

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE POLIÉSTER COM ADIÇÃO DE
CARGAS MINERAIS E RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

EYLISSON ANDRÉ DOS SANTOS

ORIENTADOR: PROF. Ph.D JOSÉ DANIEL DINIZ MELO

Natal, julho de 2007.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE POLIÉSTER COM ADIÇÃO DE
CARGAS MINERAIS E RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

EYLISSON ANDRÉ DOS SANTOS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Ph.D. José Daniel Diniz Melo (UFRN)

Orientador

Prof. Dr. Edcleide Maria Araújo (UFCG)

Prof. Dr. Maurício Rodrigues Borges (UFRR)

Prof. Dr. Eng. Rubens Maribondo do Nascimento (UFRN)

Dedicatória

Aos meus familiares e
amigos, pelo apoio e
incentivo.

Agradecimentos

Aos meus familiares, em especial a Maria José dos Santos pelo apoio e incentivo.

À Joice de Lima Lopes, pelo amor e carinho em todos os momentos, e por fazer parte da minha vida.

Ao professor e orientador José Daniel Diniz Melo, pela orientação, dedicação, paciência e empenho demonstrados na elaboração deste trabalho.

Ao PPGEM/UFRN pelo suporte financeiro e pela oportunidade que me foi dada para fazer mestrado.

À CAPES pela bolsa de mestrado.

Ao professor Cláudio Romero e aos técnicos Francisco Paulino da Silva e João Maria Alves Frazão que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Alpargatas, pelo fornecimento do resíduo de EVA.

À Tecniplas, que forneceu a areia e a diatomita para a confecção dos compósitos.

À Bonor, que forneceu o resíduo de poliéster.

Ao Laboratório de Metrologia, por ter possibilitado a utilização do equipamento projetor de perfil e ao aluno Marcelo Costa Tanaka pelo auxílio na utilização do equipamento.

Ao Laboratório de Cimentos do Departamento de Química da UFRN, por ter possibilitado a utilização do equipamento de ensaio de flexão para os ensaios preliminares.

Ao Nupeg (ANP), pelas análises microscópicas.

Ao Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-RN, pela utilização do moinho de martelo e a Antônio de Pádua Arlindo Dantas, pelo auxílio no manuseio do equipamento.

À Rannier Marques Mendonça, pelas dicas e ajuda na confecção das primeiras placas de compósitos.

Aos professores Antonio Eduardo Martinelli, Edcleine Maria Araújo, Maurício Rodrigues Borges e Rubens Maribondo do Nascimento, que se disponibilizaram para compor a banca examinadora.

Sumário

1. Introdução	13
2. Revisão Bibliográfica	16
2.1. Materiais Compósitos	16
2.1.1. Definição e Classificação	16
2.1.2. Propriedades dos Compósitos Poliméricos	17
2.1.3. Ensaios Mecânicos em Compósitos.....	20
2.2. Matriz de Poliéster.....	22
2.3. Compósitos Reforçados com Partículas	23
2.4. Uso de Cargas em Compósitos.....	24
2.4.1. Diatomita.....	25
2.5. Resíduos Sólidos Industriais	29
2.5.1. Reciclagem de Resíduos Sólidos	32
2.5.2. Resíduo Sólido de Poliéster.....	33
2.5.3. Resíduo Sólido de EVA (Etileno Acetato de Vinila).....	34
3. Procedimento Experimental.....	37
3.1. Materiais Utilizados.....	37
3.1.1. Resíduo de Poliéster.....	37
3.1.2. Resíduo de EVA	38
3.1.3. Areia.....	39
3.1.4. Diatomita.....	39
3.2. Definição das Frações de Cargas.....	40
3.3. Confecção das Placas de Compósitos.....	40
3.4. Confecção dos Corpos de Prova.....	44
3.5. Ensaio de Flexão	46
3.6. Ensaio de Impacto Charpy	48
3.7. Análise Granulométrica das Cargas	51
3.8. Análise Microscópica e Química	51
4. Resultados e Discussão.....	53
4.1. Análise granulométrica das Cargas	53
4.2. Confecção das Placas.....	56
4.2.1. Placas Confeccionadas com Resíduo de Poliéster.....	56

4.2.2. Placas Confeccionadas com Resíduo de EVA	57
4.2.3. Placas Confeccionadas com areia.....	58
4.2.4. Placas Confeccionadas com diatomita.....	59
4.3. Ensaios de Flexão.....	60
4.4. Ensaios de Impacto.....	69
4.5. Análise Microscópica e Química das Cargas.....	74
4.6. Análise Microscópica dos Compósitos.....	77
4.6.1. Compósito com Partículas de Poliéster.....	77
4.6.2. Compósito com Partículas de EVA	79
4.6.3. Compósito com Areia	80
4.6.4. Compósito com Diatomita.....	82
4.6.5. Compósito com Areia e Diatomita	84
5. Conclusões.....	86
6. Sugestões de Trabalhos Futuros.....	89
Referências	90
Apêndice.....	98

Lista de Figuras

Figura 2.1: Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos	20
Figura 2.2: Representação esquemática da máquina de ensaio de impacto Charpy.....	21
Figura 2.3: Detalhe da diatomita de formato cilíndrico e navicular	29
Figura 2.4: Resíduo proveniente do corte de chapas de EVA expandido	36
Figura 3.1: (a) Resíduo da indústria botões em forma de grãos e (b) Moinho de martelo.....	38
Figura 3.2: Resíduo de EVA em forma de pó	38
Figura 3.3: Adição de areia em tubulações durante o processo de fabricação	39
Figura 3.4: Diatomita em forma de pó	39
Figura 3.5: Desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas	41
Figura 3.6: Seqüência esquemática da confecção das placas. (a) preparação da superfície com o desmoldante, (b) colocação da mistura no molde, (c) fechamento do molde, (d) fechamento da bolsa de vácuo, (e) aplicação do vácuo e (f) retirada das placas.....	42
Figura 3.7: Placa de poliamida e (b) detalhe dos furos para permitir a aplicação do vácuo e a retirada de bolhas de ar do compósito.....	43
Figura 3.8: Concentração de resíduos nas extremidades da placa	44
Figura 3.9: Distribuição uniforme de resíduos na placa.....	44
Figura 3.10: Corpo-de-prova para ensaio de flexão.....	45
Figura 3.11: Corpo-de-prova para ensaio de impacto	45
Figura 3.12: Bits usado no entalhe dos corpos de prova	46
Figura 3.13: (a) Projetor de perfil e (b) detalhe da usinagem do entalhe no corpo-de-prova na plaina limadora.....	46
Figura 3.14: Detalhe da máquina de ensaio de flexão em três pontos	47
Figura 3.15: Máquina de ensaio Charpy	49
Figura 4.1: Distribuição granulométrica do poliéster	54
Figura 4.2: Distribuição granulométrica do EVA	55
Figura 4.3: Distribuição granulométrica da areia	55
Figura 4.4: Distribuição granulométrica da diatomita	56
Figura 4.5: Corpos de prova para ensaio de impacto com as três granulometrias de poliéster. (a) 0,3 mm, (b) 0,6 mm e (c) 1,2 mm.....	57
Figura 4.6: Corpos de prova para ensaio de impacto com os três percentuais de EVA. (a) 7,5% de EVA, (b) 10% de EVA e (c) 12,5% de EVA.....	58

Figura 4.7: Distorção da placa com 50% de areia	59
Figura 4.8: Distorção da placa com 20% de diatomita	60
Figura 4.9: Módulo de elasticidade dos compósitos com adição de poliéster.....	62
Figura 4.10: Módulo de elasticidade dos compósitos com adição de EVA	62
Figura 4.11: Módulo de elasticidade dos compósitos com adição de diatomita	62
Figura 4.12: Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de poliéster	63
Figura 4.13: Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de EVA.....	64
Figura 4.14: Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de diatomita	64
Figura 4.15: Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de poliéster	65
Figura 4.16: Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de EVA	65
Figura 4.17: Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de diatomita.....	66
Figura 4.18: Módulo de elasticidade dos compósitos	68
Figura 4.19: Limite de resistência dos compósitos	68
Figura 4.20: Deformação máxima na flexão dos compósitos	69
Figura 4.21: Resistência ao Impacto de corpos de prova com adição de poliéster.....	71
Figura 4.22: Resistência ao Impacto de corpos de prova com adição de EVA	71
Figura 4.23: Resistência ao Impacto de corpos de prova com adição de diatomita	71
Figura 4.24: Melhores resultados de resistência ao Impacto.....	73
Figura 4.25: Aspecto dos corpos de prova rompidos após o ensaio de impacto.	73
Figura 4.26: Morfologia obtida por MEV do resíduo de poliéster.	74
Figura 4.27: Morfologia obtida por MEV do resíduo de EVA.....	74
Figura 4.28: Morfologia obtida por MEV da areia	75
Figura 4.29: Detalhe do formato cilíndrico da diatomita, obtida por MEV	76
Figura 4.30: Detalhe do formato navicular da diatomita, com poros circulares e elípticos, obtida por MEV	76
Figura 4.31: Superfície de fratura obtida por MEV do compósito com resíduo de poliéster ..	79
Figura 4.32: Detalhe de uma partícula de poliéster, obtida por MEV, mostrando a boa aderência da partícula com a matriz.....	79
Figura 4.33: Superfície de fratura obtida por MEV do compósito com resíduo de EVA.....	79
Figura 4.34: Detalhe do resíduo de EVA aderido na matriz obtida por MEV	80
Figura 4.35: Fotomicografia obtida por MEV do detalhe da superfície de fratura do compósito com areia.....	81
Figura 4.36: Fotomicografia obtida por MEV do detalhe da interface areia/matriz	81

