C)	PVAc
945	(C-C)	PVAc
916	δ (CH) – CH_2	PVA e PVAc
849	**ν**(C-C)	PVA
602	(C=O)	PVAc

Fonte: MANSUR, 2007, p. 118.
Nota: (*) Íons carboxilatos residuais do processo de saponificação.

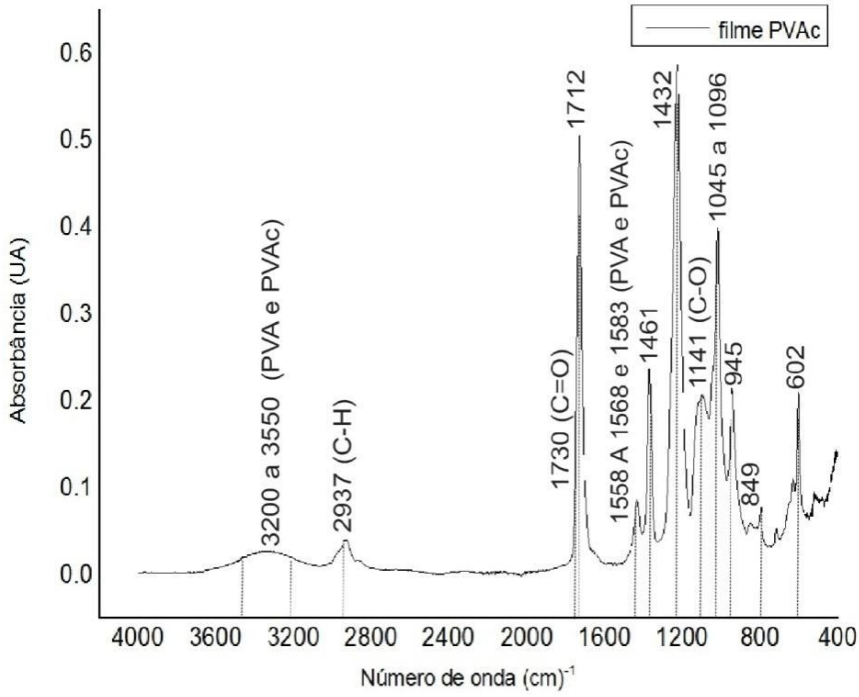


Gráfico 5.2 – Espectros de absorção de infravermelho do filme polimérico.
Fonte: Dados da pesquisa

Nos espectros do filme analisado, tem-se um importante pico de absorção (número de onda 1141 cm^{-1}), associado ao estiramento C-O, corresponde a uma banda de vibração atribuída à cristalinidade do PVA. O estudo da emulsão polimérica mostra picos relativos às ligações C=O (acetato de vinila) no comprimento de onda 1730 cm^{-1} e o estiramento do C-H, em 2937 cm^{-1}. A maioria dos espectros obtidos para os PVAs, apresenta picos associados ao processo de hidrólise dos grupos acetato de vinila do PVAc na região entre 1558 e 1568 cm^{-1} (MANSUR, 2007).

No Gráfico 5.3, tem-se bandas de celulose das amostras de papéis e embalagens *kraft*.

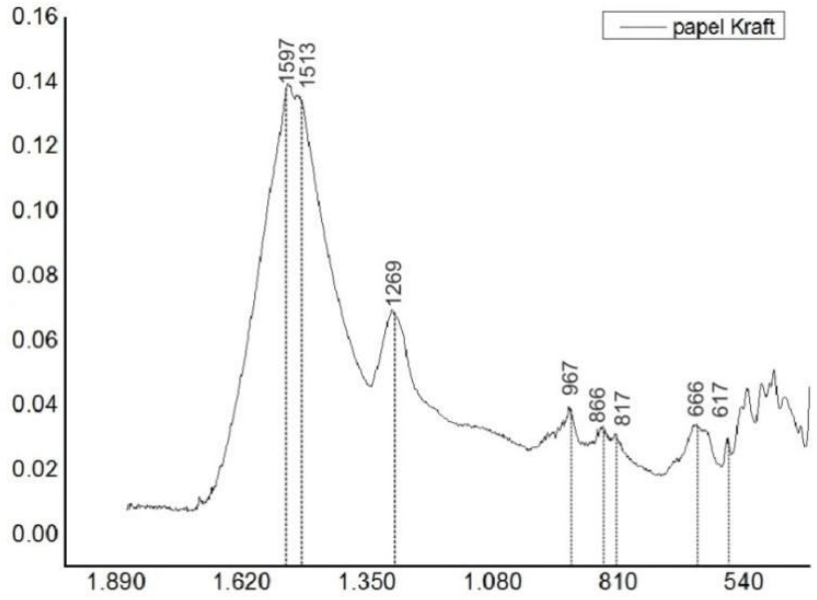


Gráfico 5.3 – Espectros de absorção de infravermelho do papel *kraft.*
Fonte: Dados da pesquisa

No Gráfico 5.4, verifica-se a homogeneidade do perfil espectral. A inexistência de sinais diferenciados entre as amostras de reensaque e descartadas ensaiadas é característica considerada relevante. Esses sinais são comuns na identificação de celulose em polpas de misturas de coníferas e folhosas (2270 nm), hemicelulose em *Eucalypytus camaldulensis* (2276 e 2328 nm); a banda 1680 nm identifica o número kappa em polpas *kraft* (SAMISTRARO, 2009).

Algumas das alterações registradas podem resultar de condições de análise, ruídos, presença de dióxido de carbono, umidade do ar e tendem a ser desconsideradas.

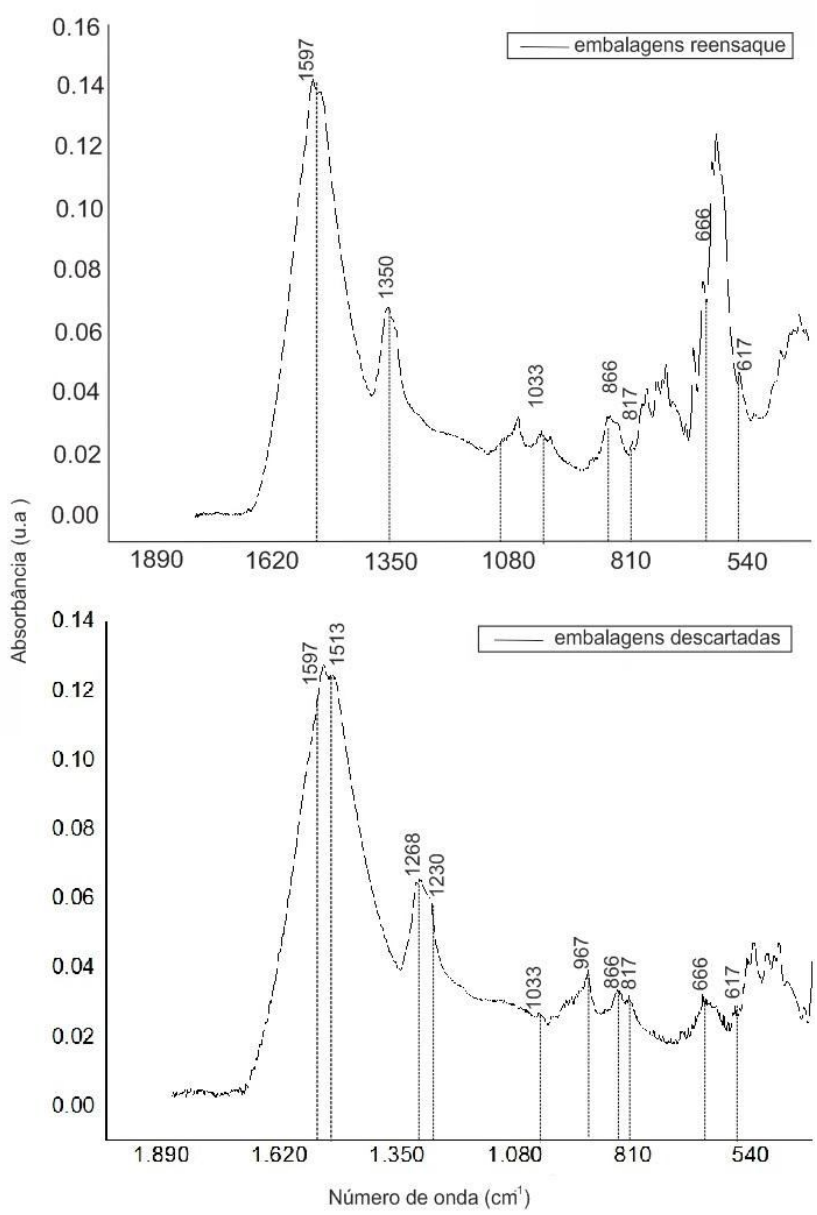


Gráfico 5.4 – Espectros de absorção de infravermelho de embalagens.
Fonte: Dados da pesquisa

Já no espectro obtido para o cimento *Portland* (Gráfico 5.5), é possível verificar picos correspondentes aos silicatos de cálcio C_3S (922 cm^{-1}, 525 cm^{-1} e 450 cm^{-1}), aluminato de cálcio C_3A (745 cm^{-1} e 424 cm^{-1}) e materiais carbonáticos (2516 cm^{-1}, 1795 cm^{-1}, 1497-1425 cm^{-1}, 878 cm^{-1} e 713 cm^{-1}). A presença de água está

associada à portlandita, em 3641 cm^{-1} (MANSUR, 2007).

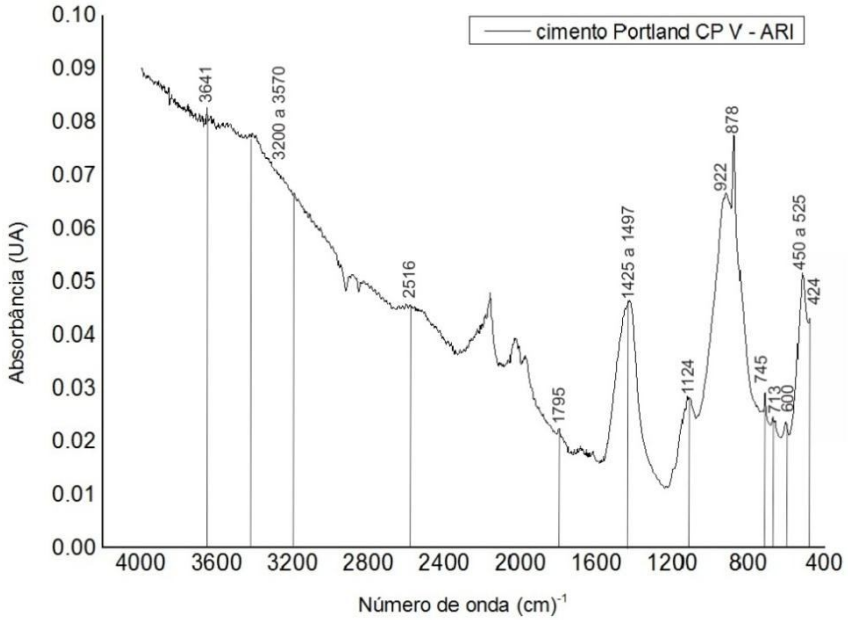


Gráfico 5.5 **–** Espectros de absorção de infravermelho do Cimento *Portland* CP-V ARI.
Fonte: Dados da pesquisa

5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (XRD)

O Gráfico 5.6 apresenta os resultados obtidos para a areia (material cristalino) utilizada no experimento, com picos característicos do quartzo.

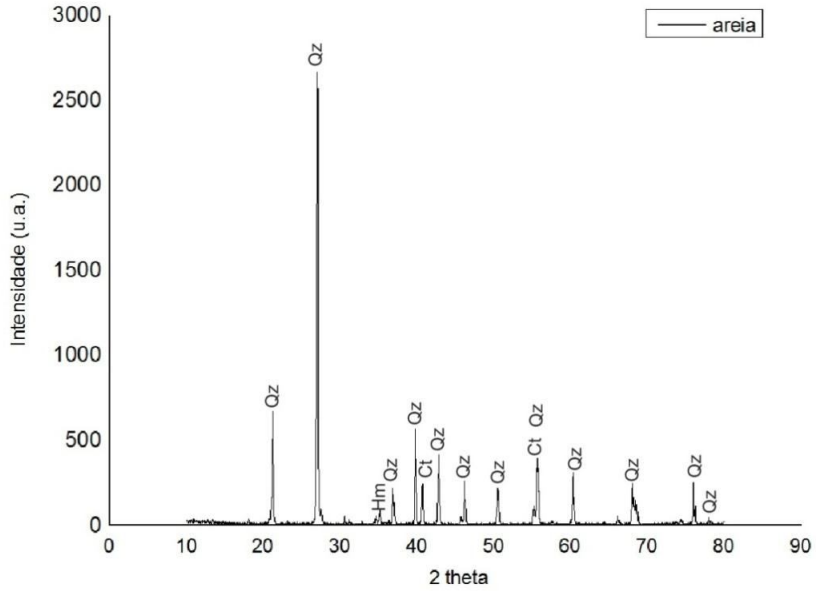


Gráfico 5.6 – Difratograma de raios-X da areia.
Fonte: Dados da pesquisa
Nota: Onde: Qz = SiO_2; Ct = caulinita, Hm = hematita.

Muitos dos picos identificados nos resultados obtidos para a areia estão de acordo com o padrão de difração do quartzo, representados no Gráfico 5.7, através da Ficha 05-0490 - ICDD (MANSUR, 2007).

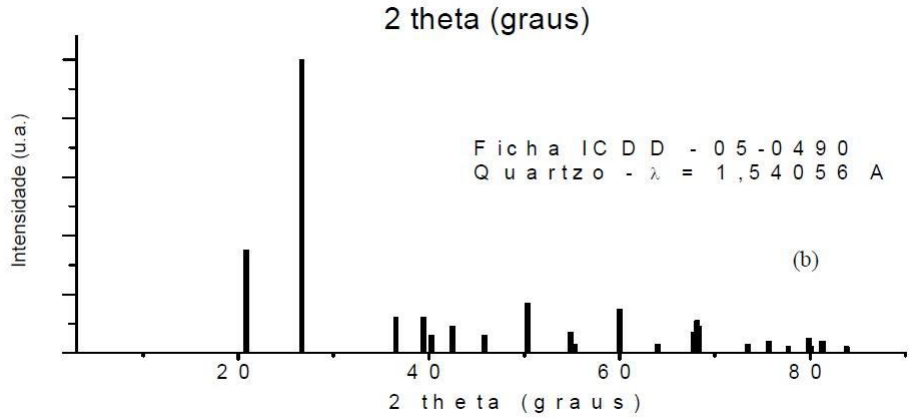


Gráfico 5.7 - Padrão de difração do quartzo.
Fonte: MANSUR, 2007, p.104

No difratograma obtido para o cimento *Portland*, Gráfico 5.8, pode-se observar um padrão típico para este cimento, com identificação das fases cristalinas de seus principais componentes (alita, belita, aluminato, ferrita, portlandita e a porção calcárea), segundo Mansur (2007).

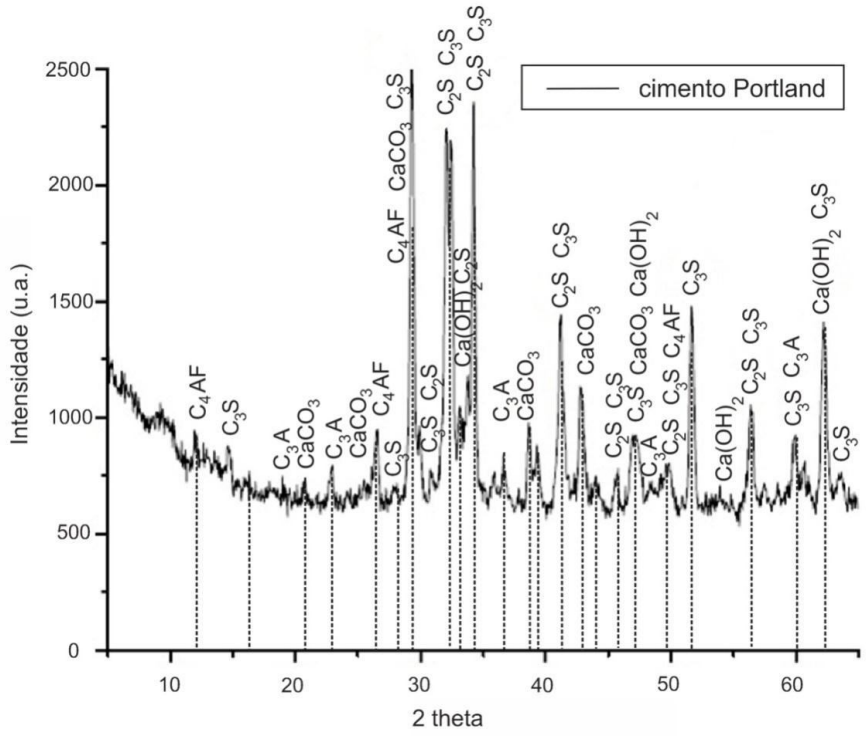


Gráfico 5.8 – Difratograma de raios-x do Cimento *Portland* CP-V ARI.
Fonte: Dados da pesquisa

No Gráfico 5.9, observa-se picos característicos dos polímeros PVA e PVAc.

A emulsão polimérica foi ensaiada conforme fornecida pelo fabricante e também como filme, após secagem em mufla à temperatura de aproximadamente 40° C, por períodos de 24 horas e 48 horas.

Os resultados não diferem significativamente. A amostra em filme não apresentou aumento significativo na cristalinidade quando comparada às demais. Os dados foram suavizados para permitir uma avaliação qualitativa da cristalinidade através da observação do alargamento dos picos.