Figura 4.37: Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe do grão de areia fraturado e seu descolamento da matriz	82
Figura 4.38: Fotomicrografia obtida por MEV da superfície de fratura do compósito com diatomita	82
Figura 4.39: Fotomicrografia obtida por MEV do compósito com 20% de diatomita	83
Figura 4.40: Fotomicrografia obtida por MEV do compósito com 40% de diatomita	84
Figura 4.41: Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da superfície de fratura do compósito com areia + diatomita.....	85
Figura 4.42: Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da adesão carga/matriz no compósito com areia + diatomita.....	85
Figura A.1: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos sem carga	98
Figura A.2: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (0,3 mm)	98
Figura A.3: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (0,6 mm)	99
Figura A.4: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (1,2 mm)	99
Figura A.5: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 7,5 % de EVA	100
Figura A.6: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 10 % de EVA	100
Figura A.7: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 12,5% de EVA	101
Figura A.8: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de areia.....	101
Figura A.9: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 20 % de diatomita	102
Figura A.10: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 40 % de diatomita	102
Figura A.11: Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 70% de areia e 5% de diatomita.....	103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação dos Resíduos Sólidos	30
Tabela 3.1: Frações em massa das cargas utilizadas.....	40
Tabela 4.1: Composição granulométrica do poliéster, do EVA e da areia	54
Tabela 4.2: Composição granulométrica da diatomita.....	56
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas dos compósitos	61
Tabela 4.4: Resistência ao impacto dos corpos de prova	69
Tabela 4.5: Composição química da areia obtida por Fluorescência de Raios-x	75
Tabela 4.6: Composição química da diatomita obtida por Fluorescência de Raios-x	77

Resumo

Com o crescimento acelerado do consumo de produtos industrializados, principalmente de produtos descartáveis, o aumento excessivo de lixo e sua disposição em lugares inadequados tornaram-se um dos grandes problemas da sociedade moderna. A utilização de resíduos sólidos industriais como carga em compósitos é uma idéia que surge com o intuito de buscar alternativas adequadas para o reaproveitamento desses resíduos, visando também o desenvolvimento de materiais com propriedades superiores àquelas dos materiais convencionais. Neste trabalho, estudou-se a influência da adição de resíduos industriais de poliéster e EVA (Etileno Acetato de Vinila), além de cargas de areia e diatomita, nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster. O principal objetivo foi avaliar o comportamento mecânico desses materiais com a adição de cargas de resíduo industrial, comparando-os com as propriedades da resina pura. Corpos-de-prova foram confeccionados e as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos foram analisadas, através de testes de flexão e de impacto. Após os ensaios mecânicos, a superfície de fratura dos corpos-de-prova foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados dos ensaios de flexão mostraram que alguns compósitos apresentaram maior módulo, quando comparados com os resultados da resina pura; com destaque para os confeccionados com areia e diatomita, em que o aumento do módulo chegou a 168 %. Os compósitos confeccionados com adição de poliéster e de EVA apresentaram módulo mais baixo que o da resina pura. Tanto o limite de resistência quanto à deformação máxima, apresentaram redução nos seus valores, quando da adição de cargas. A resistência ao impacto, em relação à resina pura, foi reduzida em todos os compósitos com adição de cargas, exceto nos compósitos com a adição de EVA, onde houve um aumento de aproximadamente 6 %. Com base nos ensaios mecânicos realizados, nas análises microscópicas e na compatibilidade das cargas com a resina poliéster, a utilização das cargas de resíduos sólidos industriais em compósitos mostrou-se viável, considerando que para cada tipo de carga haverá uma aplicação específica.

Palavras-chave: Compósitos, cargas, resíduos industriais.

Abstract

With the current growth in consumption of industrialized products and the resulting increase in garbage production, their adequate disposal has become one of the greatest challenges of modern society. The use of industrial solid residues as fillers in composite materials is an idea that emerges aiming at investigating alternatives for reusing these residues, and, at the same time, developing materials with superior properties. In this work, the influence of the addition of sand, diatomite, and industrial residues of polyester and EVA (ethylene vinyl acetate), on the mechanical properties of polymer matrix composites, was studied. The main objective was to evaluate the mechanical properties of the materials with the addition of recycled residue fillers, and compare to those of the pure polyester resin. Composite specimens were fabricated and tested for the evaluation of the flexural properties and Charpy impact resistance. After the mechanical tests, the fracture surface of the specimens was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that some of the composites with fillers presented greater Young's modulus than the pure resin; in particular composites made with sand and diatomite, where the increase in modulus was about 168 %. The composites with polyester and EVA presented Young's modulus lower than the resin. Both strength and maximum strain were reduced when fillers were added. The impact resistance was reduced in all composites with fillers when compared to the pure resin, with the exception of the composites with EVA, where an increase of about 6 % was observed. Based on the mechanical tests, microscopy analyses and the compatibility of fillers with the polyester resin, the use of industrial solid residues in composites may be viable, considering that for each type of filler there will be a specific application.

Keywords: Composites, fillers, industrial residues.

1. Introdução

O uso de compósitos como material de engenharia não é algo recente. A tecnologia dos materiais compósitos, especificamente a dos plásticos reforçados, teve um progresso significante no início dos anos 40, pois foi neste período que houve um grande crescimento de sua aplicação em elementos estruturais [1]. Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente nas áreas aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, e de artigos esportivos, entre outras, somente se tornaram viáveis após o advento dos compósitos estruturais [2]. A fim de satisfazer às novas necessidades do mercado, houve um aumento da demanda por materiais de alto desempenho, mais resistentes e leves [3]. Os compósitos vêm a cada dia conquistando novos setores da indústria pelo fato de apresentarem propriedades como baixa densidade, alta resistência específica, alto módulo de elasticidade, alta resistência química, além de permitir a fabricação de peças com geometrias complexas [4].

Atualmente, tem-se utilizado vários tipos de componentes fabricados com materiais compósitos devido as suas características que unem propriedades de metais, cerâmicas e polímeros [5]. Ocorre que, em alguns casos, o custo de componentes de compósitos é mais elevado quando comparado a componentes fabricados com materiais mais tradicionais, inviabilizando assim a comercialização desses produtos. É o caso, por exemplo, de tubulações industriais onde, apesar das vantagens de propriedades oferecidas pelos compósitos, o custo de tubos de compósitos pode ser superior aos tubos de ferro fundido, para que as exigências de normas sejam atendidas. Nesses casos, a utilização de cargas, com o objetivo de reduzir o custo dos componentes produzidos, é fundamental para que componentes de compósitos possam competir no mercado.

A tecnologia tem trazido grandes benefícios à sociedade, proporcionando o seu desenvolvimento. Mas, também, traz efeitos negativos, proporcionando problemas ecológicos (esgotamento progressivo da base dos recursos naturais) e ambientais (redução da capacidade de recuperação dos ecossistemas). Entre os efeitos ambientais negativos que as inovações tecnológicas podem originar estão [6]:

- A geração de subprodutos tóxicos;
- O impacto acumulativo dos novos produtos na demanda de energia e materiais nos estágios de produção e consumo;

- O impacto cumulativo de novas tecnologias de produto e de processo na capacidade de disposição de resíduos.

Com o aumento crescente da produção e do consumo mundial de produtos industrializados, a reciclagem de materiais tornou-se uma das mais importantes atividades de controle ambiental, agregando valores econômicos e desenvolvimento tecnológico [7]. A reciclagem e o reaproveitamento de materiais são formas adequadas de minimizar o problema do lixo, trazendo grandes benefícios às comunidades, incluindo a proteção da saúde pública.

A destinação final dos resíduos industriais, líquidos e sólidos, é motivo de crescente preocupação das empresas e dos órgãos ambientais que, através de rigorosa fiscalização, têm obrigado as empresas a cuidados minuciosos com seus resíduos, durante todo o processo produtivo, desde a sua correta classificação, tratamento, coleta, transporte, até a sua destinação final. Na busca de novas alternativas para se dar uma destinação nobre a esses resíduos, muitas pesquisas e trabalhos vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, principalmente por pesquisadores das áreas de engenharia civil, materiais, mecânica e química, propondo alternativas ao descarte desses materiais no meio ambiente, visando seu reaproveitamento como matéria-prima na fabricação de diversos produtos, como por exemplo, resíduos de borracha na fabricação de cimento Portland, cerâmica vermelha e em misturas asfálticas. A contínua necessidade, por parte do mercado, de novos produtos dotados de propriedades funcionais sempre melhores, também tem estimulado a pesquisa para a aplicação de materiais de baixo custo. Nos últimos anos, foram muitos os estudos que analisaram a possibilidade de reciclagem de uma vasta gama de resíduos industriais. A maior parte das pesquisas demonstrou a importância da reciclagem na proteção ambiental e no desenvolvimento tecnológico [7, 8].

Neste contexto, o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa que contemplem a reutilização de resíduos torna-se muito importante, dentro de uma visão que trata estes poluentes como matérias-primas importantes para aplicações nobres, com maior valor agregado, visando a sua transformação em bens úteis à sociedade e à proteção do meio ambiente. A utilização de resíduos industriais como carga em materiais compósitos é uma idéia que surge no intuito de buscar mais uma alternativa para o reaproveitamento desses resíduos, visando o desenvolvimento de novos materiais, com boas propriedades.

Dentre as várias formas de processamento e destinação final do lixo, a reciclagem dos resíduos recuperáveis, defendida por entidades ambientalistas, vem obtendo crescente aceitação em todo mundo. A reciclagem desses resíduos, além de ajudar nas questões

sanitárias e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, elimina custos com armazenamento, proporcionando economia para as empresas e para o estado [8].

Na indústria calçadista, a geração de resíduos é um problema. As empresas desses segmentos industriais, impulsionadas pela competição do mercado, buscam a elevação da produtividade, utilizando processos modernos, em grande escala de produção. Durante a fabricação, para se obter a forma final dos calçados, são produzidas sobras e retalhos. Constitui, portanto, característica típica dessa atividade industrial, a geração de grande quantidade de resíduo. A maior parte dessas sobras não serve para ser utilizada na própria indústria, daí o seu acúmulo crescente com o crescimento econômico do setor [9]. O mesmo acontece na indústria de botões, onde a geração de resíduos oriundos do processo de fabricação também é um problema.

A utilização de cargas de resíduos industriais em compósitos surge como uma necessidade, para viabilizar economicamente a utilização desses materiais em diversas aplicações de engenharia. Além das cargas atualmente utilizadas, o uso de resíduos industriais como carga em compósitos, justifica-se principalmente pela conservação do meio ambiente, por serem materiais de difícil decomposição.

O objetivo principal desta investigação foi avaliar o efeito da adição de cargas nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster, comparando-os com as propriedades da resina sem carga, para permitir o estudo do potencial de utilização dos resíduos industriais como alternativa a cargas minerais.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Avaliar o efeito da adição de resíduos industriais de poliéster e EVA (Etileno acetato de vinila), nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster, comparando com cargas de areia e diatomita.
- Analisar o processamento dos compósitos relacionando com a granulometria, composição e tipo de cargas utilizadas.
- Caracterizar, através de microscopia eletrônica, as interações carga/matriz nos compósitos, relacionando com as propriedades mecânicas avaliadas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais Compósitos

2.1.1. Definição e Classificação

Um material compósito é formado por uma matriz e uma ou mais fases dispersas, possuindo propriedades que não são obtidas pelos materiais constituintes – matriz e fase dispersa – separadamente [10, 11]. A denominação destes materiais é bastante diversificada, podendo ser tratados na literatura como: compostos, conjugados ou compósitos [12].

Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros. As possíveis combinações são condicionadas às condições de processamento e às incompatibilidades entre os componentes. Compósitos para aplicações estruturais, geralmente, utilizam fibras sintéticas ou naturais, como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, como mantas e pré-formas têxteis de diferentes arquiteturas. Como componente matricial, os polímeros são os materiais mais utilizados, devido à sua baixa densidade, inércia química e fácil moldagem. Os materiais compósitos poliméricos apresentam propriedades mecânicas específicas que podem exceder, consideravelmente, às dos metais [13].

Os constituintes dos compósitos estruturais têm funções distintas, sendo um deles responsável por suportar os esforços mecânicos (reforço) e o outro (matriz) responsável por transferir os esforços mecânicos externos para o reforço. Os componentes estruturais podem ser fibrosos ou em forma de partículas como, por exemplo, as fibras de vidro e a areia, respectivamente. As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas ou termofixas. A interface reforço-matriz, também, desempenha um importante papel para os materiais compósitos, pois tem grande influência nas propriedades finais [12].

A escolha do tipo de material de reforço é muito importante, pois além de ter grande impacto nas propriedades finais do compósito, tem também grande importância no custo do produto final. Muitas vezes, é utilizado mais de um tipo de reforço com o objetivo de obter propriedades únicas e/ou reduzir custos, formando uma combinação híbrida [14].

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a sua natureza, com a estrutura de seus componentes (matriz e reforço), e também de acordo com a geometria ou forma das fases presentes. De acordo com a fase dispersa, são classificados em [15]:

- Fibrosos: as fibras podem ser contínuas ou curtas com orientação definida ou aleatória;
- Particulados: partículas (esféricas, planas, elipsoidais, irregulares) dispersas na matriz;
- Híbridos: mistura de dois ou mais componentes em forma de fibras ou partículas, ou os dois ao mesmo tempo.

2.1.2. Propriedades dos Compósitos Poliméricos

Em projetos de materiais compósitos, combinam-se vários materiais com o objetivo de produzir um novo material com características especiais. O desempenho dos compósitos é fortemente influenciado pelas propriedades dos seus materiais constituintes, sua distribuição, fração volumétrica e interação entre eles.

Para a formação do material compósito é necessário haver uma interação entre a matriz polimérica e o reforço, proporcionando a transferência de esforços mecânicos, uma vez que as propriedades do compósito dependem dessa interação. As propriedades dos compósitos são, também, função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa [5].

Assim, os seguintes fatores são fundamentais para as propriedades dos compósitos poliméricos [16]:

- Propriedades dos componentes individuais e composição;
- Interação entre as fases;
- Razão de aspecto e porosidade da carga;
- Dispersão do reforço.

a) Propriedades dos componentes individuais e composição

Ao se adicionar uma carga a um polímero, a primeira idéia é de que as propriedades do novo material formado sejam intermediárias entre as propriedades dos dois componentes. Esse comportamento é previsto para a propriedade (P) de um compósito, através da regra das misturas. A equação geral da regra das misturas é dada por:

$$P = P_a \cdot V_a + P_b \cdot V_b \quad (2.1)$$

Onde:

Os índices a e b referem-se aos componentes (matriz e fase dispersa) e V é a fração volumétrica.

b) Interação entre as fases

A transferência de tensões entre o polímero e a carga ocorre através da região de contato, denominada *interface*. Assim, a interface assume papel decisivo nas propriedades mecânicas do material final, de modo que uma boa aderência resulta em boas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e resistência mecânica. Esta aderência está relacionada com as propriedades químicas das cargas, bem como com as conformações moleculares e constituição química da matriz.

Os mecanismos de aderência entre os constituintes de um compósito são basicamente os seguintes [16]:

- Adsorção e molhamento. O molhamento eficiente da carga pelo polímero remove o ar inclusão e cobre todas as suas protuberâncias. Este mecanismo dependerá das tensões superficiais dos componentes.
- Interdifusão. Ocorre quando há formação de ligações entre matriz/fibra. Para isso, algumas cargas necessitam ser modificadas superficialmente por um agente de acoplamento antes de serem incorporadas à matriz. A resistência da ligação depende do grau de emaranhamento molecular gerado entre o polímero matriz e a superfície da fibra modificada. A porosidade da carga tem grande influência no aumento da resistência do polímero a ser modificado.
- Atração eletrostática. Ocorre quando duas superfícies possuem cargas elétricas opostas, como nos casos de interações ácido-base e ligações iônicas. A resistência da ligação dependerá da densidade de cargas elétricas.
- Ligação química. É a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre, geralmente, com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que serve como ponte entre o polímero e o reforço, como resultado de sua dupla funcionalidade. A resistência mecânica da interface depende do número e tipo de ligações químicas presentes.

- Adesão mecânica. É resultado do preenchimento, pelo polímero, dos entalhes da superfície da carga, que apresenta cantos vivos, cavidades e outras irregularidades. A resistência desta ligação tende a ser baixa, a menos que haja um grande número de ângulos de reentrâncias na superfície da carga.