Quanto mais estreitos os picos, maior o grau de organização da estrutura. A cristalinidade está diretamente relacionada ao grau de hidrólise devido às fortes interações resultantes das ligações de hidrogênio.

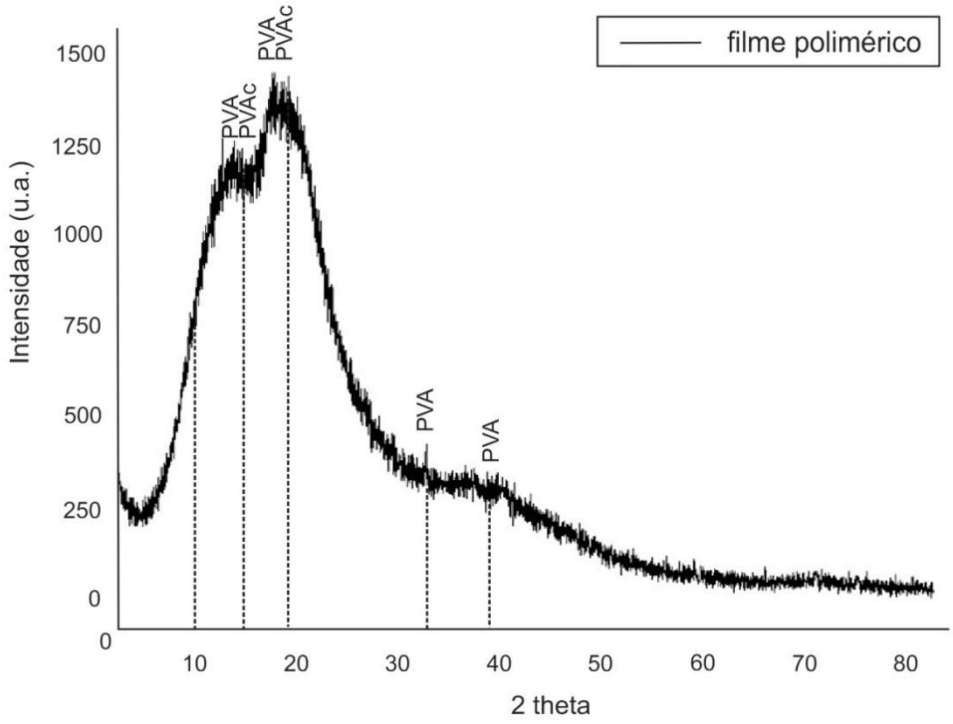


Gráfico 5.9 – Difratograma de raios-x do filme polimérico.
Fonte: Dados da pesquisa

Nos materiais amorfos, picos bem definidos são substituídos por um ou dois picos alargados centrados e próximos aos picos principais dos materiais. Quanto maior o grau de hidrólise, mais estreitos e agudos são os picos e maior o número de hidroxilas disponíveis para ligação, maior alinhamento das cadeias pela formação de ligações de hidrogênio entre estes grupos e, consequentemente, aumento na cristalinidade (MANSUR, 2007).

5.2.1 Comparativo entre os resultados difratoméricos dos compósitos de referência e descartados

O objetivo deste estudo comparativo é relacionar os resultados obtidos a partir dos compósitos de referência (BR1/BR2), com aqueles produzidos contendo fibras das embalagens descartadas (DES1/DES2) para ambas as formulações. Padrões de difração de raios-X obtidos para as pastas com e sem adição de PVA foram identificados. No Gráfico 5.10, pode-se observar que os compósitos de referência apresentaram picos característicos da presença de quartzo, caulinita e outros componentes do cimento e areia, materiais constituintes do compósito.

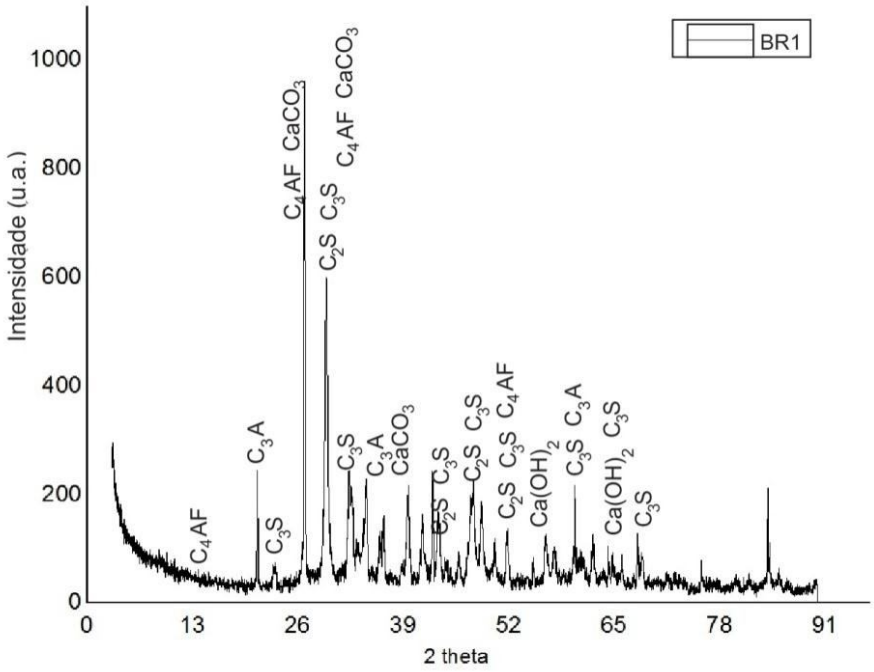


Gráfico 5.10 – Difratograma de compósito de referência (BR1)
Fonte: Dados da pesquisa

Cargas ou agentes de reforço particulados, em geral, apresentam energia livre superficial maior do que a de alguns polímeros e podem auxiliar na cristalização polimérica, atuando como nucleadores (CANEVAROLO, 2004). Este efeito sobre a matriz pode ser observado a partir do momento que os principais picos de BR1 presentes no compósito DES1 (Gráfico 5.11).

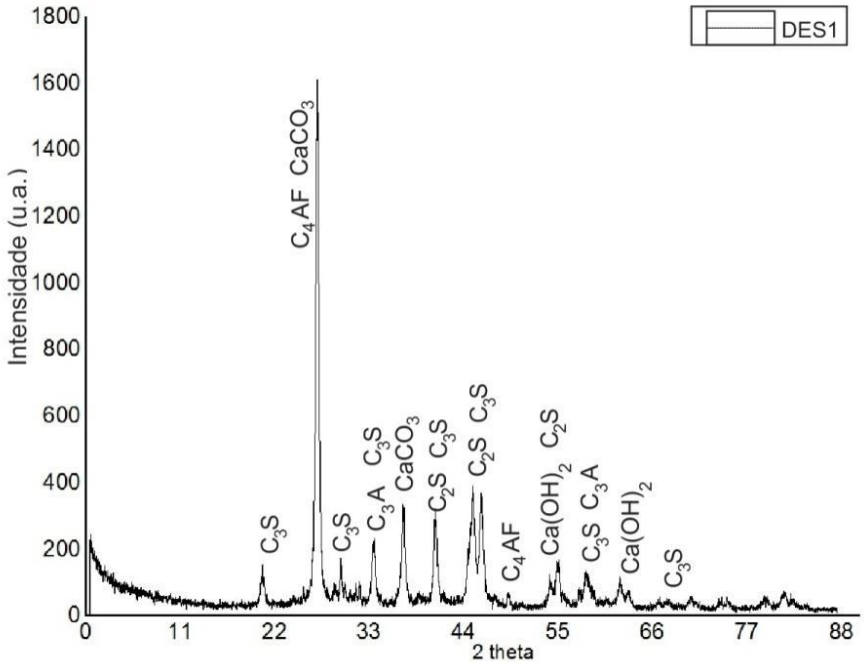


Gráfico 5.11 – Difratograma de amostra de compósito DES1
Fonte: Dados da pesquisa

A análise dos compósitos do Grupo 2, apresentada nos Gráficos 5.12 e 5.13, a maior parte dos picos identificada no compósito de referência (BR2) foi verificada nos compósitos com acréscimo de fibras (DES2).

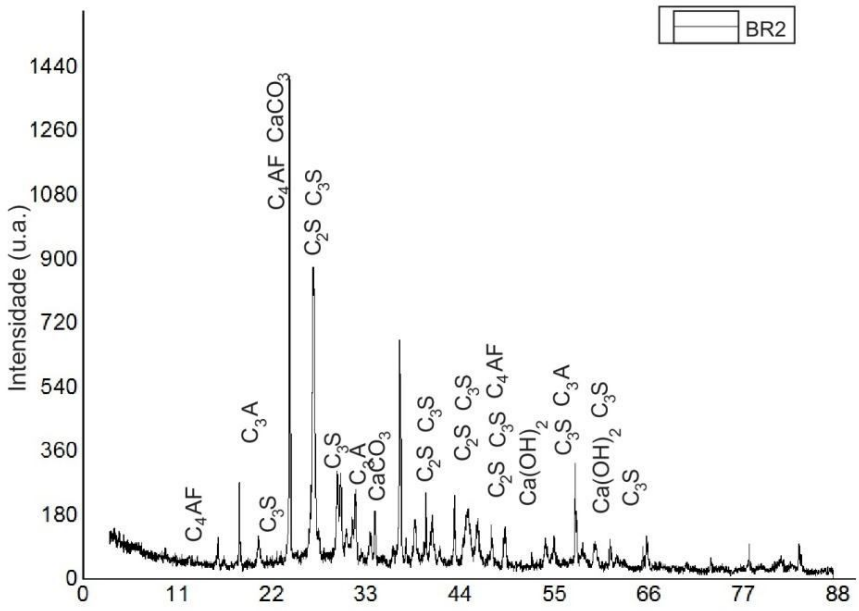


Gráfico 5.12 – Difratograma de amostra de compósito BR2
Fonte: Dados da pesquisa

No caso do compósito com percentual fibroso de 4% (DES1) – Apêndice A, observa-se que o acréscimo produziu alterações pouco significativas, com a

diminuição da intensidade dos principais picos. Situação inversa ocorre nos compósitos com acréscimo fibroso de 12% (DES2), em que o aumento percentual de fibras interferiu nos resultados, proporcionando maior cristalinidade nos compósitos (aumento na intensidade dos picos).

Há um significativo aumento na cristalinidade observado também no difratograma apresentado no Apêndice B.

Entre os compósitos com acréscimo fibroso, aqueles que receberam a fibra *kraft (*KF1> KF2) apresentaram picos mais pronunciados. Entre os compósitos preparados com fibras provenientes de embalagens de reensaque, os que receberam maio percentual fibroso apresentaram picos menos intensos.

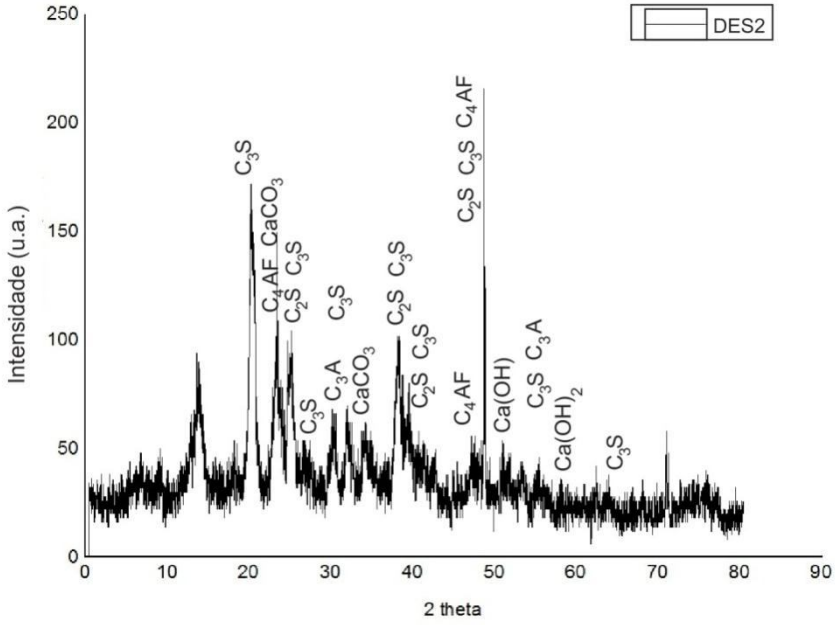


Gráfico 5.13 - Difratograma de amostra de compósito DES2
Fonte: Dados da pesquisa

Da observação dos compósitos DES2 em resultado apresentado no Apêndice A, pode-se supor que o volume três vezes maior de fibras (mais leves que o cimento e a areia) pode tê-las levado a ocupar os espaços mais superficiais dos CPs, mascarando os picos típicos de materiais cimentícios.

5.3 MICROSCOPIA ÓPTICA (M.O.)

Na Figura 5.13, obtida através da Lupa espectroscópica *WILD HEERBRUG G*, pode-se observar a aparência tramada do papel *Kraft* utilizado nas amostras de embalagens de reensaque e descartadas.

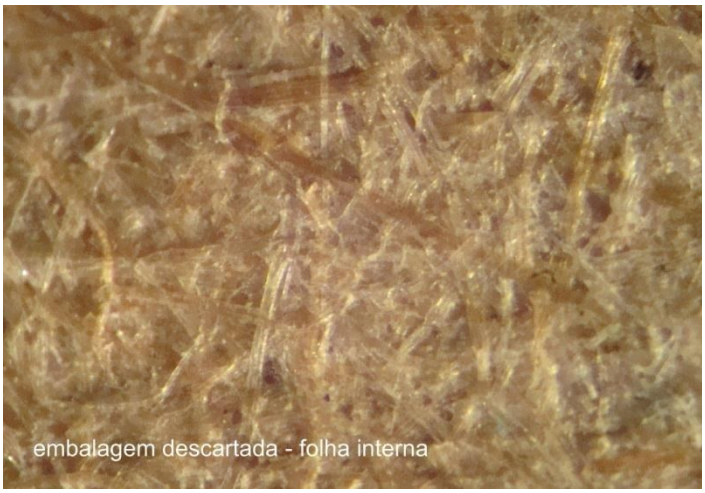


Figura 5.13 – M.O. da folha interna de embalagem descartada.
Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 5.14, obtida com a utilização da Lupa *Metrimpex Hungary* PZO, evidencia-se a ocorrência de bolhas superficiais de variados tamanhos, nos compósitos obtidos com fibras de embalagens de reensaque (RE1) e embalagens descartadas (DES1).

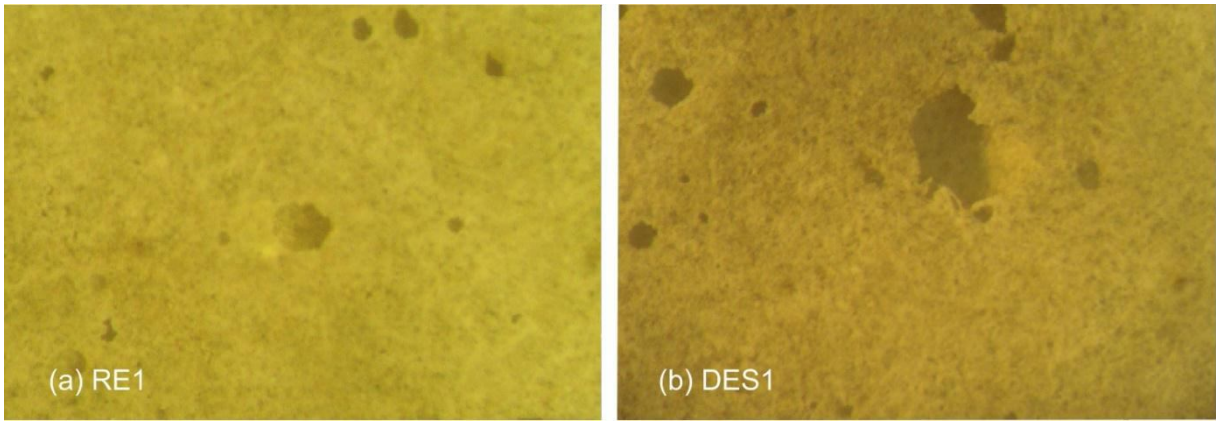


Figura 5.14 – (a) Aparência superficial homogênea com aparecimento de bolhas em CP do compósito RE1; (b) bolhas de maiores diâmetros na superfície do CP do compósito DES1.
Fonte: Dados da pesquisa
Nota: Obtenção: Lupa Metrimpex Hungary PZO.

No processo de hidratação para obtenção da argamassa, as amostras que

apresentaram relação a/c mais adequada à trabalhabilidade e à moldagem dos corpos de prova foram obtidas para teores que variaram entre 0,7% (adição de 4%), e 3,2% (adição de 12%) de polpa fibrosa.

Na figura 5.15, nota-se a ocorrência de bolhas maiores e em maior quantidade nos compósitos com maior acréscimo fibroso, resultado da inclusão de água em quantidades acima das utilizadas no preparo de argamassas, o que resultou em uma maior quantidade de vazios.

Em imagens do Grupo 1 (4% de fibras), pode ser observado que partículas fibrosas dispersas na matriz dos compósitos de forma homogênea colaboram contra a formação de bolhas e a propagação de trincas.

A Figura 5.15 apresenta a variabilidade dimensional das polpas desidratadas das fibras de embalagens de reensaque em aumentos de 50 e 80 vezes do natural, obtidas com a utilização da Lupa *Metrimpex Hungary* PZO.