Das formas de aderência expostas acima, a adsorção e a ligação química são as mais eficientes. Considerando a falta de afinidade inerente entre o polímero (orgânico) e a carga (geralmente inorgânica), a modificação superficial da carga com agentes de acoplamento tem grande importância no desenvolvimento do compósito. O agente de acoplamento promove a união química entre as fases ou altera a energia superficial da carga para permitir um molhamento eficiente. Este último é importante quando se tem polímeros apolares hidrofóbicos com cargas polares hidrofilicas.

c) Razão de aspecto e porosidade da carga

A transferência de tensões entre a matriz e o reforço é mais eficiente quando a razão de aspecto é alta. Sendo assim, o reforço mais eficiente é obtido com o uso de cargas fibrosas, seguido por escamas ou plaquetas e finalmente por partículas esféricas, onde a razão de aspecto é 1. O aumento da razão de aspecto, além de aumentar a resistência à tração, aumenta também o módulo elástico [16].

No caso de compósitos fibrosos, existe um comprimento de fibra crítico para se obter boas propriedades, pelo fato das extremidades das fibras serem pontos de concentração de tensões que fragilizam o material. Com comprimentos elevados e alinhamento no sentido da solicitação, as fibras passam a suportar as tensões diretamente, elevando a resistência do material.

O tamanho das partículas também é importante, pois define a área de contato com a matriz. Em geral, a resistência aumenta com a diminuição do tamanho de partícula. Cargas porosas como o negro de fumo ou diatomita, produzem bons níveis de resistência devido a uma adesão mecânica mais eficiente e até difusão das macromoléculas na estrutura da carga.

d) Dispersão do reforço

Boa dispersão das cargas na matriz é uma das condições necessárias para se ter boas propriedades mecânicas. Há uma tendência natural das cargas formarem aglomerados, impedindo o envolvimento completo pela matriz, o que gera concentração de tensões, e, consequentemente, redução das propriedades mecânicas do material.

2.1.3. Ensaios Mecânicos em Compósitos

Um dos ensaios mecânicos mais utilizados na caracterização de compósitos é o ensaio de flexão em três pontos. O ensaio de flexão em três pontos consiste na aplicação de uma carga no centro de um corpo-de-prova específico, padronizado, apoiado em dois pontos, como mostra a Figura 2.1. A carga aplicada aumenta lentamente até a ruptura do corpo-de-prova. O valor da carga aplicada *versus* o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio [17]. Os principais resultados do ensaio de flexão são: módulo de elasticidade, limite de resistência à flexão e deformação máxima.

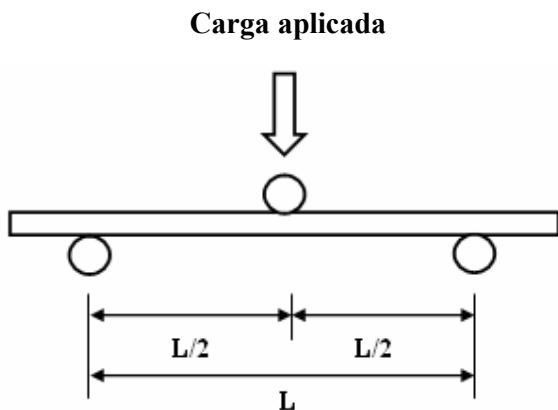


Figura 2.1 - Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos.

A resistência ao impacto é uma das mais importantes características do material em um projeto para prevenir as possibilidades de fratura prematura com este tipo de solicitação [18]. O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por ensaios de impacto [17]. A carga nesses ensaios é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre um corpo-de-prova de dimensões padronizadas. O pêndulo é elevado a uma certa altura, apresentando uma energia potencial inicial. Ao cair, ele colide com o corpo-de-prova, que se rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia potencial final.

No ensaio de impacto, a massa do martelo e a aceleração da gravidade local são conhecidas. A posição inicial do pêndulo também é conhecida. A única variável desconhecida é a posição da altura final, que é obtida pelo ensaio. O equipamento de ensaios registra a altura final, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada. A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia

absorvida pelo material e as perdas de energia no percurso, que são consideradas. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia adotada é o Joule [19]. Assim, o ensaio de impacto consiste em medir a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.

Os ensaios de impacto mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo-de-prova na máquina. Em ambos os casos, o corpo-de-prova tem o formato de uma barra de seção transversal retangular, na qual é usinado um entalhe em forma de V. Os requisitos essenciais para a realização do ensaio são: corpo-de-prova padronizado, suporte rígido no qual o corpo-de-prova é apoiado ou engastado, pêndulo com massa conhecida solto de uma altura suficiente para fraturar totalmente o material e um dispositivo de escala para medir as alturas antes e depois do impacto do pêndulo [17]. As diferenças entre os ensaios Charpy e Izod estão na forma em que o corpo-de-prova é montado (horizontal ou vertical) e na face do entalhe, localizada ou não na região de impacto. No ensaio Charpy o golpe é desferido na face oposta ao entalhe e no Izod é desferido no mesmo lado do entalhe.

O desenho esquemático do equipamento de ensaio usado neste trabalho é mostrado na Figura 2.2.

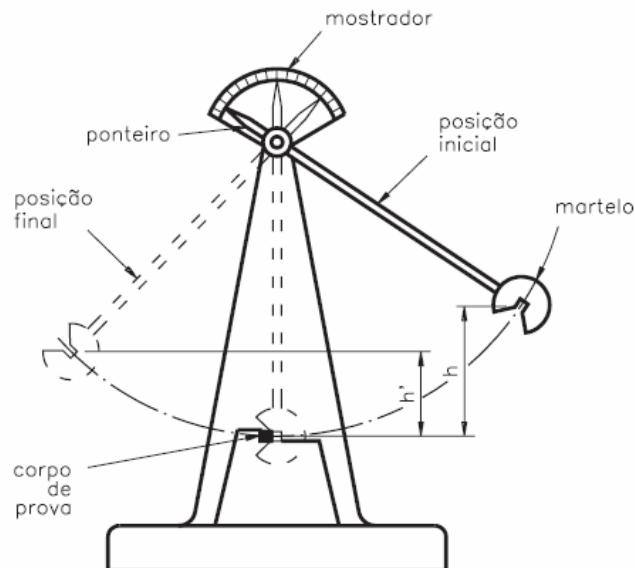


Figura 2.2 - Representação esquemática da máquina de ensaio de impacto Charpy [19].

2.2. Matriz de Poliéster

Os materiais poliméricos têm sido usados pelo homem desde a Antiguidade. Contudo, nessa época, somente eram usados materiais poliméricos naturais. A síntese artificial de materiais poliméricos é um processo que requer tecnologia sofisticada, pois envolve reações de química orgânica, ciência que só começou a ser dominada a partir da segunda metade do século XIX. Nessa época começaram a surgir polímeros modificados a partir de materiais naturais. Somente no início do século XX os processos de polimerização começaram a ser viabilizados, permitindo a síntese plena de polímeros a partir de seus meros. Tais processos estão sendo aperfeiçoados desde então, colaborando para a obtenção de plásticos, borrachas e resinas cada vez mais sofisticados e baratos, graças a uma engenharia molecular cada vez mais complexa [20].

O nome “poliéster” é usado para descrever uma categoria de materiais obtidos geralmente por meio de uma reação de condensação entre um polialcool e um ácido policarboxílico. Os poliésteres estão entre os mais versáteis polímeros sintéticos conhecidos, pois podem ser encontrados comercialmente como fibras, plásticos, filmes e resinas. A sua síntese é muito comum e pode ser feita diretamente, através de esterificação, transesterificação e a reação de álcoois com cloretos de acila ou anidridos. Dependendo da formulação inicial, pode-se obter um poliéster saturado ou insaturado [21].

As resinas de poliéster são utilizadas na fabricação de peças moldadas, com ou sem fibra de vidro, tais como: piscinas, barcos, banheiras, tanques, telhas, domos, botões, bijuterias, assentos sanitários, móveis para jardim, massa plástica, mármore sintético, etc. Elas fazem parte de uma família diferente e complexa de resinas sintéticas, que são obtidas com uma grande variedade de matérias primas como base [22]. O processo de cura da resina poliéster é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um compósito alifático. A cura pode se dar tanto em temperatura ambiente, quanto sob temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão [10].

Os poliésteres insaturados são bastante utilizados em conjunção com fibras de vidro para obter um polímero reforçado que apresente excelentes propriedades mecânicas como a resistência à tração e ao impacto. Para peças industriais, menos solicitadas fisicamente, empregam-se sisal ou algodão como reforço. O emprego de poliéster com reforço de fibras carbônicas e fibras de boro vem se desenvolvendo acentuadamente [23].

2.3. Compósitos Reforçados com Partículas

Os compósitos reforçados com partículas apresentam, em sua maioria, uma fase particulada mais dura e mais rígida do que a matriz. As partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração de carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula [5]. Para que ocorra um reforço eficaz, as partículas devem estar distribuídas uniformemente ao longo da matriz e as frações volumétricas das duas fases – matriz e partículas – são fundamentais para a determinação do comportamento mecânico [5].