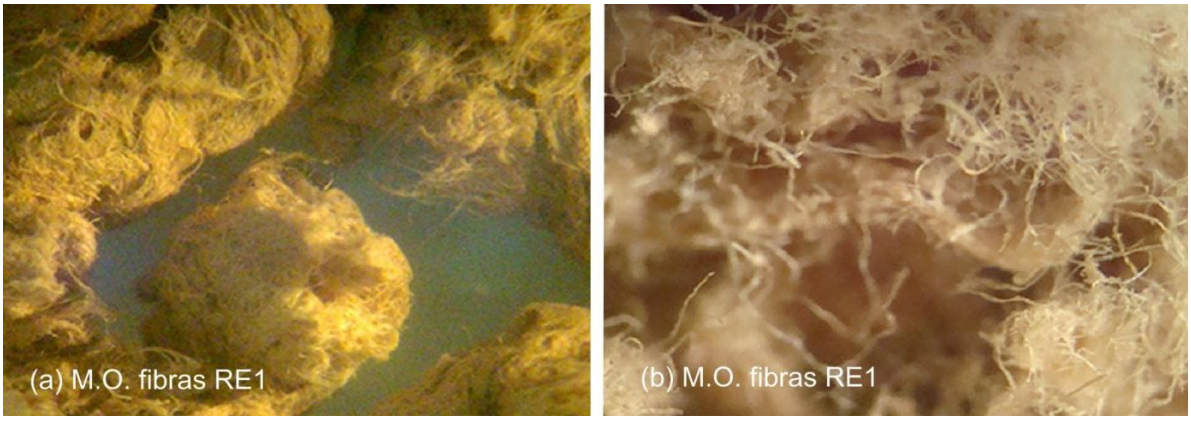


Figura 5.15 - Variabilidade dimensional das fibras.
Fonte: autor
Nota: (a) e (b) fibras de embalagens de reensaque.

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (M.E.V.)

A Figura 5.17 apresenta aspecto do filme produzido pela desidratação da emulsão polimérica à base de PVAc.

As imagens permitem visualizar o material polimérico finamente granulado e disperso de modo uniforme. No filme, não foram observados contornos das partículas do látex.

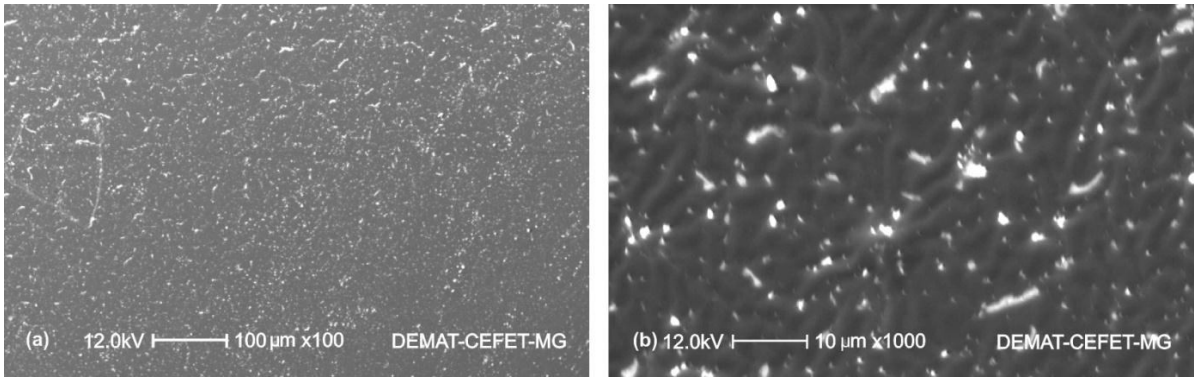


Figura 5.16 – M.E.V. do filme polimérico a base de PVAc.
Fonte: autor
Nota: (a) aumento de 100 vezes; (b) aumento de 1000 vezes.

A Figura 5.17 evidencia a variabilidade dimensional característica das fibras lignocelulósicas em (a) imagem superficial do papel *kraft* e (b) detalhe do aspecto proporcionado pelas tintas de impressão em embalagens descartadas.

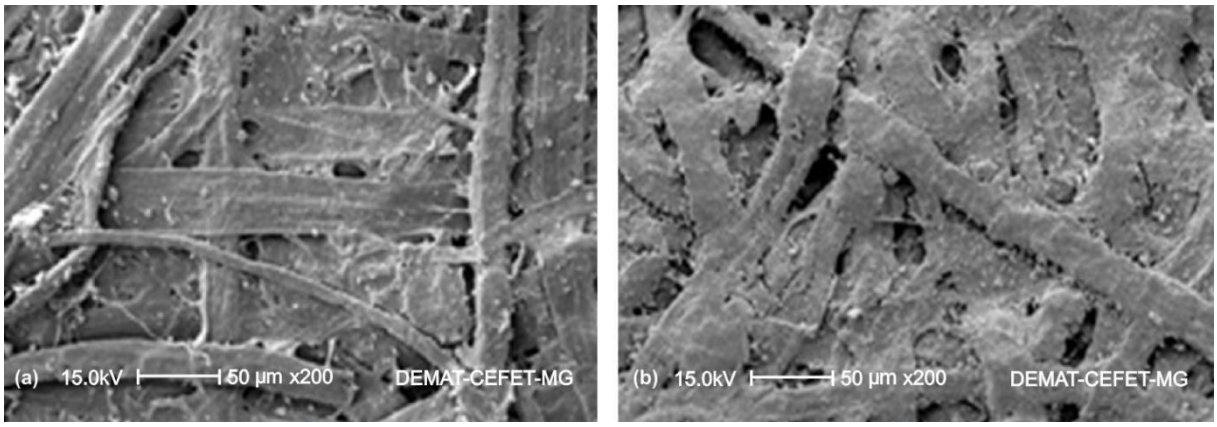


Figura 5.17 **–** M.E.V. de papel *kraft* e embalagem descartada de cimento em aumentos de 200 vezes.
Fonte: autor
Nota: (a) folha interna; (b) detalhe com pigmentação em folha externa.

Na maioria das embalagens de cimento nacionais utiliza-se uma ou duas cores de impressão para identificação externa. Não foi possível obter junto aos fabricantes de embalagens sua composição. Pôde-se observar que essas tintas se dispersam na água de preparo da polpa.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), os pigmentos orgânicos ou sintéticos utilizados têm como característica funcional o fornecimento de cor a diferentes materiais e substratos, não são específicos para a sacaria de cimento. (ABIQUIM, 2012).

O pH dos óxidos utilizados no preparo das tintas pode variar de acordo com a

aplicação. Em geral, são utilizados em sistemas cujo solvente é aquoso. Devido à necessidade de opacidade e poder de cobertura, são combinados com pigmentos orgânicos e corantes para uma cobertura de fundo uniforme e redução dos custos.

Existem óxidos amarelos, utilizados na composição das tintas verde e vermelha, constituídos por FeZnO e Fe(MnO_4), especiais para altas resistências térmicas, um comportamento desejável em face do processo de ensacamento das embalagens de cimento (ABIQUIM, 2012). Esses elementos não foram identificados nas análises de difração das embalagens, o que sugere sua provável dispersão na água utilizada para o preparo da polpa.

5.4.1 ASPECTOS SUPERFICIAIS COMPÓSITOS BR1 e DES1

Na Figura 5.18, fotomicrografias destacam em (a) a variabilidade dimensional das fibras celulósicas e o aparecimento de bolhas superficiais nos compósitos de referência e a textura fibrosa superficial aerada nas áreas de fratura do compósito RE2 (12% de fibras). Em (b) detalhe do ponto de ruptura com características recorrentes nos materiais produzidos com maior teor de fibras (DES2) provavelmente decorrente da dificuldade de obter a perfeita homogeneização entre fibras e matriz. As amostras não condutoras dos compósitos receberam recobrimento em ouro (processo *sputterin)*, operou-se com vácuo de 10^{-2}.

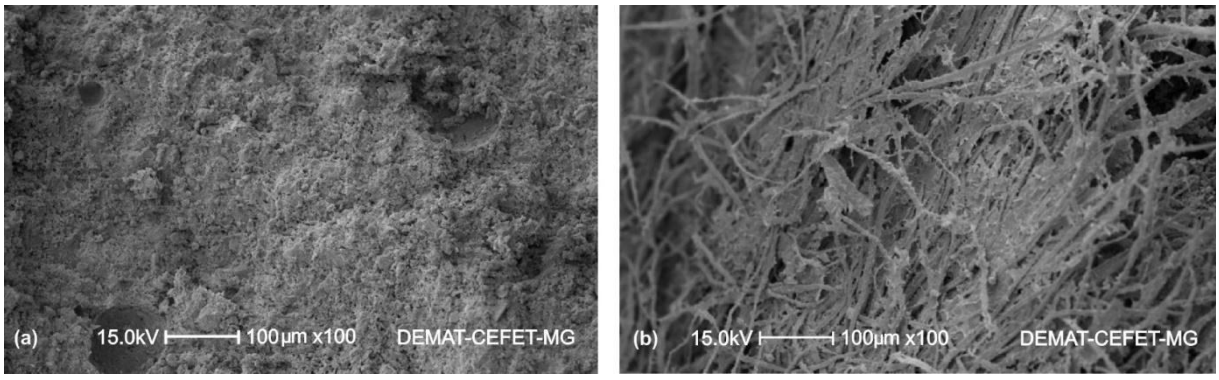


Figura 5.18 – Bolhas superficiais no compósito RE1 e variabilidade dimensional das fibras celulósicas.
Fonte: Dados da pesquisa
Nota: (a) Aspecto superficial e dimensionamento de bolhas superficiais do compósito BR1; (b) Área de fratura do compósito DES1 (12% de fibras).

Fibras vegetais são constituídas por células individuais formadas por microfibrilas, dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As células das fibras celulósicas residuais têm de 10 a 25 µm de diâmetro e são compostas por quatro camadas de microfibrilas. A interface é a

região mais solicitada por esforços de cisalhamento (MANSUR, 2007). O arrancamento das fibras depende de sua natureza e distribuição, e a principal consequência é a perda da resistência mecânica e aderência à matriz (MANSUR, 2007).

Na Figura 5.19, detalhes de área de ruptura de amostra do compósito RE2 (12% de fibras), apresenta aspecto da fibra após romper-se, em aumentos de 1000 e 5000 vezes.

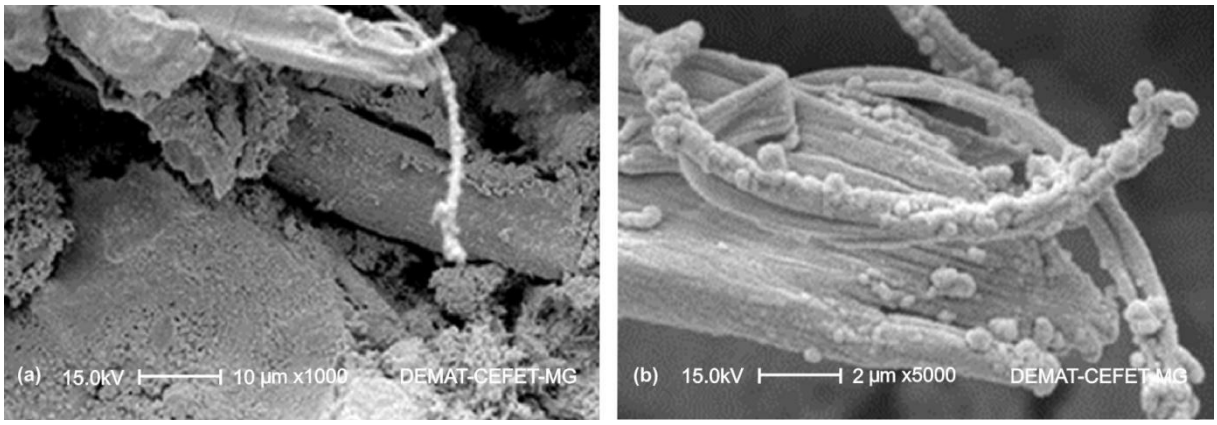


Figura 5.19 – Fotomicrografias de região fraturada do compósito RE2
Fonte: Dados da pesquisa

Nas fibras residuais de celulose de eucalipto, a relação de aspecto (critério que avalia o comprimento médio das fibras em relação à espessura) é de 61 vezes, com o comprimento médio de 0,66 mm e espessura média de 10,9 µm (FOELKEL, 2007).

Na Figura 5.20, observa-se detalhes superficiais da zona de transição matriz-agregado de amostra do compósito DES1 (4% de fibras) para comparação com a zona de transição da amostra do compósito DES2 (12% de fibras), apresenta uma quantidade maior de espaços vazios entre os componentes.

Na fotomicrografia do compósito DES2 (b), elementos com aparência de ouriço do mar podem ser observados, ligados de diferentes formas às superfícies porosas de fibras, agregados e outros materiais.

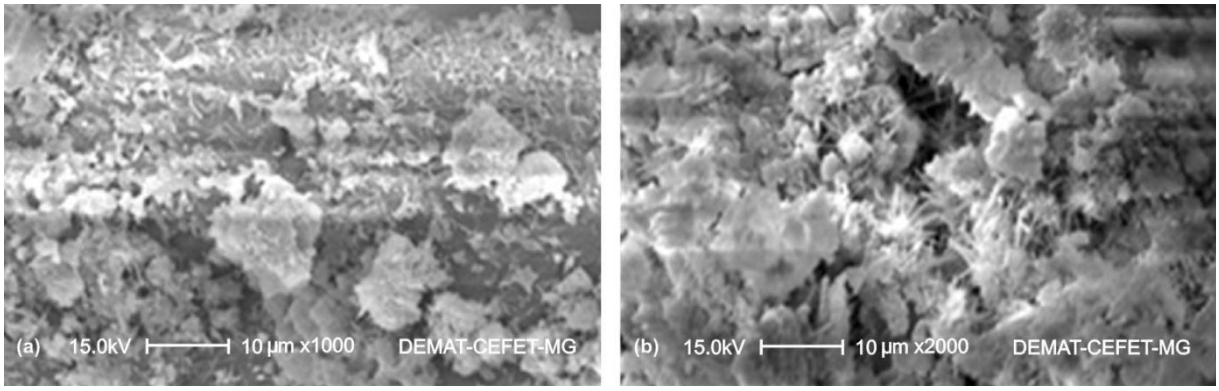


Figura 5.20 - Fotomicrografias de regiões de transição (a) dos compósitos DES1 e (b) DES2.
Fonte: Dados da pesquisa

5.5 POTENCIAL HIDROGÊNIO IÔNICO (pH)

Determinou-se o potencial hidrogênio iônico de amostras da emulsão polimérica e da água utilizada no preparo das polpas fibrosas. Os resultados obtidos têm grau de certeza de 99,45% e se encontram na Tabela 5.6:

Tabela 5.6 - pH da emulsão polimérica e de águas drenadas no preparo de polpas.

Amostras	pH (Valor Médio)
Emulsão à base de PVAc	4,4 ± 0,01 unidades de pH
KF1 e KF2	7,1 ± 0,01 unidades de pH
RE1 e RE2	7,0 ± 0,01 unidades de pH
DES1 e DES2	11,0 ± 0,01 unidades de pH

Fonte: Dados da pesquisa

Na Ficha de especificações da emulsão polimérica à base de PVAc (apresentada no ANEXO B deste documento), o fabricante informa que o pH se encontra entre 4,0 e 5,0 (faixa característica de soluções ácidas).

Comparados os valores com os dados obtidos, pode-se afirmar que as análises realizadas em laboratório apresentaram valor de pH de acordo com especificações do fabricante.

O pH da água utilizada no preparo das polpas apresentou maior alcalinidade. Esse resultado pode ser atribuído à possibilidade de interferência da alcalinidade do próprio cimento residual na embalagem, da presença de outras substâncias impregnadas durante o manuseio do material e, até mesmo, devido à presença de tintas de impressão aplicadas na identidade visual das embalagens.

O cimento é, naturalmente, um meio de elevada alcalinidade (da ordem de 13,5) devido principalmente ao hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação, favorecida em ambiente de elevada alcalinidade (pH acima de 12).

A importância do conhecimento do pH dessas soluções adicionadas à pasta de cimento está relacionada à influência que poderia ocorrer no tempo de pega e na formação de novas fases na matriz (RIBEIRO, 2011).

5.6 TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

A análise termogravimétrica retrata as mudanças de massa devido a interações dos materiais com a atmosfera, vaporização e decomposição das amostras. Essas reações apresentam efeitos térmicos medidos pelo termopar.

A curva da areia fina lavada (Gráfico 5.14) permite observar que as variações de massa são sutis no início do aquecimento. A liberação da umidade ocorreu em dois estágios principais: um, a água é adsorvida a aproximadamente 100° C; outro, a água ligada em torno de 800° C. Em torno de 2% do material, sofreu degradação térmica logo de início com a perda de água livre até o final da banda associada à desidroxilação.