Os compósitos particulados são resultantes da introdução de componentes que apresentam uma razão de aspecto (relação entre a maior e a menor dimensão do corpo L/D) menor que 3 [24]. Esses componentes são denominados de cargas particuladas ou não fibrosas, podendo estar na forma de partículas, escamas ou plaquetas. As cargas particuladas podem ser definidas como materiais sólidos, que são adicionados aos polímeros em quantidades suficientes para reduzir custos e/ou alterar as suas propriedades físicas e/ou mecânicas [16]. Compósitos particulados são freqüentemente encontrados em matriz metálica e cerâmica, em que a introdução de partículas visa o aumento na dureza do material e da tenacidade à fratura, respectivamente. Entretanto, para matrizes poliméricas, a introdução de partículas, geralmente, não leva a um aumento substancial das propriedades do polímero. Este fato ocorre devido ao fato das tensões não serem efetivamente transferidas da matriz para partículas que são dotadas de pequena área superficial. Além disso, as partículas também podem atuar como agentes nucleadores de trincas e assim contribuir para a redução da resistência mecânica dos compósitos [16].

Alguns materiais poliméricos com adição de enchimentos são, na realidade, compósitos reforçados com partículas. Os enchimentos modificam as propriedades do material e/ou substituem parte do volume do polímero por um material mais barato.

As cargas tendem a aumentar a viscosidade da resina e geralmente são misturadas a ela junto com corantes e pigmentos. Uma outra utilidade das cargas é que, em quantidades adequadas, podem reduzir os efeitos da contração das resinas durante a cura [10].

Além das cargas particuladas de reforço, existem aquelas usadas para modificar as propriedades da matriz polimérica e/ou reduzir custos. As cargas de enchimento são muito utilizadas para diminuir os custos dos produtos, uma vez que exercem pouca influência nas

demais propriedades dos compósitos, podendo conferir, dependendo da natureza destas, principalmente um aumento no módulo do compósito [25].

As cargas inertes geralmente diminuem a resistência ao impacto e muitas vezes contribuem para uma maior propagação de trincas, diminuindo também a resistência à fadiga [24]. Por outro lado, a presença de cargas pode melhorar algumas propriedades da matriz polimérica como, por exemplo, estabilidade dimensional, menor retração no resfriamento durante o processamento e maior temperatura de distorção térmica. Em algumas situações, as cargas são usadas para aumentar a condutividade elétrica do material polimérico. Compósitos poliméricos condutores de eletricidade são utilizados em inúmeras aplicações tecnológicas, tais como: tintas condutoras, dispositivos eletrônicos, eliminação de carga eletrostática em microeletrônica, sensores de pressão e blindagem eletromagnética [24].

Dentre as cargas não reforçantes, as mais utilizadas são as de origem mineral, pois as mesmas se incorporam à resina, proporcionando compatibilidade entre as características buscadas e o custo. As cargas minerais são usadas, principalmente, para substituir parte da resina e do reforço e, assim, reduzir o custo do produto final. As principais cargas minerais usadas para essa finalidade são a calcita (carbonato de cálcio moído) e a areia. A calcita não é inerte e só deve ser usada em peças para ambientes secos. Outras cargas, como talco, carbonato de cálcio precipitado e argila são, também, usadas. Mas por terem granulometria muito fina, aumentam muito a viscosidade da resina e são usadas em teores muito baixos, reduzindo assim o interesse econômico [26].

2.4. Uso de Cargas em Compósitos

São muitos os estudos que envolvem materiais compósitos no que diz respeito incorporação de cargas, propiciando a expansão de sua utilização em vários segmentos da indústria, medicina e esportes. A seguir são apresentados alguns tipos de cargas aplicadas aos materiais compósitos.

A preparação de compósitos de madeira com polímeros é uma prática comum, particularmente quanto ao uso de resinas termofixas na produção de painéis MDF (*medium-density fiberboard*). A utilização de fibra de madeira como carga em termoplásticos, também já é conhecida desde a década de 70 pela indústria automobilística, que emprega compósitos de polipropileno com fibra de madeira, conhecidos no mercado, como *woodstock*. Esses compósitos são extrudados e laminados em chapas para revestimento interno de portas e porta-malas de veículos em uso corrente. O principal benefício da utilização de fibras de

madeira em termoplásticos consiste no aumento da rigidez e da temperatura de uso desses materiais embora este ganho seja alcançado a custo de reduções drásticas na tenacidade [27].

Em estudos anteriores utilizou-se resíduo de EVA (Etileno acetato de vinila) oriundos da indústria calçadista como agregado para concreto leve na construção civil [28]. A partir deste estudo, desenvolveu - se um tipo de bloco que permite associar leveza à função de vedação, com boas condições de fabricação e manuseio, conseguindo-se atingir o valor mínimo de resistência à compressão para esta aplicação, que é de 2,5 MPa. [29]. Em outro estudo, resíduos de EVA foram utilizados como reforço em composições elastoméricas. Com base nos ensaios de tração, chegou-se a conclusão que os resíduos de EVA atuam como carga de enchimento na matriz e, sobretudo, sem grande prejuízo das propriedades mecânicas [30].

A utilização de cargas minerais em compósitos na produção de materiais industriais alternativos também vem sendo estudada, tendo como uma das principais vantagens, a redução do custo de fabricação. Em um estudo anterior, analisou-se a introdução de diatomita, como carga, no processo de transformação do polietileno. Ensaios mecânicos, em temperatura ambiente, mostraram que a adição em até 20% de diatomita não provocou redução da resistência à tração do material [31]. Outro estudo realizado com cargas minerais envolveu a adição de areia em tubos de compósitos de fibra de vidro. O estudo revelou um aumento significativo na rigidez do tubo, o que prova a eficácia da adição de areia como carga para este tipo de aplicação [32].

Em uma outra linha de pesquisa, um estudo comparativo entre concretos poliméricos fabricados com areia pura e areia servida (rejeito de fundições) foi realizado, no sentido de dar um destino útil e ecologicamente correto para este rejeito [33]. Foi verificado que a contaminação presente na areia servida contribui de forma discreta, mas positiva, na resistência à flexão e na tenacidade da fratura. Em outro trabalho, a influência do tipo de resina e da adição de cinza volante nas propriedades do concreto polimérico foi considerada [34]. Foram testadas resinas de poliéster ortoftálica e isoftálica com adição de cinza volante, variando de 8 % a 20 %. Foi verificado que, tanto o tipo de resina, quanto o percentual de cinza volante têm grande influência no módulo de elasticidade do compósito.

2.4.1. Diatomita

Existem relatos do emprego da diatomita desde o império Romano (532 d.C), quando era utilizada na fabricação de tijolos para construção devido a sua leveza. Em 1860, com a descoberta dos grandes depósitos de diatomita de Hanover, na Alemanha, deu-se início a sua

utilização em escala industrial na fabricação de papel absorvente de líquidos. Por volta de 1976, a diatomita começou a ser empregada nos Estados Unidos como substituta da polpa de papel, algodão e filtros de celulose e asbestos. No Brasil, os estudos das algas diatomáceas tiveram seu início registrado em 1880, com uma classificação de algas de acordo com o ambiente lacustre, tendo recebido a denominação de *Actinella brasiliensis* [35].

O material diatomáceo formou-se em épocas recentes em terrenos de sedimentação, principalmente, em zonas de formação lacustre e oceânica, dispostas em camadas delgadas ou espessas entre as argilas [36]. A estrutura em carapaças das diatomitas é resultado de um processo denominado pseudomorfismo, no qual a matriz orgânica constituída pelas algas diatomáceas sofre um processo de substituição por sílica, originando uma matriz mineral [37]. A fixação da sílica pelas algas diatomáceas está ligada à história geoquímica da decomposição das argilas cauliníticas por via biológica, e presume-se que estas algas incorporam a sílica das argilas para constituir o seu material de estrutura, de modo que o silício está presente na ordem de 2 a 10% no semi-líquido de cada célula [36]. O crescimento e a reprodução destas algas só se dá em condições ambientais favoráveis, ou seja, em meio não tóxico onde haja, também, condições adequadas para a ocorrência da fotossíntese (bacias rasas), rico em nutrientes e sílica [38].

A diatomita é classificada como um mineral industrial não-metálico. Devido a sua morfologia e a não reatividade com a maioria dos ácidos e bases, a diatomita pode ser aplicada em produtos e processos, como matéria-prima, insumo, aditivo, carga, abrasivo, isolante e auxiliar de filtração, sendo que esta última representa, em geral, 53% das aplicações [39]. Como auxiliar de filtração, seus usos mais comuns são: filtração de água, vinhos, sucos de frutas, cervejas, óleos, corantes, etc. A diatomita pode ainda ser útil em diversos segmentos industriais, tais como: indústria cerâmica, agricultura e alimentação [40, 41].

A diatomita é um material pulverulento, leve e de estrutura alveolar, apresentando no estado bruto, cores que, dependendo do teor de matéria orgânica e óxido de ferro existentes, variam de branco ao cinza e sua aspereza ao tato assemelha-se ao giz. As frústulas das diatomáceas têm dimensões que variam de 4 a 500 µm e são formadas basicamente de sílica amorfa hidratada ou opalina (que possui resistência elevada, sendo as partículas rígidas e abrasivas) e impurezas como argilominerais, quartzo, óxido de ferro, alumínio, sódio, potássio, cálcio, magnésio, titânio, matéria orgânica, etc. [38, 42].

As propriedades físico-químicas estão relacionadas de forma intrínseca com a morfologia das carapaças, textura, empacotamento, natureza da superfície de sílica e impurezas sólidas [39, 40, 43], apresentando as seguintes características físicas e químicas

[37, 40]: dureza (escala Mohr): 1,0 a 1,50 em função da porosidade das partículas microscópicas; peso específico: 1,90 a 2,35 g/cm³, quando calcinada oscila de 0,20 a 0,50 g/cm³; massa específica relativa: 2,10 a 2,30 g/cm³; densidade aparente: 0,12 a 0,5 g/cm³ quando calcinada; sistema cristalino: amorfo; ponto de fusão: 1400°C a 1650°C; traço: opaco ou terroso; clivagem: ausente; fratura: irregular; tenacidade: quebradiça; solubilidade: insolúvel em ácidos, com exceção do hidrofluorídrico (HF); índice de refração: 1,42 a 1,48 %; condutividade térmica: baixa em virtude da baixa porosidade de 0,49 a 0,77Kcal/h.cm. °C; massa específica real: 2,1 a 2,3 g/cm³; porosidade: 80 a 90%, quando o material é compactado sem compressão.

Quimicamente, a diatomita apresenta alto teor de sílica e baixos teores de Al₂O₃, CaO, MgO e demais impurezas que, dependendo do tipo de aplicação, têm ou não que serem removidas total ou parcialmente de sua composição [44].

Muitos dos estudos com diatomitas no Brasil, envolvem pesquisas físicas, químicas, localização de jazidas, extração, beneficiamento, comercialização e aplicações [37, 45, 46]. Há, entretanto, estudos mais antigos envolvendo microscopia óptica de diatomitas. Estudos atuais de microscopia eletrônica de varredura, descrevendo a morfologia de carapaças de diatomáceas brasileiras têm sido realizados [42, 47]. A caracterização de diatomáceas por microscopia eletrônica de transmissão, para fins tecnológicos, também tem sido realizada [36, 48].

Ensaios físicos e químicos tais como: análise química, difração de raios-x, alvura, teor de sílica da diatomácea, análise térmica diferencial, microscopias óptica e eletrônica foram realizados para diatomitas de diferentes estados brasileiros, tendo concluído a existência de impurezas de argilominerais do grupo de caulinita [38].

As diatomáceas fósseis são classificadas com base na sua morfologia e desenho dos orifícios classificados como primários, secundários e terciários. Assim, a diatomita em pó é um sistema sólido poroso com área específica de 1 a 4 cm²/g, mesmo que as carapaças não apresentem dimensões coloidais [38]. A característica que controla de uma forma geral as propriedades físicas e, conseqüentemente, a maioria das aplicações industriais das diatomitas são as configurações estruturais, sendo estas uma característica do gênero das diatomáceas [40].

As presenças de sílica, argila e matéria orgânica representam o critério básico para a classificação da qualidade dos depósitos de diatomitas, em classes A, B e C [49]. A classe A apresenta teores de sílica, argila e matéria orgânica, respectivamente, maior que 60%, menor ou igual a 25% e menor ou igual a 15%; a classe B, sílica de 51 a 60%, argila de 26 a 35% e

matéria orgânica de 16 a 35%; a classe C tem teor de sílica menor que 50%, argila maior que 35% e matéria orgânica maior que 30%. A classe C é anti-econômica em seu aproveitamento, sendo geralmente utilizada para a construção civil; A classe B pode ser economicamente aproveitável e a classe A é considerada uma jazida de primeira qualidade.

A produção mundial estimada de diatomita foi de 1.960 mil toneladas em 2004 [50]. Os Estados Unidos lideram o mercado produtor e consumidor mundial de diatomita, com uma produção estimada em torno de 635 mil toneladas/ano ou 32,4% da produção mundial. Em termos de reservas, os recursos existentes de minérios de diatomita são suficientes para suprir o mercado mundial em uma necessidade futura. Os Estados Unidos e a China são considerados os maiores detentores de recursos de diatomita. Suas reservas somam juntas cerca de 910 milhões de toneladas. No Brasil, em se tratando de reservas oficiais (medidas + indicadas), inclusive reavaliadas, estima-se que as mesmas sejam da ordem de 2,6 milhões de toneladas [51]. As reservas brasileiras estão assim distribuídas: Bahia, 1.171 mil toneladas (44%), nos municípios de Ibicoara, Medeiros Neto, Mucugê e Vitória da Conquista; Rio Grande do Norte, 994 mil toneladas (37,4%), nos municípios de Ceará-Mirim, Extremoz, Macaíba, Maxaranguape, Rio do Fogo, Nísia Floresta e Touros; Ceará, 439 mil toneladas (16,5%), nos municípios de Aquiraz, Aracati, Camocim, Horizonte, Itapipoca e Maranguape; Rio de Janeiro, 38 mil toneladas (1,4%), no município de Campos dos Goitacazes; São Paulo, 19 mil toneladas (0,7%), no município de Porto Ferreira [48].

Na Figura 2.3 são mostradas algumas carapaças de diatomita, com imagens obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura – MEV. As carapaças possuem formato cilíndrico e navicular (que é denominada desta maneira por se assemelhar a um navio) além de apresentar poros circulares e elípticos, típicos da família das *Naviculaceae*.

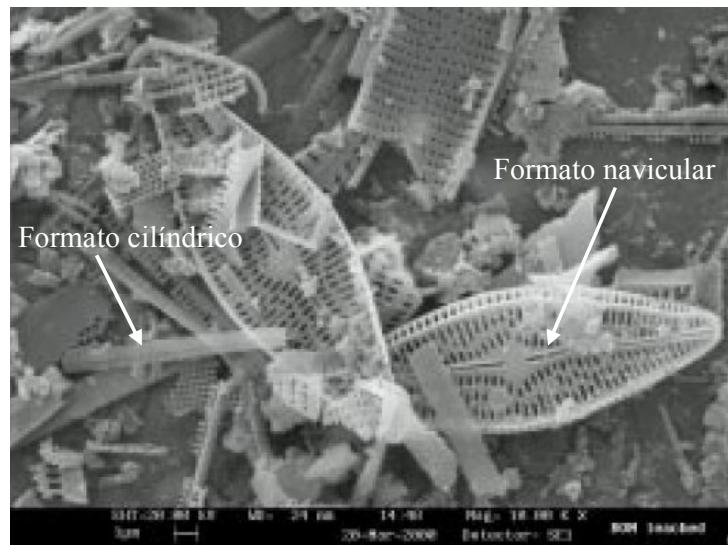


Figura 2.3 – Detalhe da diatomita de formato cilíndrico e navicular [51].

2.5. Resíduos Sólidos Industriais

O termo resíduos sólidos é usado para designar os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição [52], bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente viáveis em face à melhor tecnologia disponível [53].

Considerando os riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, os resíduos sólidos classificam-se em [53]:

- Classe I - Perigosos: são os que apresentam riscos ao meio ambiente e exigem tratamento e disposição especiais, ou que apresentam riscos à saúde pública;
- Classe II - Não-Inertes: são basicamente os resíduos com as características do lixo doméstico;
- Classe III - Inertes: são os resíduos que não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo, como restos de construção, entulhos de demolição, pedras e areias retirados de escavações.

Na Tabela 2.1 tem-se a definição para os diversos tipos de resíduos sólidos.

Tabela 2.1 – Classificação de resíduos sólidos [54]

Tipos de resíduo sólidos	Definição
Residencial	Lixo domiciliar, constituído de restos de alimentação, invólucros diversos, varredura, folhagem, ciscos e outros.
Comercial	Proveniente de diversos estabelecimentos comerciais, como escritórios, lojas, hotéis, restaurantes, supermercados e outros. É constituído principalmente de papel, papelão e plástico, caixa, etc.
Industrial	Resultante de diferentes áreas da indústria e, portanto, de constituição muito variada.
Serviço de saúde	Constituído de resíduos das mais diferentes áreas do estabelecimento: refeitório e cozinha, área de patogênicos, administração, limpeza e outros.
Especial	Constituído por resíduos e materiais produzidos esporadicamente como: folhagens de limpeza de jardins, restos de poda, animais mortos, entulhos, etc.
Feira, varrição e outros	Proveniente da varrição regular das ruas, conservação da limpeza de núcleos comerciais, limpeza de feiras, constituindo-se de papéis, cigarros, invólucros, restos de capinação, areia, ciscos e folhas.