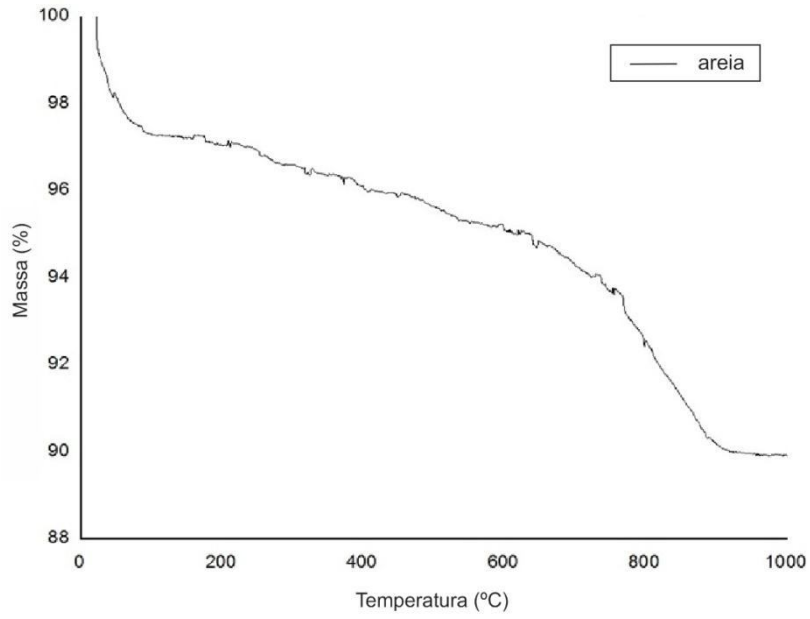


Gráfico 5.14 – TGA da areia.
Fonte: Dados da pesquisa

A estabilidade térmica das cargas de origem natural nas condições de processamento é de grande importância. Degradações acentuadas ocorrem durante o processamento, as propriedades mecânicas dos compósitos podem ficar comprometidas.

O Gráfico 5.15 expressa a TGA do filme polimérico à base de PVAc, com três etapas de perdas mais significativas de massa.

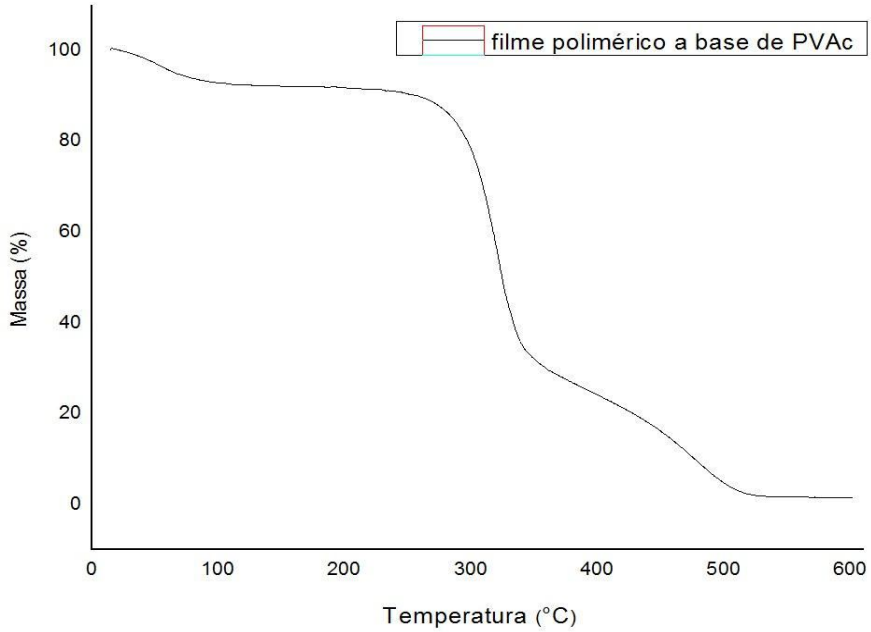


Gráfico 5.15 – TGA do filme polimérico (PVAc).
Fonte: Dados da pesquisa

A primeira perda significativa ocorreu no intervalo de temperatura compreendido entre a temperatura ambiente e 100° C; a segunda, entre 300° C e 390° C, ambas atribuídas à degradação térmica.

A última etapa de perda de massa ocorreu entre 490° C e 510° C correspondente, provavelmente, à oxidação do material gerado na decomposição (ROSSINI, 2005). Observou-se que esse comportamento de mudança de massa se verifica para todas as amostras de maneira semelhante.

A análise termogravimétrica do cimento *Porland* evidencia a descarbonatação do calcário, reação fortemente endotérmica, grande perda de massa ocorre entre 600° C e 800° C, como mostra o Gráfico 5.16. As variações de massa nas temperaturas demonstradas graficamente nos permitem atribuir (a essas variações de massa) a perda de umidade, a descarbonatação já citada e à provável formação de C_2S, que não envolvem perda significativa de massa e ocorrem acima de 1200° C

(RIEGEL et al., 2008). A primeira perda de massa significativa ocorre por volta de 100° C, evidenciando a perda de umidade; entre 300° C e 400° C ocorreu outra variação grande de massa indicando perda e, por conseguinte, degradação térmica.

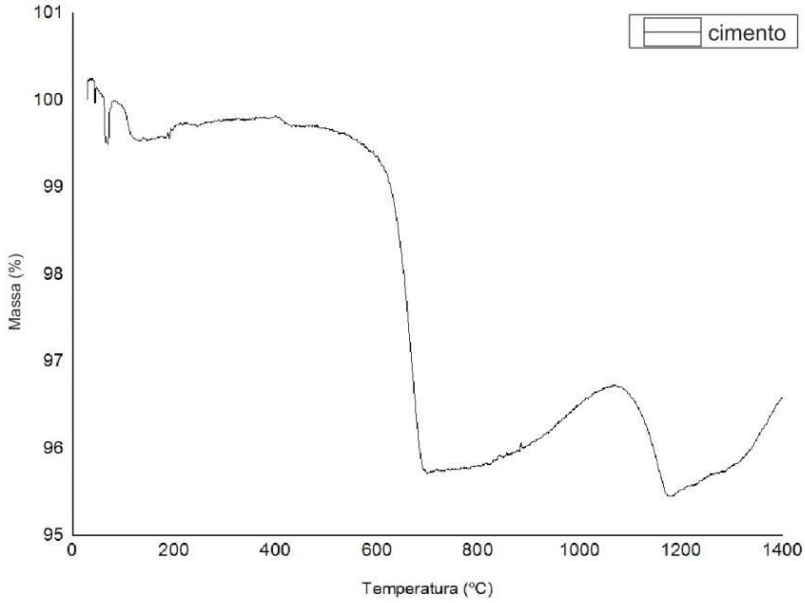


Gráfico 5.16 – TGA do cimento *Portland*
Fonte: Dados da pesquisa

Os Gráficos 5.17 e 5.18, a seguir, apresentam a termogravimetria das embalagens produzidas com papel *kraft*.

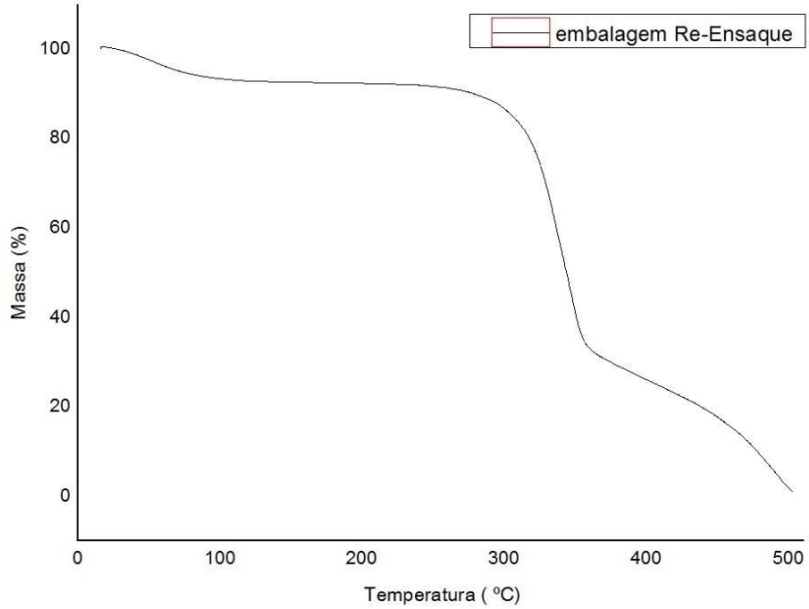


Gráfico 5.17 – TGA de embalagem de reensaque
Fonte: Dados da pesquisa

A degradação completa da amostra da embalagem de reensaque ocorreu em torno de 500° C. Para as embalagens descartadas (Gráfico 5.15), foi próximo aos 600° C, provavelmente por causa de resíduos incorporados ao papel.

Durante a decomposição dos resíduos, ocorre perda de massa pouco significativa, provavelmente devido à condensação dos componentes da lignina e sua aromatização a altas temperaturas, aliada à presença de cinza nas fibras (MARTIN et al., 2009).

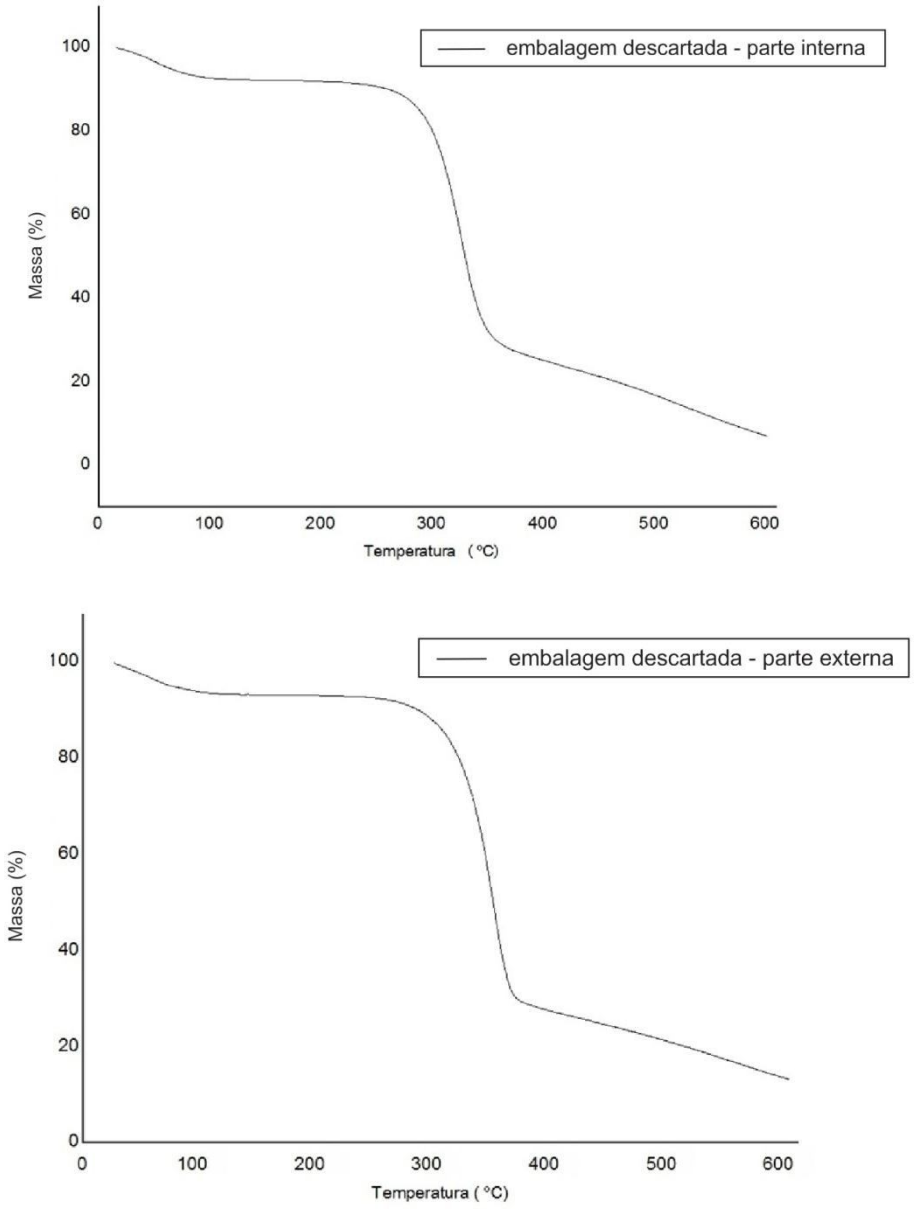


Gráfico 5.18 - TGA das embalagens descartadas - partes interna e externa
Fonte: Dados da pesquisa

5.7 DIFUSIVIDADE TÉRMICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO (MÉTODO *FLASH LASER)* e DENSIDADE (MÉTODO GEOMÉTRICO)

As transferências de calor através dos sólidos ocorrem por condução. Em geral, os materiais tornam-se mais condutores de energia térmica à medida que a temperatura aumenta. Nos sólidos porosos (considerados condutores), o processo de transporte molecular de calor é diferenciado. Como não há direções preferenciais, a condutividade térmica k ocorre em todas as direções. A condutividade dos concretos convencionais depende da composição (RODRIGUES e MARCHETTO, 2012).

A partir das placas dos compósitos BR1, BR2, DES1 e DES2, foram retiradas amostras cilíndricas com 8 mm de diâmetro (tolerância: + 0,001; - 0,100) e espessura na faixa de 2,5 a 3 mm. A espessura exata para o cálculo da difusividade térmica foi obtida no LMPT do CDTN, por meio de um micrômetro (resolução de 0,001 mm).

As faces foram planificadas em paralelo (tolerância de 0,005 mm). As superfícies das faces frontal e oposta foram selecionadas em locais onde não foram encontradas fissuras ou outros defeitos superficiais (uma das exigências para o ensaio é que o material deve ser homogêneo).

A medida de difusividade consiste, essencialmente, em determinar a relação tempo versus a diferença de temperatura entre o interior e a superfície de um corpo de prova, inicialmente a uma mesma temperatura, quando se altera a temperatura da superfície.

A difusividade térmica é diretamente proporcional à condutividade térmica e inversamente proporcional ao produto da massa específica e do calor específico. Ela representa a velocidade com que ocorrem variações de temperatura no interior de um corpo, indicando a facilidade que o mesmo tem de sofrer variações (NEVILLE, 1982).

Pode-se observar, no Gráfico 5.19, que os compósitos de referência apresentaram valores de difusividade térmica bastante próximos entre si e coerentes aos encontrados na literatura (a difusividade térmica para o concreto com agregado de quartzo é de 0,0079 m^s/h).

Os valores para os compósitos preparados com fibras de embalagens

descartadas são decrescentes em função das adições fibrosas, isto é, quanto maior adição, menor a difusividade térmica. Portanto, a adição de fibras de embalagens de cimento descartadas aumentou a capacidade de isolamento das placas.

Os compósitos DES1 (4% de fibras) e DES2 (12% de fibras) obtiveram, respectivamente, reduções de 55,3% e 30,3% em relação aos compósitos de referência.

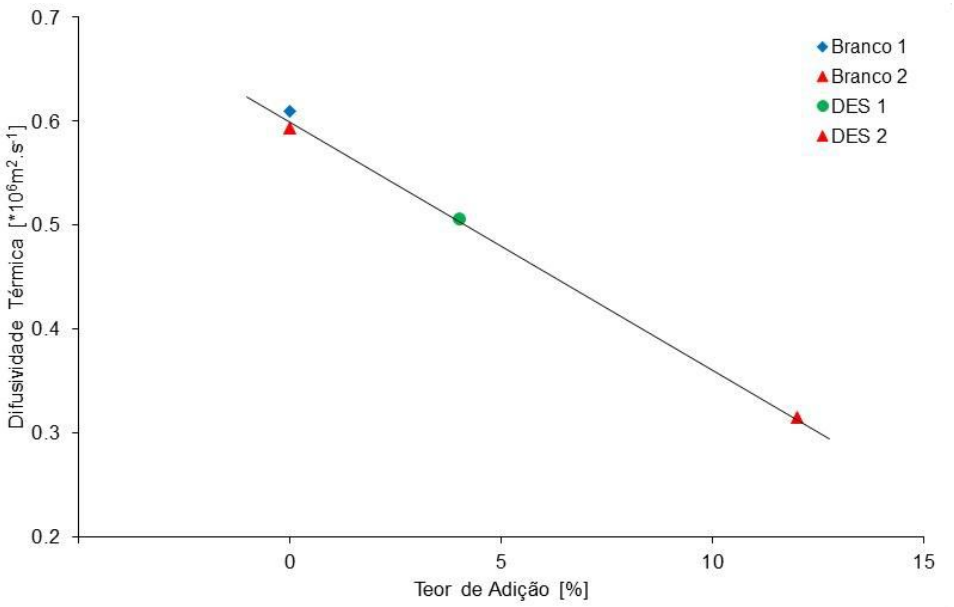


Gráfico 5.19 - Difusividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2)
Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 5.7, tem-se valores de difusividade térmica para os compósitos analisados. A variabilidade entre os corpos de prova de referência e aqueles produzidos com acréscimo fibroso foi inferior a 2% na espessura.

Tabela 5.7 – Difusividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2).

Amostra	**Fibras *Kraft* (%)**	**Espessura (m)**	**ΔT (^oC)**	**Temperatura efetiva (^oC)**	**Difusividade Térmica $*10^6 m^2.s^{-1}$**
Branco 1	0	0,003217	2,40	25	0,609
Branco 2	0	0,003216	2,32	25	0,594
DES 1	4	0,003216	2,83	25	0,506
DES 2	12	0,003252	2,72	25	0,315

Fonte: Dados da pesquisa

Os compósitos com acréscimo fibroso de 12% apresentaram os melhores resultados relativos para cada determinação, obteve-se metade do valor de

difusividade térmica, quando comparados aos compósitos de referência, e um quarto dos valores relativos ao Pirocerâmico 9606.

A condutividade térmica *k* é uma constante de proporcionalidade que relaciona o fluxo térmico *Q* com o gradiente térmico, calculada por meio da expressão:

$$k = difusividade\ x\ densidade\ x\ calor\ específico$$

Os compósitos de referência (BR1/BR2) apresentaram valores de condutividade térmica dentro do padrão para os concretos com agregados de quartzo.

Nos compósitos com percentual de adição de 4% de fibras (Grupo 1), a condutividade térmica foi de aproximadamente 1.1 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Os compósitos que receberam 12% de fibras (Grupo 2), apresentaram condutividade de 0.7 $W.m^{-1}.K^{-1}$, resultado inferior ao primeiro grupo em 60% e coerente com o acréscimo. A condutividade do concreto situa-se em torno de 1,750 W/m.°C. No Gráfico 5.20 observa-se que, conforme esperado, para maiores proporções de fibras, menores os valores de condutividade térmica**:**

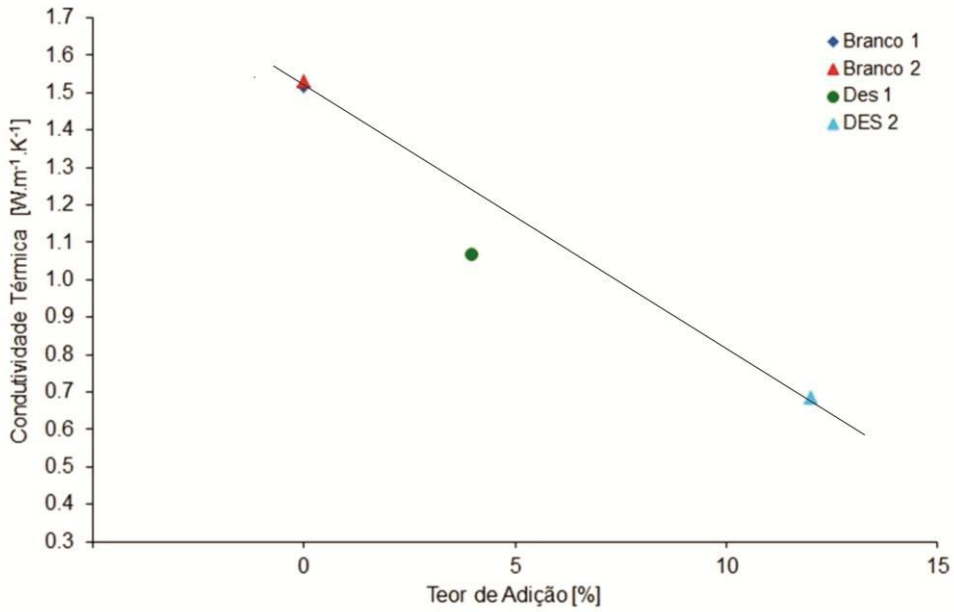


Gráfico 5.20 – Condutividade térmica dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2)
Fonte: Dados da pesquisa

Sabe-se que o calor específico aumenta com a elevação da temperatura e é consideravelmente maior com o aumento no teor de umidade (NEVILLE, 1982). Nos materiais da construção civil, essa variação é considerável.

O calor específico do concreto situa-se em torno de 1000 J.kg-1/m³. No Gráfico 5.21, observa-se os valores de calor específico para os compósitos de referência BR1 e BR2), de aproximadamente 1400 J.kg-1/m³.

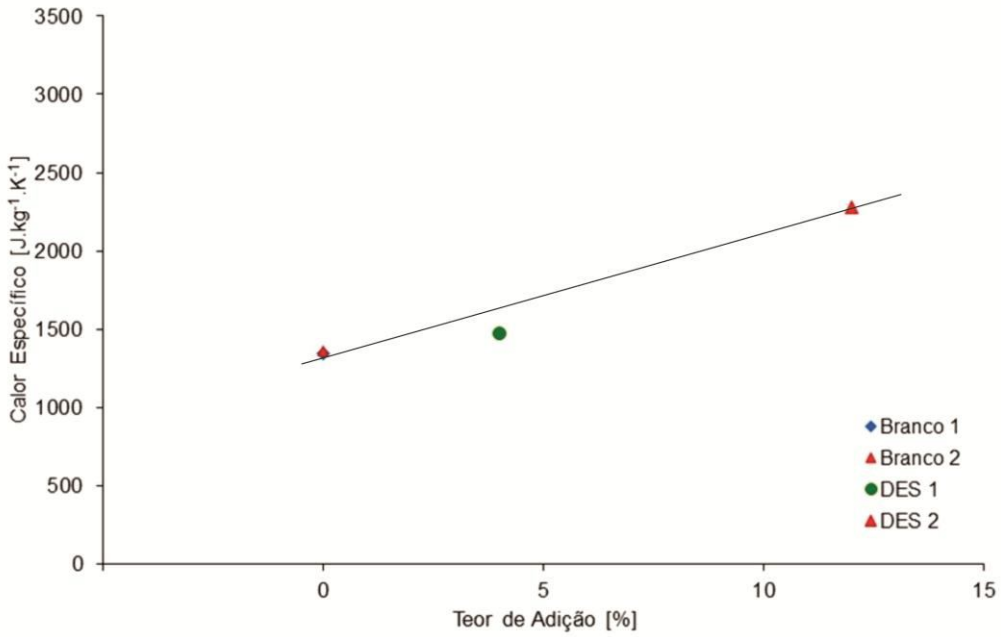


Gráfico 5.21 - Calor Específico dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2)
Fonte: Dados da pesquisa

O calor específico dos compósitos de referência e dos compósitos com fibras descartadas foi sensível às adições, apresentou-se resultados proporcionais aos acréscimos. Os compósitos DES1 e DES2 também apresentaram resultados coerentes e proporcionais ao acréscimo fibroso. Para aumento de 4% de fibras (DES1), identificou-se o valor de aproximadamente 1500 J.kg-1/m³ e para DES2 o valor ficou em torno de 2300 J.kg-1/m³ (quase 60% maior).

A densidade é a razão entre a massa e o volume de determinado material. Ela aumenta com o acréscimo de partículas pequenas de agregado, pois elas preenchem os espaços entre as maiores. Aglomerações mais densas ajudam no preenchimento de vazios, que são indesejáveis no concreto por permitirem a penetração de água, enfraquecendo e causando trincas nas estruturas.

A densidade foi determinada por meio de balança analítica (resolução de 0,0001 g) e micrômetro (resolução de 0,001 mm). Determinou-se a difusividade térmica e o calor específico por meio da chamada "*Flash Laser Calorimetry".* Utilizou-se os dados obtidos para o Pirocerâmico 9606 como referência para as

medições, apresentados na Tabela 5.8:

Tabela 5.8 – Dados do Pirocerâmico 9606 para comparação com os compósitos

Temperatura efetiva (°C)	Valores	Unidades
Cp / 25ºC	800	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
α / 25ºC	1.926	$x10^{6}m^{2}.s^{-1}$
κ / 25ºC	4.009	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ / 25ºC	2602	$Kg.m^{-3}$
L	0.0025	m

Fonte: NETZSCH, 2011, p.2

As densidades ρ (geometricamente determinadas) foram calculadas empregando-se a expressão $\rho = 4.m / \pi.d^2.L$, onde *m* é a massa média, *d* o diâmetro médio e *L* a espessura média da amostra. O Gráfico 5.22 apresenta os resultados dos cálculos da densidade dos compósitos.

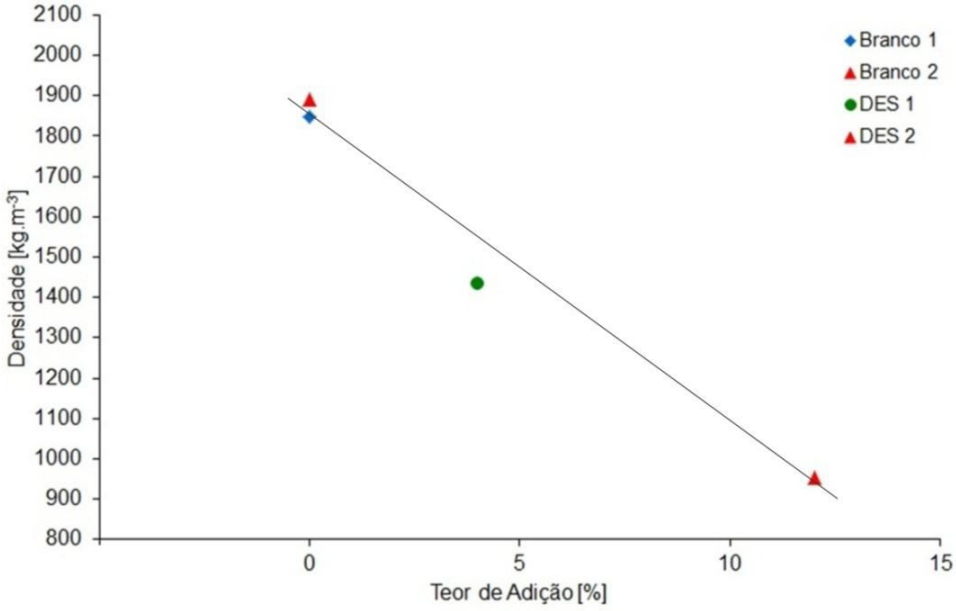


Gráfico 5.22 - Densidade dos compósitos (BR1/BR2/DES1/DES2)
Fonte: Dados da pesquisa

A densidade do quartzo é aproximadamente 2650 kg^{-1}/m^3. A densidade aparente de um solo mineral fica entre 1000 e 1600 kg^{-1}/m^3. Os valores obtidos para os corpos de prova BR1 e BR2 se situam entre 1800 e 1900 kg^{-1}/m^3. Os compósitos com 4% de fibras (DES1) obtiveram resultados entre 1400 e 1500 kg^{-1}/m^3 e aqueles com acréscimo de 12% de fibras (DES2) situaram-se entre 900 e 1000 kg^{-1}/m^3.

Nesse experimento, verificou-se que, para maiores adições fibrosas, menores os valores da densidade. Ao observar os compósitos com adições de 4 e 12%, tem-se que DES1 é aproximadamente 50% mais denso que DES2.

5.8 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO SIMPLES

Os resultados obtidos nesses ensaios podem variar com a temperatura, a velocidade de aplicação de carga, defeitos superficiais, características microscópicas e, principalmente, com a geometria da seção transversal da amostra.Também apresentam variação com relação a parâmetros microestruturais, tensões residuais por processos de manufatura e são dependentes das condições de operação, aferição dos equipamentos, manuseio durante a operação e variações de temperatura, entre outros.

Contrastando com os ensaios que aplicam aos corpos de prova exclusivamente tensões normais como a tração e a compressão, o ensaio de flexão impõe, sobre a seção transversal, níveis de tensões trativas, compressivas e cisalhantes ao mesmo tempo. Alguns dos principais resultados do ensaio de flexão são o módulo de resiliência à ruptura – MOR, a elasticidade em flexão – MOE e o módulo de tenacidade. O limite de elasticidade em flexão é a máxima tensão de flexão que o material suporta sem apresentar deformação permanente após a retirada da carga e o módulo de elasticidade em flexão representa a relação entre tensão e deformação dentro da região de comportamento elástico (GARCIA et al., 2012).

Os resultados foram apresentados através de gráficos de barras de erros com representação do desvio padrão dessas interações. Os números nos eixos estão em potência da dez. A partir dos resultados dos ensaios de flexão simples, determinou-se a significância das diferenças entre os compósitos de referência e aqueles com acréscimo de fibras, para os dois Grupos.

5.8.1 Comportamentos dos compósitos em flexão

Utilizou-se corpos de prova, de cada formulação, para determinação do comportamento em flexão até a fratura.

Pode-se observar nos Apêndices D e E que as curvas obtidas para os

compósitos de referência são características de materiais que rompem de forma frágil, a partir de tensões levemente pronunciadas. com valores máximos próximos a 0,20 MPa/mm. A região de pico dos compósitos com acréscimo de PVAc e fibras ocorreu entre 1,0 e 0,7 MPa/mm para KF1 e RE1, um registro de elevação na resistência mecânica de, respectivamente, 500% e 350%.

O comportamento dos compósitos com acréscimo de 4% de fibras descartadas (DES1) apresentaram valores de tensão menos elevados que os compósitos com a mesma proporção de adição de fibras de reensaque (RE1). A presença das fibras em maior volume, porém, colabora para que as fraturas não ocorram de forma frágil.

Mesmo considerando-se um percentual de erro experimental estimado em aproximadamente 10% nas medidas (Apêndice C), as composições formuladas com 4% de fibras de embalagens de reensaque (RE1) apresentaram valores médios mais elevados que as formulações contendo fibras de embalagens descartadas (DES1).

Comparativamente aos compósitos com acréscimo fibroso, as curvas da Tensão (MPa) versus Deflexão (mm) nos compósitos BR2 (Apêndice E) e RE2 apresentaram alteração significativa nos resultados, com deflexões entre 0,20 e 0,35 MPa/mm, porém, com tensão suportada em dobro pelo KF2 (Gráfico 5.16).

Pode-se observar também pelas curvas sinuosas dos compósitos com acréscimo fibroso dos Grupos 1 e 2, que houve um crescimento na resistência mecânica à flexão nos compósitos com maior proporção de fibras (12%).

Uma comparação entre os compósitos de referência dos dois Grupos (Apêndice D e Apêndice E) permite observar que o melhor resultado geral é apresentado pelos compósitos produzidos com embalagens de reensaque (RE2) e descartadas (DES2). Porém, a variabilidade dos resultados obtidos para esses grupos de amostras em análise não permite afirmar quais foram as amostras produzidas com acréscimo fibroso que demonstraram maior resistência às deformações sob flexão, uma vez que não foram ensaiados corpos de prova com os dois valores percentuais de acréscimo para ambos os grupos.

O experimento tem importância por sinalizar que alterações no processo de produção podem ser responsáveis pela variabilidade nos resultados. Uma das hipóteses para estas variações seria que, com a evaporação da água de

amolecimento, formou-se um grande número de regiões “aeradas” na argamassa. Esse acúmulo pode ter permitido a fragilização dos conjuntos.

5.8.2 Módulo de ruptura – Tensão máxima (MPa)

As características de deformação do material são determinadas em função da flexa máxima atingida no ensaio. Quanto maior o comprimento útil do corpo-de-prova, maior será a facilidade de medir a deformação, o que possibilita a execução deste ensaio em materiais frágeis.

O valor da flecha varia com a seção transversal do corpo de prova, em função da geometria da seção transversal do corpo de prova ($I_z = b.h^3/12$). O valor da flecha máxima para seções retangulares considera os valores da força (carga) sobre a variação da deflexão (depende do módulo de elasticidade).

No cálculo da tensão normal, na seção transversal, analisando o elemento de volume, mostrado nos gráficos de médias para cada, tem-se que as fibras superiores à linha neutra são comprimidas e as fibras inferiores são tracionadas.

A tensão em qualquer fibra é proporcional à sua distância da linha neutra e as forças distribuídas na seção transversal são representadas por um somatório interno que equilibra o externo (momento fletor – resultante das forças normais atuantes na seção transversal do CP).

A tensão normal na linha neutra (y = 0) tem valor numérico nulo.

Valores negativos de y correspondem à região em que as fibras estão comprimidas e valores positivos correspondem à tração.

A deformação depende da geometria da seção transversal.

Deve-se considerar que o momento de inércia reflete a resistência da seção transversal ao giro na deformação à flexão.

Se considerarmos $y = y_{LN}$ (linha neutra), tanto para a superfície externa tracionada quanto para a superfície interna comprimida, o ponto de deformação máxima representa o valor máximo da tensão de tração e compressão atuantes na seção transversal do corpo de prova no ensaio de flexão.

O módulo de ruptura ou resistência a flexão (MOR) é o valor máximo da tensão de tração ou compressão nas fibras externas do corpo de prova no ensaio de flexão. A tensão de flexão máxima, conforme a equação abaixo, é dada por:

$$MOR = Mfmax/Iz = yLN \quad (4)$$

onde MOR é o módulo de ruptura dado em pascal (Pa).

As características de deformação do material são determinadas em função da flecha (translação vertical) máxima atingida no ensaio (GARCIA et al., 2012).

Os resultados dos ensaios mecânicos, com indicação do desvio padrão das médias amostrais, são apresentados para todos os materiais fabricados. Da análise dos Gráficos 5.23 e 5.24, pode-se obter que as amplitudes (menor valor subtraído do maior valor) nos resultados dos compósitos de embalagens de reensaque (RE1 e RE2) e de embalagens descartadas (DES1 e DES2) variam consideravelmente de um grupo para outro.

Tabela 5.9 - Resultados de tensão máxima do Grupo 1.

Tensão Mx (MPa)		
Grupo 1	**Média**	**Desvio Padrão**
BR1	6.67	0.97
KF1	7.23	1.84
RE1	5.27	0.96
DES1	3.55	0.12

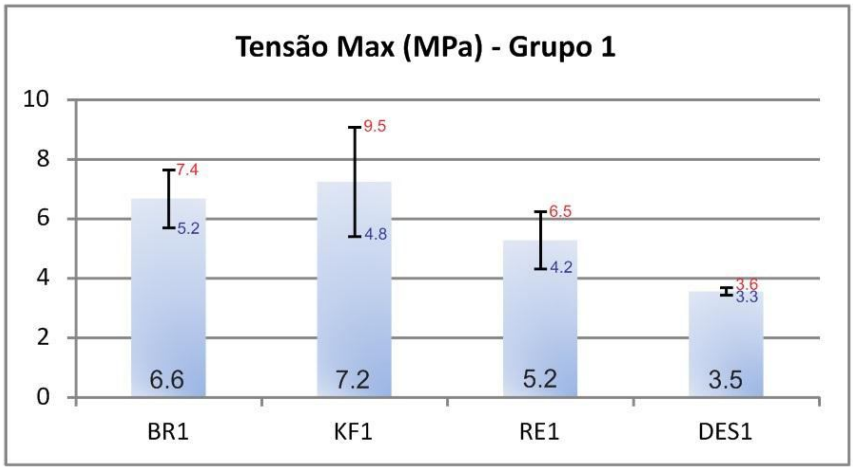


Gráfico 5.23 - Compósitos do Grupo 1 - Tensão Máxima (MPa).