O lixo gerado pelas atividades agrícolas e industriais é tecnicamente conhecido como resíduo. Os geradores são obrigados a cuidar do gerenciamento, transporte, tratamento e destinação final de seus resíduos, sendo essa responsabilidade por tempo indeterminado. O lixo doméstico é apenas uma pequena parte de todo o lixo produzido. A indústria é responsável por grande quantidade de resíduo como sobras de carvão mineral, refugos da indústria metalúrgica, resíduo químico, gás e fumaça lançados pelas chaminés das fábricas. O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões ao ambiente. Nele estão incluídos produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados. Os resíduos sólidos são amontoados e enterrados; os líquidos são despejados em rios e mares; os gases são lançados no ar. Assim, a saúde do ambiente, e consequentemente dos seres que nele vivem, torna-se ameaçada, podendo levar a grandes tragédias [55].

Nos últimos anos, a geração de resíduos pelas indústrias tornou-se um problema de ordem mundial. Quando não tratados, adequadamente, os resíduos sólidos industriais constituem uma ameaça permanente à saúde pública e ao meio ambiente. Para as indústrias, um dos desafios a ser enfrentado é o de compatibilizar o desenvolvimento tecnológico, industrial e comercial com o equilíbrio ambiental e a preservação dos recursos naturais [56]. O efeito das atividades humanas sobre o meio ambiente aumentou, significativamente, a partir

do início da revolução industrial, no final do século XVIII. Desde este período até os dias atuais, o impacto das atividades industriais, dos grandes aglomerados urbanos e da expansão da agricultura sobre a biosfera só vem aumentando [57].

Um dos problemas que afetam a qualidade de vida da população é o gerenciamento inadequado dos diversos tipos de resíduos sólidos. Um grande número de localidades urbanas e rurais, em todo mundo, vem sofrendo transformações ambientais danosas decorrentes dos crescimentos populacionais, industriais e da oferta de bens de consumo descartáveis, gerando o lixo e resíduos industriais diversos, que necessitam cada vez mais de vazadouros e/ou aterros sanitários para sua disposição, muitas das vezes inadequados a esse fim. Sem a infraestrutura necessária para oferecer a destinação adequada aos resíduos sólidos, muitas dessas áreas tornam-se, freqüentemente, soluções improvisadas ou emergenciais, que acabam por se transformarem em definitivas, gerando uma série de transtornos que, por vezes, se refletem em problemas graves de saúde pública.

A deposição a céu aberto em lixões, ou até mesmo em aterros sanitários não constituem a solução mais adequada para a problemática da destinação desses resíduos. A disposição dos resíduos, mesmo que em locais apropriados projetados e monitorados, não é uma solução eficaz, pois representa uma disposição vigiada de um problema não solucionado [57]. Além disso, a capacidade dos lixões e aterros está próxima da saturação (particularmente nos grandes centros urbanos), e há dificuldade para encontrar novas áreas para a disposição dos resíduos. Por temor do desconhecido e, também, por motivos estéticos e comerciais, as comunidades passaram a rejeitar e até impedir a instalação, em suas cercanias, de aterros, incineradores e depósitos, mesmo que temporários, para resíduos de qualquer espécie [57].

Para as empresas geradoras dos resíduos, esta alternativa apresenta também desvantagens, pois, de acordo com a legislação ambiental, elas são responsáveis pelos mesmos indefinidamente, mesmo que o resíduo seja transferido de local, mudado de mãos ou de depositário, ou mudado de forma, mantendo suas características nocivas.

Por esses motivos, entre outros, é que a destinação final dos resíduos industriais, líquidos e sólidos, é motivo de crescente preocupação das empresas e dos órgãos ambientais que, através de rigorosa fiscalização, têm obrigado as empresas a cuidados minuciosos com seus resíduos, durante todo o processo, desde sua correta classificação, tratamento, coleta, transporte, até a sua destinação final.

2.5.1. Reciclagem de Resíduos Sólidos

Durante muitos anos a preocupação das indústrias foi apenas de produzir, sem preocupar-se com as consequências que isto geraria ao meio ambiente. Hoje algumas empresas já estão cientes das limitações dos recursos naturais, procurando aproveitar melhor seus recursos aplicando eficientes processos na redução dos resíduos e dejetos industriais.

Existem três iniciativas básicas e importantes para a redução da geração do resíduo, que são [58]:

- A redução do resíduo na sua origem, diminuindo a quantidade de resíduo gerado;
- A reutilização do resíduo no processo produtivo, podendo esse ser aproveitado na composição original ou em uma de suas etapas, sem necessidade de uma transformação;
- A reciclagem do resíduo, ou seja, a transformação ou o seu reaproveitamento como matéria-prima, em novos produtos, após algumas modificações físicas, químicas ou biológicas.

Em 2005, o Brasil produziu algo em torno de 230 mil toneladas de lixo por dia [59] e dele apenas 1% é encaminhado para tratamento [60]. Atualmente, nos países considerados desenvolvidos, a reciclagem encontra-se presente em quase todos os processos produtivos que podem agredir o meio-ambiente, e, por essa razão, os órgãos governamentais, junto com as Organizações não Governamentais (ONG's) têm se empenhado bastante nesta fiscalização. Dessa forma, o esforço para a eliminação dos resíduos industriais tem feito crescer bastante uma nova indústria, que é a indústria da reciclagem.

Os países mais industrializados são os que mais produzem resíduos sólidos, mas também são os que mais reciclam. Como exemplo, cita-se o Japão, que reutiliza 50% do resíduo sólido produzido. Lá há um maior engajamento da população nas questões da preservação ambiental e, por isso, utilizam-se vários tipos de reciclagem, até mesmo o reaproveitamento das águas do chuveiro para uso no vaso sanitário. A Europa Ocidental recupera 30% de seu resíduo sólido, e os Estados Unidos reciclam 11%. É importante salientar que a produção de lixo *per capita* nesses países é o dobro dos restantes, ou seja, uma média de aproximadamente 1,5 kg por dia, o que corresponde, ao final do ano, a um total de 10 bilhões de toneladas [59].

A reciclagem, além de reduzir o volume dos resíduos urbanos a serem dispostos ou tratados, permite a recuperação de valores intrínsecos contidos nesses resíduos [57]. A

reciclagem é um método potencial de geração de renda, pois oferece ganhos econômicos. Alguns fatores estimulam a reciclagem, como [61]:

- A necessidade de se poupar e preservar os recursos naturais;
- A redução do volume de resíduos a ser transportado e tratado e de disposição;
- A redução da carga poluente enviada ao meio ambiente;
- O aumento da vida útil dos locais de disposição de resíduos, tanto os aterros sanitários como os aterros industriais;
- A redução do custo de gerenciamento dos resíduos, reduzindo-se desta forma os investimentos nas instalações de tratamento e disposição;
- A redução final da poluição e/ou contaminação ambiental e dos problemas de saúde pública e social decorrentes dos aterros;
- A criação de empregos com a implantação de novas atividades, oferecendo melhores condições de trabalho;
- Uma maior competitividade e produtividade, nos casos das empresas criadas;
- A possibilidade de participação da população no processo de separação, contribuindo para a educação ambiental nas famílias.

A valorização do produto reciclado, como uma opção ao tradicional, exige que o produto resultante possua algumas características que demonstrem ao consumidor certas vantagens, como qualidade, estética, custo e/ou produtividade. Mas, o mais importante é mostrar ao consumidor que, com a utilização do produto reciclado, ele estará contribuindo, diretamente, para uma melhoria na qualidade de vida atual e futura, reduzindo-se, dessa forma, os níveis de impactos ambientais. Assim sendo, o estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental é de extrema importância antes do lançamento do produto no mercado. Cumprir as exigências das normas técnicas de trabalhabilidade, segurança e durabilidade através da pesquisa laboratorial, faz-se necessário para que os novos produtos não sejam geradores de resíduo com potencial superior ao produto original.

2.5.2. Resíduo Sólido de Poliéster

Uma atividade industrial que gera uma grande quantidade de resíduo sólido de poliéster é a fabricação de botões. O processo de fabricação de botões plásticos se dá, inicialmente, por centrifugação para moldagem de uma placa polimérica, que depois é cortada na forma de discos que são posteriormente usinados. No processo de centrifugação, o mandril

é preparado para ser moldado por dentro. A resina e demais componentes são introduzidos por um tubo no interior do mandril por um dos pólos do conjunto. A força centrífuga comprime o material contra a parede durante o processo de cura. A cura pode ser acelerada, através da circulação de ar quente pelo interior do mandril [62]. O material é então retirado do mandril, na forma de placas, antes da cura final para, em seguida, serem cortadas e usinadas. Durante a usinagem, são gerados resíduos na forma de partículas e em forma de pó.

2.5.3. Resíduo Sólido de EVA (Etileno Acetato de Vinila)

O EVA, Etileno Acetato de Vinila é um polímero microporoso; sua molécula possui alto peso molecular e é obtida pelo encadeamento sucessivo de pequenas unidades repetitivas de baixo peso molecular, constituído de poliacetato de etileno vinil ou copolímero de etileno-acetato de vinila [63].