Fonte: Dados da pesquisa

Os resultados que apresentam a menor variabilidade foram os obtidos a partir das amostras DES1 e RE2, o que denota uma produção homogênea. Verifica-se que a tensão máxima dos compósitos diminui aproximadamente 30% com o aumento do percentual fibroso.

Tabela 5.10 - Resultados de tensão máxima do Grupo 2.

Tensão Mx (MPa)		
Grupo 2	**Média**	**Desvio Padrão**
BR2	5.97	1.86
KF2	6.71	1.07
RE2	3.55	0.12
DES2	2.86	0.56

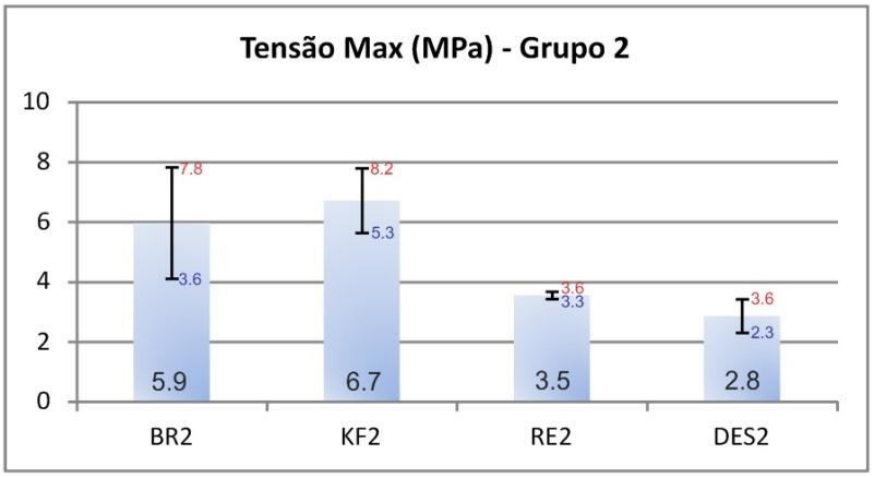


Gráfico 5.24 - Compósitos do Grupo 2 - Tensão Máxima (MPa).
Fonte: Dados da pesquisa

O aumento na proporção de carga aumenta a área interfacial entre a matriz e a carga hidrofílica, aumentando a fragilidade e reduzindo a tensão máxima suportada pelo compósito. Além disso a adição de carga hidrofílica leva à formação de regiões de micro-vazios entre matriz e carga, o que interfere na distribuição da força nos testes, reduzindo a resistência mecânica dos compósitos de maior acréscimo de fibras.

Os compósitos com adição de fibra *kraft* revelaram os maiores desvios amostrais do Grupo 1, o que pode ser resultado de uma dispersão incorreta das fibras no local próximo ao centro dos corpos de prova.

Entre os compósitos de referência (BR1 e BR2), sob esforços de tensão, a variação mais pronunciada ocorre nos corpos de prova do Grupo 2 (mistura com maior quantidade de cimento).

A média nos resultados obtidos nas formulações contendo fibras *kraft* provenientes de embalagens de reensaque ou descartadas (RE1, RE2, DES1 e DES2) apresenta-se a mais equilibrada.

Os resultados decrescentes obtidos pelos compósitos que receberam acréscimo de cola e fibras também pode estar relacionado ao volume de ar

incorporado na argamassa. Dessa percepção, depreende-se que uma alteração no fator a/c, p/c e adoção de procedimentos de diminuição do ar incorporado durante a moldagem (vácuo) podem se apresentar como boas alternativas de pesquisa.

Os valores de resistência à flexão obtidos por argamassas modificadas por pequenas quantidades de polímeros a base PVA são, segundo a bibliografia consultada, inferiores às argamassas de referência, e responsáveis por uma redução na resistência mecânica à flexão.

Ohama (1998) notou uma redução na resistência à flexão da ordem de 40% para cada 1% de adição de PVA (em relação à massa de cimento), enquanto KIM et al. (1999) obteve uma redução aproximada de 1 % para cada 1% de PVA.

Em outro trabalho, Kim et al. (1999) observou perda de resistência à compressão, ficou a resistência à flexão inalterada pela adição de PVA (p/c variando de 0 a 2%).

Segundo Mansur (2007), a perda de resistências mecânicas pela adição de PVA em pastas, argamassas e concretos produzidos pelo método tradicional é especialmente atribuída à redução da seção transversal resistente em função do ar incorporado na argamassa devido à atividade superficial dos polímeros. Além disso, poros são concentradores de tensões atuantes em corpos de prova prismáticos.

Para o teor de acréscimo de fibras de 4% (Grupo 1), houve um aumento na variância significativo no compósito com acréscimo da fibra *Kraft*, no que se refere à variabilidade dos resultados entre as amostras.

A diminuição aparente da força, nesses compósitos, pode estar associada à má distribuição das fibras na parte central de algumas das amostras, ocasionando menor capacidade de carga.

A adsorção e o molhamento da carga pelo polímero também influem no estado conformacional das macromoléculas e na cristalização do polímero, pode atuar como nucleantes heterogêneos. A resistência dessa ligação tende a ser baixa, a menos que haja um grande número de ângulos de reentrâncias na superfície da carga.

Observou-se que o acréscimo fibroso levou a uma diferença significativa entre as médias amostrais e que, apesar disso, os resultados para as amostras DES1 e DES2 foram os mais equilibrados do conjunto.

5.8.3 Módulo elástico – E (MOE)

A medida da flecha para cada carga aplicada permitiu a determinação do módulo de elasticidade do material, obtida a partir da aplicação da equação geral (GARCIA et al., 2012).

No gráfico de barras, observa-se variações nos resultados das amostras KF1 e BR2, variabilidade nos resultados e baixo desempenho dos compósitos RE1, RE2, DES1 e DES2.

Sabe-se que uma das desvantagens das fibras naturais é o fato de serem hidrofílicas. O emprego de tratamentos de superfície dessas fibras (preparo prévio que altere a relação das mesmas com a alcalinidade do ambiente da matriz) pode melhorar a adesão entre fibra e matriz e, consequentemente, os resultados obtidos.

É necessário considerar que um elevado teor de fibras (volume de enchimento) nem sempre significa alto desempenho dos compósitos.

A pesquisa bibliográfica faz referência à mercerização como um tratamento popular as fibras naturais.

O método de remoção das ligações de hidrogênio presente na rede de fibras celulósicas pode ser responsável pelo aumento da rugosidade superficial, porém, esse tratamento retira porções de lignina, cera e óleos presentes na superfície externa da parede celular das fibras e da estrutura polimérica da celulose, reduzindo o comprimento das fibras. Isso pode comprometer as propriedades elásticas das mesmas, diminuindo a resistência mecânica apesar do aumento da carga de partículas (KU, 2011). Em geral, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento das fibras. Porém, pesquisadores também citam a tendência oposta, fator que pode ser atribuído a muitos fatores, principalmente à incompatibilidade entre as fases matriz e dispersa, devida a processos de fabricação e degradação das fibras, entre outros.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dos materiais em teste demonstraram que houve uma significativa variabilidade entre as amostras dos compósitos que receberam 4% de fibras de embalagens de reensaque (RE1), com maior redução nos compósitos DES1, RE2 e DES2. Os resultados médios obtidos por KF2 apresentaram mais que o dobro da variabilidade dos compósitos de melhor desempenho (KF1). Na determinação do módulo de elasticidade, os resultados mais

homogêneos foram obtidos pelos corpos de prova produzidos com embalagens de reensaque e descartadas (Gráfico 5.25 e Gráfico 5.26).

Tabela 5.11 - Resultados de Módulo elástico do Grupo 1.

Módulo Elástico - E (GPa)		
Grupo 1	**Média**	**Desvio Padrão**
BR1	14641	1799
KF1	14701	12355
RE1	2339	645
DES1	1286	194

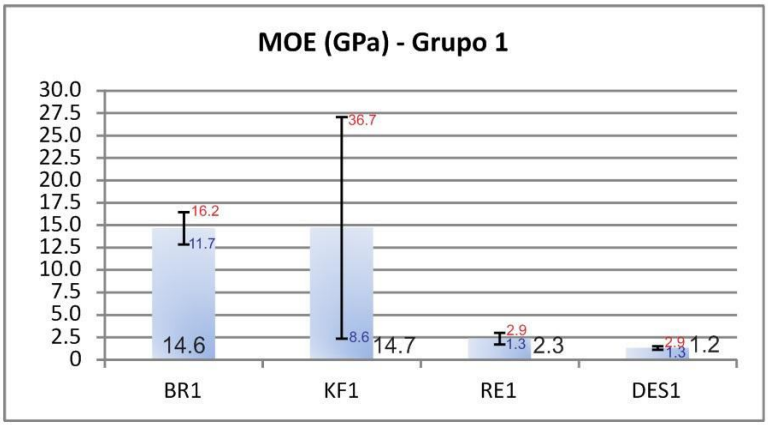


Gráfico 5.25 **–** Resultados de MOE (em GPa) Grupo 1.
Fonte: Dados da pesquisa

Tabela – 5.12 - Resultados de Módulo elástico do Grupo 2.

Módulo Elástico - E (GPa)		
Grupo 2	**Média**	**Desvio Padrão**
BR2	17309	6174
KF2	5519	2669
RE2	1286	194
DES2	35	10

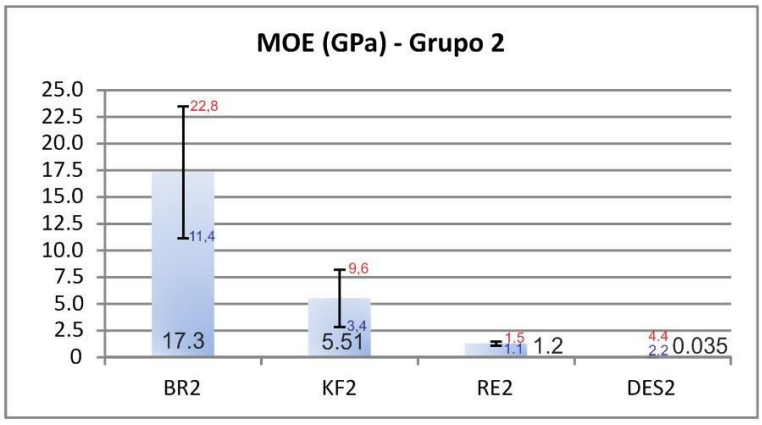


Gráfico 5.26 – Resultados de MOE (em GPa) Grupo 2.
Fonte: Dados da pesquisa

Esses resultados decrescentes não eram esperados, principalmente quando se analisou a performance dos outros compósitos fibrosos, com relação à tenacidade (Gráfico 5.27 e Gráfico 5.28). Uma das justificativas possíveis para o comportamento seria o arrancamento das fibras da matriz, com o esforço do ensaio.

Encontrou-se relatos com incentivo à utilização de agentes de acoplamento para melhorias nos resultados, assim como recomendações para adoção do processo de moldagem por compressão, como responsável por melhores índices para o módulo de elasticidade. Esse processo permite uma maior densidade específica nos materiais obtidos, com menos vazios de ar entre matriz e agregados. Outra técnica de moldagem citada como vantajosa é a tecnologia a vácuo, porém, com a recomendação de redução do tempo de prensagem para um mínimo, com o objetivo de aumento no desempenho dos compósitos, evitando as rupturas das fibras e consequente degradação (KU, 2011).

5.8.4 Tenacidade (J/m^3)

A tenacidade à fratura geralmente está associada ao comprimento das fibras de reforço. Como o material compósito é submetido a uma carga, a tensão é transferida da matriz para a fibra. Podem acontecer descolamentos na interface e a fibra ser retirada da matriz, gerando consideráveis perdas que contribuem para a fratura. A tenacidade do material é determinada no ensaio de tração pela área do gráfico tensão versus flecha. O comportamento médio dos compósitos com acréscimo de cola e fibras apresentou uma propriedade que se destacou nas análises, a tenacidade à fratura, tanto para adições de 4% quanto para 12% de fibras (SAVASTANO, 2000).

Os gráficos de barras 5.27 e 5.28 demonstram uma variabilidade significativa entre os resultados das amostras RE1, RE2 e BR2, entretanto, apesar da variabilidade, os resultados obtidos para o grupo de compósitos que receberam acréscimo de cola e fibras foi muito superior ao apresentado por aqueles que não receberam adições. O comportamento dos compósitos com acréscimos fibrosos foi o mais homogêneo.

Tabela 5.13 - Resultados de Tenacidade do Grupo 1.

Tenacidade (J/m³)		
Grupo 1	**Média**	**Desvio Padrão**
BR1	288	135
KF1	406	112
RE1	755	353
DES1	720	88

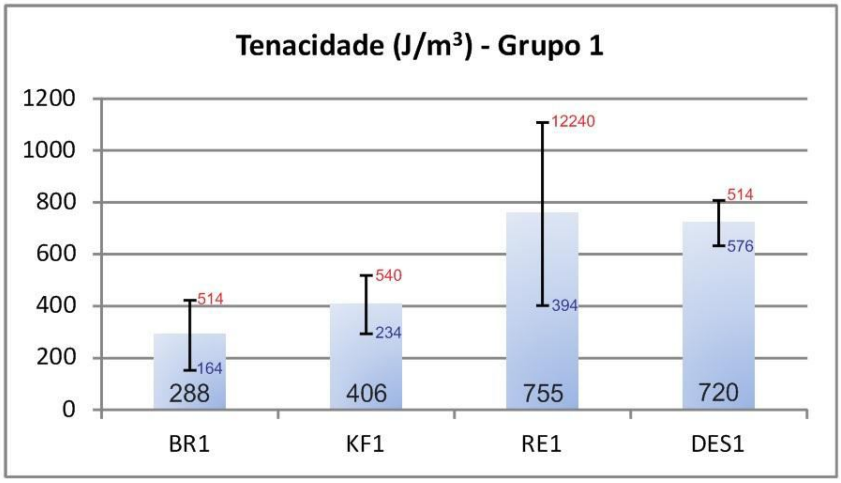


Gráfico 5.27 – Tenacidade para Grupo 1.
Fonte: Dados da pesquisa

Tabela – 5.14 - Resultados de Tenacidade do Grupo 2.

Tenacidade (J/m³)		
Grupo 2	**Média**	**Desvio Padrão**
BR2	489	128
KF2	617	283
RE2	720	88
DES2	750	94

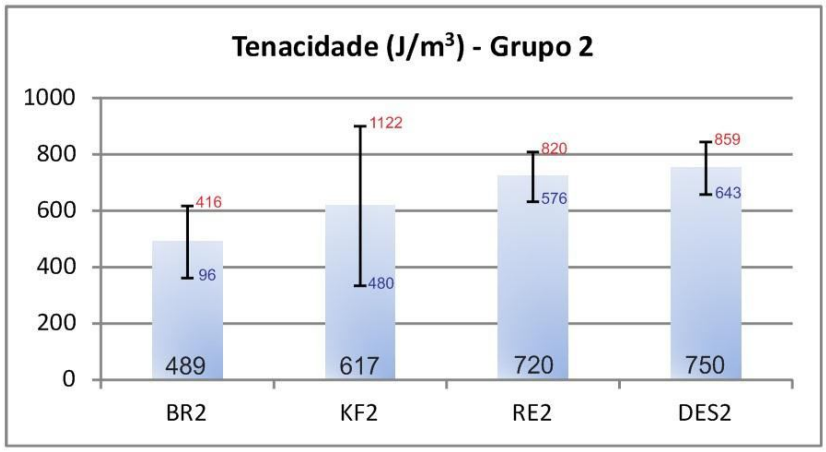


Gráfico 5.28 – Tenacidade para Grupo 2.
Fonte: Dados da pesquisa

Para os compósitos de referência (BR1 e BR2), tal variação pode ser devida à presença de bolhas ou fissuras resultantes do processo de moldagem na área próxima à região analisada.

No caso dos compósitos com adição de fibra, a variabilidade amostral pode estar relacionada ao processo de batimento prévio e preparo da argamassa (RE1) e também a impurezas (DES2).

As fibras *kraft* não são inertes, pois reagem com o cimento fresco e sofrem variações de volume com a umidade. Elas foram adicionadas com a função de conferir reforço aos esforços de flexão das matrizes cimentícias, de modo a aumentar a resistência mecânica de compósitos.

Os compósitos KF2, DES1 e RE2 apresentaram resultados homogêneos, com baixa variabilidade nos resultados. Porém, os desvios entre os compósitos RE1 e RE2 foram considerados discrepantes, apesar de apresentarem bons resultados de tenacidade.

Nos resultados obtidos a partir das amostras descartadas, DES2 apresentou mais que o dobro da variabilidade apresentada por DES1, o que pode significar uma concentração de pontos de tensões nos compósitos descartados do Grupo 2. Este grupo, que recebeu menor quantidade percentual de cimento na formulação, obteve o melhor resultado na análise de tenacidade, ou seja, resultados aproximadamente 150% superiores aos compósitos de referência.

Os compósitos KF2 e RE1 apresentaram a maior variabilidade de resultados entre as amostras, com resultados médios respectivamente 80% e 175% superiores aos compósitos de referência.

A análise dos dados permite observar que, apesar da variabilidade entre os grupos de amostras, os resultados de tenacidade para os compósitos com acréscimo de polímero e fibras foram satisfatórios quando comparados aos obtidos dos compósitos de referência.

A inclusão de fibras pode aumentar a tenacidade; mesmo em processos de preparo que não incluam compressão.

O processamento da fibra, em duas etapas, pode ter contribuído para um aumento das áreas de contato interfacial, melhorando as ligações entre fibras e matriz cimentícia (compósitos RE1 e DES2). Isso também pode ter colaborado para torná-las menos resistentes a esforços mecânicos (KF1).

5.8.6 Análise estatística

Analisou-se os dados com o emprego de estatística descritiva e inferencial. Para análise estatística, utilizou-se o software *SPSS*, versão 11.0. As variáveis quantitativas foram descritas através de média e desvio padrão.

O nível de significância adotado foi de 5%. Considerou-se significativos os valores de p ≤ 0,05. Os símbolos $\bar{x} \pm s$ significam média e desvio padrão, respectivamente.

Utilizou-se o Teste de Comparações Múltiplas (ANOVA) para comparação das médias entre os grupos. O teste Pos Hoc de Tukey foi utilizado para comparação dos resultados aos pares.

O teste ANOVA permitiu identificar as diferenças entre os 4 grupos, de uma única vez. Como houve diferença significativa, o teste de Tukey foi utilizado para determinar em quais amostras se situaram as diferenças. O sinal de asterisco (*) foi utilizado para identificar entre quais pares de compósitos analisados houve diferença estatisticamente significante. Em todas as análises, os valores para o teste Tukey consideraram *p<0,05.

As análises consideraram o desempenho mecânico dos CPs de compósitos de referência em comparação com os obtidos com inclusão de fibras de papel *Kraft* (KF), embalagens de re-ensaque (RE) e descartadas (DES), para os Grupos 1 e 2.

Nos resultados de tensão máxima do Grupo 1 (Tabela 5.15), houve variabilidade significativa entre todas as amostras comparadas, exceto entre BR1/KF1 (4% de fibras).

Tabela 5.15 - Resultados de tensão máxima do Grupo 1.

Grupos	**Tensão Máxima (Mpa)**		**Valor p ANOVA**
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR1 x KF1	6.67 ± 0.87	7.23 ± 1.64	0.000
BR1 x RE1 *	6.67 ± 0.87	5.27 ± 0.86	
BR1 x DES1*	6.67 ± 0.87	3.55 ± 0.11	
KF1 x RE1*	7.23 ± 1.64	5.27 ± 0.86	
KF1 x DES1*	7.23 ± 1.64	3.55 ± 0.11	
RE1 x DES1*	5.27 ± 0.86	3.55 ± 0.11	

Fonte: Dados da pesquisa

Para o mesmo grupo, as avaliações do Módulo elástico (Tabela 5.16)

apresentaram resultados mais homogêneos para os pares BR1/RE1, BR1/DES1 e RE1/DES1; a tenacidade (Tabela 5.17) também apresentou variabilidade significativa, exceto para o par BR1/KF1.

Tabela 5.16 - Resultados de Módulo Elástico do Grupo 1.

Grupos	Módulo Elástico - E (GPa)		Valor p ANOVA
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR1 x KF1*	14.62 ± 1.79	80.74 ± 25.27	0.000
BR1 x RE1	14.62 ± 1.79	23.34 ± 6.48	
BR1 x DES1	14.62 ± 1.79	12.82 ± 1.94	
KF1 x RE1*	80.74 ± 25.27	23.34 ± 6.48	
KF1 x DES1*	80.74 ± 25.27	12.82 ± 1.94	
RE1 x DES1	23.34 ± 6.48	12.82 ± 1.94	

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 5.17 - Resultados de Tenacidade do Grupo 1.

Grupos	Tenacidade (Mpa)		Valor p ANOVA
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR1 x KF1	287.57 ± 134.99	405.81 ± 112.42	0.000
BR1 x RE1 *	287.57 ± 134.99	755.09 ± 353.23	
BR1 x DES1*	287.57 ± 134.99	719.9 ± 88.31	
KF1 x RE1*	405.81 ± 112.42	755.09 ± 353.23	
KF1 x DES1*	405.81 ± 112.42	719.9 ± 88.31	
RE1 x DES1*	755.09 ± 353.23	719.9 ± 88.31	

Fonte: Dados da pesquisa

A partir dos resultados obtidos sob tensão máxima do Grupo 2 (Tabela 5.18), percebe-se variância entre as amostras BR2/KF2 (respectivamente compósito de referência e com acréscimo de 12% de fibras).

Tabela 5.18 - Resultados de tensão máxima do Grupo 2.

Grupos	Tensão Máxima (Mpa)		Valor p ANOVA
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR2 x KF2	5.97 ± 1.67	6.71 ± 0.95	0.000
BR2 x RE2 *	5.97 ± 1.67	3.55 ± 0.11	
BR2 x DES2*	5.97 ± 1.67	2.86 ± 0.5	
KF2 x RE2*	6.71 ± 0.95	3.55 ± 0.11	
KF2 x DES2*	6.71 ± 0.95	2.86 ± 0.5	
RE2 x DES2	3.55 ± 0.11	2.86 ± 0.5	

Fonte: Dados da pesquisa

Nas avaliações do Módulo Elástico do Grupo 2 (Tabela 5.19), os resultados foram mais homogêneos, principalmente para os pares BR2/RE2 e RE2/DES2.

Tabela 5.19 - Resultados de Módulo Elástico do Grupo 2.

Grupos	Módulo Elástico - E (GPa)		Valor p ANOVA
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR2 x KF2*	17.24 ± 6.19	55.12 ± 26.69	0.000
BR2 x RE2	17.24 ± 6.19	12.82 ± 1.94	
BR2 x DES2*	17.24 ± 6.19	0.03 ± 0.01	
KF2 x RE2*	55.12 ± 26.69	12.82 ± 1.94	
KF2 x DES2*	55.12 ± 26.69	0.03 ± 0.01	
RE2 x DES2	12.82 ± 1.94	0.03 ± 0.01	

Fonte: Dados da pesquisa

A Tabela 5.20 apresenta resultados de tenacidade, que também variaram significativamente entre os compósitos de referência (BR2) e os compósitos com acréscimo de fibras (KF2/ RE2/DES2). Porém, a análise dos pares desses últimos apresentou variabilidade pouco significativa.

Tabela 5.20 - Resultados de Tenacidade do Grupo 2.

Grupos	Tenacidade (Mpa)		Valor p ANOVA
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$	
BR2 x KF2*	234.46 ± 127.89	616.73 ± 282.86	0.000
BR2 x RE2 *	234.46 ± 127.89	719.9 ± 88.31	
BR2 x DES2*	234.46 ± 127.89	750.36 ± 93.58	
KF2 x RE2	616.73 ± 282.86	719.9 ± 88.31	
KF2 x DES2	616.73 ± 282.86	750.36 ± 93.58	
RE2 x DES2	719.9 ± 88.31	750.36 ± 93.58	

Fonte: Dados da pesquisa

CONCLUSÕES

A utilização dos resíduos visa aumentar a eficiência dos projetos, uma vez que a adição de fibras leva a alterações nas propriedades térmicas e de flexão dos compósitos. Do total de 48 corpos de prova, produziu-se 6 compósitos de referência, denominados BR1 e BR2, utilizando cimento, areia e água. Os traços para os compósitos de referência constituem-se de duas proporções de cimento/areia (percentual em massa) respectivamente 79-21 (BR1) e 77-23 (BR2). Os compósitos com adição de fibras (4 e 12%) receberam 3% de emulsão polimérica a base de PVAc e 20% de areia fina lavada e as proporções de cimento/areia foram, respectivamente, 76-20 (Grupo 1) e 68-20 (Grupo 2). A ocorrência de bolhas maiores e em maior quantidade ficou evidente nos compósitos com maior acréscimo fibroso, resultado da inclusão de água em quantidades acima das utilizadas no preparo de argamassas, e totalizou em uma maior quantidade de vazios.

As bandas de celulose das amostras de papéis e embalagens *Kraft* verificadas apresentaram homogeneidade do perfil espectral. Foram praticamente inexistentes sinais diferenciados entre as amostras, característica considerada relevante sob o ponto de vista socioeconômico e ambiental, pois demonstra que o papel descartado não perde características de resistência mecânica quando comparado aos papéis e embalagens limpos.

Os melhores resultados entre os compósitos do Grupo 1 foram, respectivamente, os obtidos entre RE1/DES1 — mostraram que com a utilização das embalagens de reensaque ou descartadas é possível obter um módulo elástico superior ao apresentado pelas amostras de compósito sem acréscimo fibroso. Ao se comparar os comportamentos de tenacidade e tensão máxima de BR1/KF1, concluiu-se que há ganhos de resistência mecânica com a adição de fibras, mesmo para os acréscimos em menores proporções.

Já para o Grupo 2, apesar da variabilidade identificada nos ensaios, observou-se que o par RE2/DES2 apresentou desempenho superior sob todos os aspectos em análise, reforçando a viabilidade do acréscimo de PVAc e maiores quantidades de fibras oriundas de embalagens *kraft*, tanto aquelas que não tiveram nenhum contato com o cimento, quanto às descartadas em caçambas, com eventuais resíduos.

O calor específico dos compósitos de referência e dos compósitos com fibras descartadas foi sensível às adições, apresentaram resultados proporcionais aos acréscimos. Os compósitos com acréscimo fibroso de 12% apresentaram os melhores resultados relativos para cada determinação; obteve-se metade do valor de difusividade térmica, quando comparados aos compósitos de referência, e um quarto dos valores relativos ao Pirocerâmico 9606.

No que se refere aos CPs produzidos com acréscimo de PVAc e fibras *kraft*, os produtos resultantes das misturas foram obtidos com volume de água sempre superior às especificações da engenharia civil para placas cimentícias, concretos e argamassas (em torno de 0,4 e 0,7). Isso transformou os CPs em uma espécie de barbotina (produto cerâmico), tendo sido utilizado em sua composição um material "que ninguém quer", em substituição à gipsita.

Os resultados dos ensaios de tenacidade, condutividade e resistividade levam a crer que compósitos que incorporem fibras de embalagens de cimento possam ser uma alternativa viável na produção de placas internas e forros para edificações, com o valor agregado de ser um produto sustentável. Há, ainda, a possibilidade de colaborarem para a eficiência térmica nas edificações; redução dos custos de fundação; utilização de componentes industrializados padronizados e consequente especialização da mão de obra levando à diminuição de desperdícios.

TRABALHOS FUTUROS

O mundo industrial busca o desenvolvimento de novos materiais, com melhorias na qualidade ou redução de defeitos.

Em função da natureza hidrofílica das fibras, o volume de enchimento influencia as propriedades dos compósitos reforçados por fibras naturais. Sugere-se que sejam feitas novas avaliações no que se refere ao ataque alcalino às fibras por produtos de hidratação, evitando sua mineralização e consequente fragilização.

O processamento do resíduo de celulose deve ser reavaliado, para que seja seco ao ar livre, já que a estufa utilizada com esta finalidade foi o aparelho que mais consumiu energia em todo o processo de produção dos compósitos.

Também o processo de moldagem dos compósitos não estruturais pode ser reavaliado, utilizando-se uma metodologia para a diminuição de vazios nos moldados e comparação de resultados. Como os materiais moldados não sofreram processo compressivo, esta avaliação é desejada nas avaliações de condutividade elétrica e térmica, para determinar quais produtos são mais sensíveis à geometria microestrutural.

TRABALHOS RESULTANTES DA PESQUISA REALIZADA

Este projeto de pesquisa gerou um trabalho apresentado em congresso internacional (1) e fundamenta trabalhos futuros (2).

(1) **Apresentação Oral**, 14h **–** 08/11/11.

Evaluation of Cement-Based Composites and Poly(vinyl alcohol) reinforced paper Kraft residue obtained from recycling packaging of cement.

IN: PTECH-2011 - *Eighth International Latin American Conference on Powder Technology, November* 06 to 09, Costão do Santinho, Florianópolis, SC, Brazil.

(2) *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL PROPERTIES OF CEMENT MATRIX COMPOSITES BY FLASH LASER METHOD*

IN: TEMPMEKO 2013, *October 14th to 18th*, 2013, Funchal, Madeira, Portugal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira do Cimento *Portland*. Disponível em:<http://www.slideshare.net/mayaravirgulino/abcp-cimento-portland.>. Acesso em: 9 mai. 2012.

ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em:<www.abiquim.org.br>. Acesso em: 9 mar. 2012.

ABRELPE/ISWA, Associação de Empresas de Limpeza Púbica e Resíduos Especiais (São Paulo-Brasil) / *International Solid Waste Association* (Vienna-Áustria). Disponível em: <www.abrelpe.org.br/>;<www.iswa.org>. Acesso em: 10 jan 2011.

AGOPYAN, V; VM, John. ***Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials***. Build Res Infor 1992;20(4):233-5. 1992.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Manole, 2007.

ANJOS, M.A.S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N.P. **Uso de polpa de bambu como reforço de matrizes cimentícias**. Palmas: Escola Técnica Federal de Palmas;Rio de Janeiro: Depto. Eng. Civil - PUC-RIO; Paraíba: Depto. Eng. Civil – UFPB, 2003.

ARANHA, I. B.; Lucas, E. F. - Poli(álcool vinílico) modificado com cadeias hidrocarbônicas: Avaliação do balanço hidrófilo/lipófilo. **POLÍMEROS**: Ciência e Tecnologia, vol. 11, nº 4, p. 174-181, 2001.

ASHBY, M.F.; JONES, R.H. **Engenharia de Materiais**: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. v2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. ABNT NBR 14724, Rio de Janeiro: 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento *Portland* de alta resistência inicial - ABNT/EB 2, Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão - ABNT, Rio de Janeiro: 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10004**: Resíduos Sólidos: classificação. ABNT, Rio de Janeiro: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR07211**: Agregados para concreto **–** ABNT, Rio de Janeiro: 1987, 5p.

ASTM-E-1461-07, "*Standard test method for thermal diffusivity of solids by the flash method," Annual book of ASTM standards*, ***ASTM 14.02***, pp.1-11, 1992.

BECHARA, Evanildo. **Moderna gramática portuguesa**. Rio de Janeiro: Lucerna, 2004.

BITTENCOURT, Paulo R. S. **Náilon 6 e 6,6 em blendas com lignina *kraft* modificada por ácido fórmico**: caracterização e efeito de radiação UV. Tese (Doutorado). Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2008.

BOLETIM TÉCNICO HENKEL nº 1320. Disponível em:<www.henkel.com.br> Acesso em: 29 mar. 2010.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Disponível em:<www.bracelpa.org.br>. Acesso em: 10 abr. 2011.

BRASKEM, S. A. **Boletim Técnico** nº 8. Glossário de termos aplicados a polímeros. Revisão 2002. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/site.aspx/Produto-Boletim-Tecnico> . Acesso em 10 abr. 2011.

BUSON, Márcio Albuquerque. **Kraftterra.** Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel *kraft* provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical. Tese (Doutorado). Brasília: Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2009.

CALLISTER, Jr., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p.705.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artiber, 2004.

CEMPRE,COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. Disponível em:<www.cempre.org.br>. Acesso em: 6 jul. 2010.

CHAHUD, Eduardo et al. **Reciclagem de resíduos para a construção civil**. Belo Horizonte: Faculdade de Engenharia e Arquitetura - Universidade Fumec, 2007.

COSTA JR., Ezequiel de S.; MANSUR, Herman Sander. **Desenvolvimento de matriz de Quitosana/PVA, quimicamente reticulado para aplicação potencial em engenharia de tecido epitelial.** Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CUNHA JR., Nelson B (Coord.). **Cartilha de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para a Construção Civil**. Belo Horizonte: Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais, 2005.

EMBALANEWS. Revista especializada em embalagem, dirigida aos setores de alimentos, bebidas, cosméticos, farmacêuticos e afins. **São Paulo: Nova**. Ano XVIII –nov. 2007. Edição 210.

FERREIRA, R. A. N.; MIRANDA, O.; DUTRA NETO, A.; GROSSI, P. A.; MARTINS, G. A.; REIS, S. C.; ALENCAR, D. A.; SOARES FILHO, J. G.; LOPES, C. C.; PINHO, M. G.. "Implantação no CDTN de Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais através do Método Flash Laser", *International Nuclear Atlantic Conference* - INAC 2002, Rio de Janeiro: INAC Brazil, August 11-16 (2002).

FERREIRA, Ricardo A. N. **Porta-amostra para os ensaios termofísicos (**LMPT/CDTN). Jpg. 2012. 1 foto; 10 x15 cm; color.

FILHO, Iran S. Aragão; SAVI, Marcelo A. **Análise da delaminação em placas compósitas através do método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais - Instituto Militar de Engenharia, 2001.

FOELKEL, Celso. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose *kraft* para a fabricação de papel**. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*. São Paulo: ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 2007. p.79

FRANK, P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GARCIA, Amauri et al. **Ensaios de materiais.**Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES, Manuel M. **Sobre as cargas brancas.** ©RUBBERPEDIA - Portal da indústria da borracha. Disponível em: <www.rubberpedia.com>. Acesso em: 24 out. 2011.

GOTO, Tania. ***Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites Ciment/latex****.These (Doctorat*). Paris: *Spécialité Physique et chimie des matériaux. L'Universite Paris VI - Pierre et Marie Curie*, Oct. 2006.

HAINES, J.P. ***Thermal Methods of Analysis*****: *Principles, Applications and Problems*. U.S.A.**: Ed. Blackie Academic Professional, 1995. pg. 30-35.

HOLCIM BRASIL. **Relatório de controle de qualidade CIMENTO CP V-ARI PLUS**. Unidade Pedro Leopoldo, 2012.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 mai. 2012.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular.** 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

ICDD, PDF02 **–** AMCSD. Banco de dados para o *software* "*X-POWDER*", versão 2010.01.14 Pro (2005). Disponível em:<www.xpowder.com>. Acesso em: 12 jul. 2012.

KIM, J. H.; ROBERTSON, R.E. e NAAMAN, A. *Structure and Properties of Poly(vinil alcohol)-Modified Mortar and Concrete.* ***CEMENT AND CONCRETE RESEARCH,*** v. 29, p 407-4015, 1999.

KRUMBEIN, W. C. & SLOSS, L. L., ***Stratigraphy and Sedimentation***. San Francisco: Freeman, 1963. 2nd edition.

KU, H. et al. ***A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites***. Elsevier Ltd. Disponível em: jornal homepage / Composites: Part B. <www.elsevier.com/locate/compositesb>. Acesso em: 22 fev. 2011.

MANNHEIMER, Walter A. **Microscopia dos materiais**. Uma introdução. Rio de Janeiro: *E-papers*, 2002.

MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a polímeros.** São Paulo: Blücher, 2004. 2.ed. rev. e ampl.

MANSUR, Alexandra A. P. **Mecanismo físico-químico de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento**. Tese (Doutorado) Engenharia Metalúrgica, Ciência e Eng. de Materiais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 365p.

MANSUR, Alexandra A. P.; MANSUR, Herman S. Estimativa do grau de hidrólise do PVA através de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. Anais do 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. **REVISTA POLÍMEROS**. Águas de Lindóia: nov. 2005.

MANSUR, H. S. Notas de Aula de Caracterização de Superfícies e Interfaces. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas. UFMG. Belo Horizonte,

Brasil, 2001.

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **POLÍMEROS**: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 1, p. 40-46, 2009. Disponível em:<http://www.scielo.br/pdf/po/v19n1/11.pdf>. Acesso em: 14 set. 2012.

MICHAELIS. **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa.** Disponível em: <http://**michaelis**.uol.com.br/moderno/portugues/index.php>. Acesso em: 19 mar. 2013.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/LivroConama.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2012

MONTEIRO Sergio N. & d'ALMEIDA, José Roberto M. Ensaios de *Pullout* em fibras lignocelulósicas – uma metodologia de análise**.** Rio de Janeiro: **SCIELO BRASIL**. vol.11 n.3 jul/set. 2006. Disponível em: <www.dx.doi.org/10.1590/S1517-70762006000300004>. Acesso em: 15 ago. 2012.

MORAES et. al. **Não se pode esconder o lixo debaixo do tapete**: resíduos sólidos - problemas e soluções. Belo Horizonte: [s.n], 1994.

MORAVIA, Weber G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2007. 170p.

NIT-CMRR. Centro Mineiro de Referência em Resíduos. Disponível em: <www.cmrrmg.webnode.com.br/tecnologia/nit/>. Acesso em: 21 out. 2011.

OHAMA, Y. *Polymer-based Admixtures*. ***CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES***, v.20, p.189-212, 1998.

OLIVEIRA, Jorge Fernando de S. **Estudos da Influência da configuração em compósitos poliméricos híbridos**. Dissertação (Mestrado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, 2007.

PADILHA, Angelo Fernando. **Técnicas de análise micro-estrutural.** São Paulo: Hemus, 2004.

PARKER, W. J. et al. *Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Condutivity*. U.S.: ***JOURNAL OF APPLIED PHYSICS***, Set./1960 -Vol. 32, number 9, pp.1679-1684 (1961).

PEREIRA, Marinalva M. **Processamento de cerâmicas**. Belo Horizonte: Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais. Editora UFMG, 2002.

PORTELLA, M. G. et al. Estudo Comparativo do Envelhecimento Químico Acelerado de Papel Kraft Termoestabilizado e Convencional –In: VI CONGRESSO DE

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA - CITENEL. Fortaleza, 2011. Disponível em: <www.cteep.com.br/port/institucional/projetos/Projeto_0068-004_2007_Site.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2012.

RABELO, Marcelo. **Aditivação de Polímeros.** São Paulo: ARTLIBER, 2000.

RIBEIRO, Daniel Véras et.al. Efeito da adição de serragem de couro tratada quimicamente nas propriedades do cimento *Portland.* **QUÍMICA NOVA**, 2011. Vol. 34, nº 6, 979-983. Disponível em : <http://quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2011/vol34n6/11-AR10644.pdf> . Acesso em: 12 jan. 2013.

RIEGEL, Izabel et al. **Análise Termogravimétrica da pirólise da Acácia-Negra** (*Acacia mearnsii de Wild*), cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil. 2008. Disponível em: <angelab@feevale.br>. Acesso em: 25 jan. 2013.

ROBERT, Noely T. F. Dossiê Técnico - Produção de embalagem de papel. Rio de Janeiro: Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro - **REDETEC,** out. 2007.

RODRIGUES, C.S. **Mecânica da fratura de compósitos de matrizes rígidas reforçados com fibras de sisal**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: PUC-RJ, 1999.

RODRIGUES, et. al. *Rice husk ash as a suplementary raw material for the production of celulose-cement composites with improved performance*. ***WASTE BIOMASS VALOR***, 2010. 1:241-249. Disponível em: <Springerlink.com>. Acesso em: 10 abr. 2011.

RODRIGUES, Guilherme V.; MARCHETTO, Otávio. **Análises Térmicas.** Caracterização de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5733/Apostila.pdf>Acesso em: 13 out. 2012.

ROSSINI, Luis E. **Obtenção da blenda polimérica PET/PP/PE/EVA a partir de "garrafas PET" e estudo das modificações provocadas pela radiação ionizante.** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/USP. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Edvaldo%20Luis%20Rossini_D.pdf>Acesso em: 18 set 2012.

SAMISTRARO, Gisely, et.al. Previsão das propriedades físicas do papel *Kraft* por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). São Paulo: **QUÍMICA NOVA**, 2009. v. 32, n. 6.

SAVASTANO Jr., Holmer. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal:** reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000a.

SAVASTANO Jr., Holmer. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo:** uso de fibras vegetais e de outros resíduos agro-industriais. Programa Habitare - FINEP. [S.l.], 2003.

SAVASTANO Jr., Holmer; P. G. Warden; R.S.P. Coutts. ***Brazilian waste fibres reinforcement for cement-based composites*.** São Paulo: Elsevier Science Ltd. 2000. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/cemconcomp>. Acesso em: 14 jun. 2011.

SAVASTANO JUNIOR, Holmer; JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan; FERREIRA, Osny P. *Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites. Materials and Structures*, **CACHAN**, France, v. 35, n. 245, p. 64-68, 2002. ISSN 1359-5997.

SEELEY, Rod R., STEPHENS, Trent D.; TATE Philip. **Anatomia & Fisiologia**. Lusociência, 6. ed. [s.l.]: 2003. p 42-43. Disponível em: <http://www.mendonca.sp.gov.br/saem/ph.pdf.>. Acesso em: 25 nov. 2012.

SICHIERI, Eduvaldo Paulo (Coord.). **Polímeros na arquitetura e na construção civil.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2007.

SILVA, Aluizio Caldas e. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2002.

SILVA, Ethiene P. da; SOARES, Monique P.; BOLDT, Rachel S. Simpósio Brasileiro de *Design* Sustentável 2. Aplicação do compósito AKS7 no *design* de móveis. **Anais Rede Brasil de Design Sustentável.** São Paulo: RBDS, 2009.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Amostras dos Compósitos DES2** Jpg. 2012. 2 fotos; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Aparência superficial homogênea com aparecimento de bolhas em CP do compósito RE1.** Jpg. 2012. 2 fotos; 10 x15 cm; color.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Bolhas superficiais no compósito RE1 e** v**ariabilidade dimensional das fibras celulósicas.** Jpg. 2012. 2 fotomicrografias; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Fotomicrografias de região fraturada do compósito RE2.** Jpg. 2012. 2 fotomicrografias; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Fotomicrografias de regiões de transição (a) dos compósitos DES1 e (b) DES2.** Jpg. 2012. 2 fotomicrografias; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **M.E.V. do filme polimérico a base de PVAc.** Jpg. 2012. 2 fotomicrografias; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **M.E.V. de papel *kraft* e embalagem descartada de cimento em aumentos de 200 vezes.** Jpg. 2012. 2 fotomicrografias; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **M.O. da folha interna de embalagem descartada.** Jpg.

2012. 1 foto; 10 x15 cm; color.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Moldagem dos compósitos com acréscimo de fibras.** Jpg. 2012. 4 fotos; 10 x15 cm; color.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Placas de compósito para retirada dos CPs utilizados nos ensaios.** Jpg. 2012. 1 foto; 10 x15 cm; p&b.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Tela, moldes e CPs**. Jpg. 2012. 3 fotos; 10 x15 cm; color.

SILVA, Myrtes Amaral da. **Variabilidade dimensional das fibras.** Jpg. 2012. 2 fotos; 10 x15 cm; color.

SILVERSTEIN, R.M. et. al. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1991.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em:< www.snic.org.br>. Acesso em: 02/12/2012.

UNEP/PNUMA. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.pnuma.org/>; <www.onu.org.br/rio20>. Acesso em: 11 mar. 2012.
v. 29, p 407-4015, 1999.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984 – 29ª Reimpressão.

VOCABULÁRIO ORTOGRÁFICO DA LÍNGUA PORTUGUESA. ***Volp***. 5. ed. 2009. Rio de Janeiro: Letras, Academia Brasileira. Global. Disponível em: <http://www.academia.org.br/abl/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=23>. Acesso em: 19 mar. 2013.

ANEXOS

ANEXO A – Certificado de Análise Cimento *Portland* CP V – ARI.

MALVERN INSTRUMENTS

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name: CP V-ARI PLUS PEDRO LEOPOLDO -
SOP Name: CIMENTO
Measured: segunda-feira, 16 de maio de 2011 16:18:24

Sample Source & type: Factory - PEDRO LEOPOLDO
Measured by: facosta
Analysed: segunda-feira, 16 de maio de 2011 16:18:26

Sample bulk lot ref: 07.05.2011
Result Source: Averaged

Particle Name: CIMENTO
Accessory Name: Scirocco 2000
Analysis model: General purpose (fine)
Sensitivity: Normal

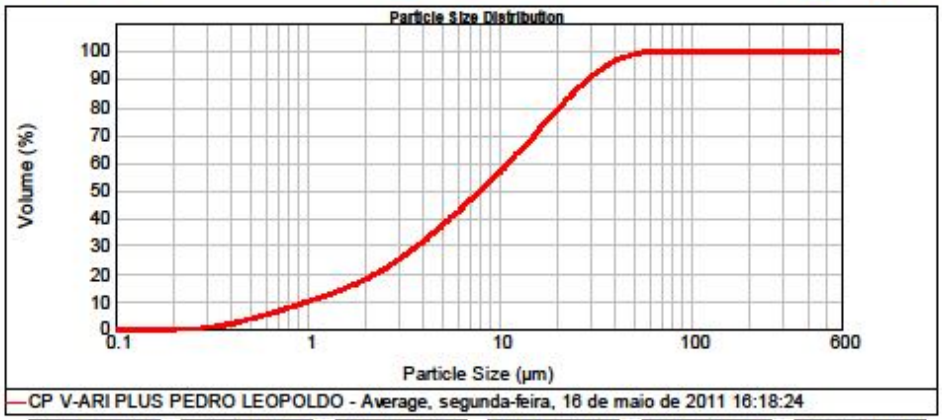
Particle RI: 0.000
Absorption: 0
Size range: 0.020 to 2000.000 um
Obscuration: 19.88 %

Dispersant Name:
Dispersant RI: 1.000
Weighted Residual: 0.139 %
Result Emulation: Off

Concentration: 0.0022 %Vol
Span : 3.503
Uniformity: 1.09
Result units: Volume

Specific Surface Area: 2.19 m²/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.738 um
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 12.028 um

d(0.1): 1.010 um **d(0.5):** 7.997 um **d(0.9):** 29.019 um



Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	10.83	11.482	80.72	88.000	100.00	954.993	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	12.26	13.183	85.10	90.000	100.00	1096.478	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	13.78	15.000	89.32	104.713	100.00	1190.000	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	15.43	17.378	74.22	122.000	100.00	1258.925	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.800	16.48	19.953	78.81	139.038	100.00	1659.587	100.00
0.020	0.00	0.209	0.02	2.200	19.40	21.000	80.48	159.489	100.00	1905.461	100.00
0.023	0.00	0.240	0.19	2.600	22.26	26.303	87.36	174.000	100.00	2290.000	100.00
0.026	0.00	0.275	0.48	2.884	24.25	30.000	90.83	210.000	100.00	2511.886	100.00
0.030	0.00	0.316	0.90	3.000	25.05	36.000	94.75	239.883	100.00	2884.032	100.00
0.035	0.00	0.363	1.48	3.600	29.05	42.000	97.16	275.423	100.00	3311.311	100.00
0.040	0.00	0.417	2.27	4.365	33.68	44.000	97.73	316.228	100.00	3801.894	100.00
0.046	0.00	0.479	3.23	5.200	38.20	45.000	97.97	363.078	100.00	5660.000	100.00
0.052	0.00	0.550	4.32	5.754	40.90	52.481	99.26	478.630	100.00	6606.934	100.00
0.060	0.00	0.631	5.52	6.607	44.66	60.000	99.90	500.000	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	6.79	7.400	47.81	63.000	99.98	630.957	100.00	9520.000	100.00
0.079	0.00	0.832	8.10	8.710	52.45	75.000	100.00	724.436	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	9.45	10.000	56.51	88.000	100.00	831.764	100.00		

Operator notes: *CP V-ARI PLUS PEDRO LEOPOLDO AMOSTRA - 55 07.05.2011*

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.54
Serial Number : MAL1014148

File name: CIMENTO.mea
Record Number: 581
18 mai 2011 08:11:42

Fonte: HOLCIM BRASIL S.A., 2011.

ANEXO B – Tabela 1 - Métodos de Ensaio do Cimento Portland CP V-ARI.

Ensaio	Método de Ensaio	Resultado	
SiO_2	NBR 14656/01	19,36	%
Al_2O_3		5,10	%
Fe_3O_3		3,02	%
CaO		63,71	%
MgO		0,76	%
SO_3		2,84	%
Na_2O		0,16	%
K_2O		0,83	%
CO_2	NBR NM 20/09	2,60	%
Perda ao fogo – P.F.	NBR NM 18/04	3,80	%
Resíduo Insolúvel	NBR NM 15/04	0,73	%
Massa Específica	NBR NM 23/01	3,09	g/cm3
Área Específica	NBR NM 76/98	4770	cm2/g
Finura – Resíduo na peneira 75 µm (200 mesh)	NBR 11579/91	0,0	%
Finura – Resíduo na peneira 37 µm (400 mesh)	-	1,8	%
Início de pega	NBR NM 65/03	120	min
Fim de pega		180	min
Água da pasta de consistência normal	NBR NM 43/03	31,0	%
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente	NBR 11582/91	0,0	mm
Resistência a compressão 1 dia	NBR 7215/96	28,9	MPa
Resistência a compressão 3 dias		41,5	MPa
Resistência a compressão 7 dias		45,9	MPa
Resistência a compressão 28 dias		54,1	MPa

Fonte: HOLCIM BRASIL S.A. - Selo de Qualidade Assoc. Brasileira do Cimento Portland – NBR 5733, 2012.

ANEXO C – Tabela 2 **–** Especificações do fabricante para a emulsão polimérica. utilizada para o preparo dos compósitos com adição fibrosa

Teor de Sólidos (%)	40,0 – 43,0
pH a 25°C	4,0 – 5,0
Aspecto e Classificação do Produto: Líquido leitoso branco, viscoso, livre de grumos e/ ou materiais estranhos. Odor característico de acetato de vinila. Nível de colagem D-1/EN-204: não se classifica como líquido inflamável e corrosivo ou se enquadra como produto perigoso.	

Fonte: HENKEL QUÍMICA, Boletim Técnico - BT Nº 1301, 2012.

GLOSSÁRIO

Absorbância: também chamada de **absorvância** ou **absorvência**, é a capacidade intrínseca dos materiais em absorver radiações em frequências específicas. A absorbância é proporcional à espessura de uma amostra e à concentração da substância nesta, em contraste à transmitância, que varia exponencialmente com a espessura e a concentração. É tratada em "Unidades de Absorvância" (u.a.) ou AU.

Anisometria: adj. (an+isométrico). 1 Não isomérico; que tem partes assimétricas; diz-se dos cristais com três partes desiguais. 2 Minerais: Relativo ou pertencente a uma rocha de textura granular mas com componentes de tamanho desigual.

***Drywall**:* Chapas fabricadas industrialmente mediante laminação contínua de uma mistura de gesso, água e aditivos entre duas lâminas de cartão, onde uma é virada nas bordas longitudinais e colada sobre a outra.

Mercerização: O comportamento da celulose em solução alcalina promove uma diminuição de dimensões (encolhimento), maior resistência e maior afinidade aos corantes.

Mufla: estufa para altas temperaturas usada em laboratórios; câmara metálica com revestimento interno feito de material refratário e equipada com resistências capazes de elevar a temperatura, em faixas de trabalho que variam de 200° C a 1400° C.

Número kappa: Termo usado para definir o grau de deslignificação no processo de fabricação de celulose.

Processo *Sputterin*: metalização de corpos de prova com ouro, por aspersão.

Reensaque: Apesar da conotação negativa da palavra em português, sacaria nova, troca de sacaria. No Dicionário Michaelis: ensaque *sm* (*der* regressiva de *ensacar*) Ato de ensacar.

Traço: proporção entre os constituintes de um material cimentício.