No processo supracitado, o percentual de acetato de vinila define as características do composto final de EVA. Para uma maior quantidade de acetato de vinila, suas propriedades se assemelham às da borracha ou PVC (policloreto de vinila) plastificado. Reduzindo-se esta quantidade, o EVA assume características similares às do polietileno de baixa densidade [64]. Os copolímeros de EVA podem ser sintetizados em diversas porcentagens de acetato de vinila e divididos em EVA de baixa concentração (até 20% de EVA) e EVA de alta concentração (20% até 50%) em massa. No Brasil, as resinas utilizadas na produção de placas para solados de calçados apresentam acetato de vinila em uma quantidade entre 19% e 28%.

O composto de EVA é constituído pelos seguintes elementos: resina de EVA, agente de expansão, agente reticulante, cargas, ativadores e auxiliares de processo, além de outros polímeros como a borracha [28].

As principais características do EVA são [65]:

- Excelente flexibilidade e tenacidade, mesmo em baixas temperaturas;
- Elasticidade similar à da borracha;
- Resistência à fratura sob tensões ambientais “Stress Cracking”;
- Excelente transparência;
- Atóxico;
- Facilmente moldado por extrusão, injeção e na produção de placas e filmes;
- Baixo preço;

- Trata-se de um material termofixo, ou seja, ao ser aquecido com determinada temperatura, modifica permanentemente sua estrutura molecular, sofrendo, neste processo, uma reação química irreversível.

A principal aplicação do EVA é na produção de chapas reticuladas e expandidas utilizadas na produção de solados, entressolas e palmilhas na indústria calçadista, a qual é responsável por cerca de 69% do mercado de EVA [64].

Além do uso na indústria de calçados, o EVA é também aplicado em vários outros ramos industriais, graças a diversificação na processabilidade do produto. As principais aplicações desse material são [28]:

- Embalagens – alimentos líquidos e congelados, revestimentos de papel, tubos compressíveis, etc;
- Vestuário – aventais, revestimentos de fraldas, etc;
- Medicina – luvas cirúrgicas, dosadores, etc;
- Comunicação e eletricidade – fios flexíveis e revestimentos de cabos;
- Agricultura – secadores, coberturas de estufas e mangueiras;
- Asfalto – para alterar as propriedades dos ligantes e betuminosos;
- Construção civil – painéis para forro de teto e pisos industriais;
- Diversos – brinquedos flexíveis, flores artificiais, artigos esportivos, etc.

A adoção de novos materiais e modernos processos de fabricação de calçados aumentou, significativamente, tanto a produção como a produtividade do setor. Porém, fez surgir na mesma escala os resíduos industriais, inaproveitáveis economicamente, degradáveis apenas após um longo período de tempo. Dentre os resíduos gerados no setor, destacam-se os retalhos e aparas do copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA).

Durante a fabricação do calçado, geram-se resíduos na forma de retalhos das placas expandidas para obtenção dos formatos pretendidos. São gerados, ainda, resíduos de possíveis refugos de solado, entressola ou palmilha dos calçados e resíduos em forma de pó, oriundo do lixamento do calçado na fase de acabamento [28]. Esses últimos são os mais facilmente reutilizados pelas indústrias, podendo servir como cargas de volta ao processo de fabricação das placas [28]. Na Figura 2.4 pode-se visualizar resíduos da indústria de calçados provenientes do corte de chapas de EVA expandido, em forma de aparas de sandálias.

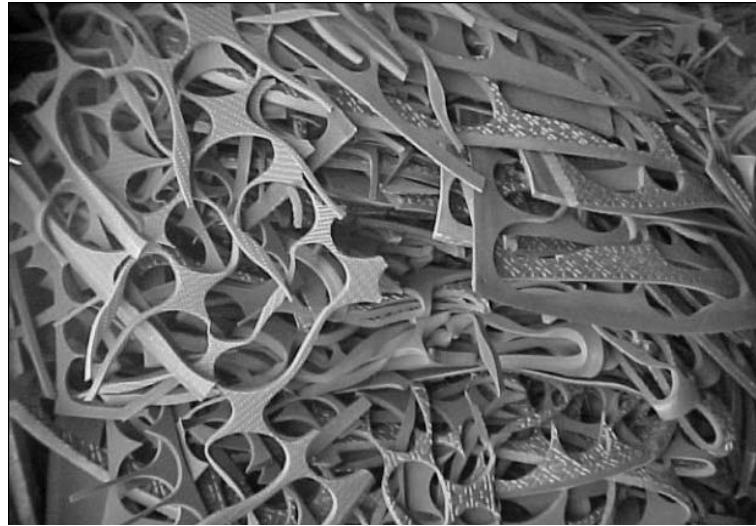


Figura 2.4. Resíduo proveniente do corte de chapas de EVA expandido [66].

A quantidade de resíduo de EVA está em torno de 12% a 20% do consumo de EVA das fábricas, dependendo do processo empregado no corte dos solados [28]. O destino final destes materiais é um problema para as empresas fabricantes. Sua reciclagem não é realizada por se tratar de um material já reticulado. Normalmente, a única alternativa é a incorporação dos resíduos como carga inerte no processo produtivo, com perda de propriedades no produto final [67]. O processo de reutilização desses resíduos, na própria indústria, é lento e possui limitações técnicas, quanto à quantidade de resíduos que se pode incorporar ao processo, sem comprometer a qualidade do produto. O volume de resíduo reaproveitado na própria indústria é bem menor (não mais que 40%) do volume por ela gerado [29]. Algumas empresas estocam seus resíduos em galpões, porém quando o volume de resíduo ultrapassa a capacidade de armazenamento são também colocados nos pátios, que também têm área limitada.

A busca de soluções ecológicas e econômicas para a destinação final dos resíduos de EVA tem sido constante nos meios empresariais, entidades ambientalistas e vários outros segmentos sociais. A deposição a céu aberto ou em aterros sanitários não constitui uma solução definitiva para resíduos sintéticos, uma vez que a taxa de degradação e a densidade do material são muito baixas. Por razões ambientais a incineração também não é recomendada [68].

3. Procedimento Experimental

Neste capítulo será apresentado o processo de confecção dos compósitos e os materiais aplicados. Serão descritos os materiais utilizados como carga, com os respectivos percentuais, as técnicas utilizadas para a sua caracterização, bem como os procedimentos de cada ensaio.

3.1. Materiais Utilizados

Os compósitos foram confeccionados em um molde de vidro de forma a garantir placas com superfícies planas, com bom acabamento superficial. Utilizou-se como matriz a resina poliéster insaturada ortoftálica pré-acelerada e catalisada com 1% de MEKP (peróxido de metil etil cetona). O desmoldante usado na produção das placas foi a cera de carnaúba. Como fase dispersa para a confecção dos compósitos foram utilizados resíduos industriais de poliéster, e EVA (etileno acetato de vinila), além de cargas de areia e diatomita, para fins de comparação de propriedades.

3.1.1. Resíduo de Poliéster

O resíduo de poliéster, utilizado como carga, foi oriundo do processo de fabricação de botões, coletados em uma indústria de botões local, onde são descartados em média 10 a 15 toneladas/mês. Esta quantidade de resíduo representa de 45 a 50 % da matéria-prima utilizada [69]. Antes de ser utilizado como carga, o resíduo foi triturado em um moinho de martelo para reduzir o tamanho das partículas. Em seguida, o resíduo foi peneirado e separado por granulometria. Foram utilizadas três granulometrias diferentes na confecção das placas, no intuito de estudar o efeito do tamanho de partícula nas propriedades de rigidez e resistência do compósito. As granulometrias utilizadas na confecção das placas foram as das peneiras de 48, 28 e 14 mesh. Optou-se por utilizar estas granulometrias por estarem dentro da faixa granulométrica do resíduo de EVA e da areia. A fragmentação do resíduo foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-RN. O resíduo de poliéster, oriundo do processo de fabricação de botões antes de ser triturado, e o moinho utilizado na fragmentação do resíduo são ilustrados nas Figuras 3.1(a) e 3.1(b), respectivamente.



Figura 3.1 - (a) Resíduo da indústria botões em forma de grãos e (b) Moinho de martelo.

3.1.2. Resíduo de EVA

O resíduo de EVA, utilizado neste trabalho, foi coletado em uma indústria de calçados local, proveniente do processo de raspagem do solado, para melhor ancoragem do adesivo. O resíduo foi fornecido em forma de pó. Um peneiramento foi realizado para a retirada de aparas (sobras), sendo utilizadas apenas as partículas que passaram na peneira de 28 mesh. Constatou-se que as partículas retidas nessa peneira representavam aproximadamente 1% da amostra total coletada. O resíduo de EVA em forma de pó utilizado como carga é ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Resíduo de EVA em forma de pó.

3.1.3. Areia

A areia empregada como carga foi fornecida por uma empresa local fabricante de produtos em plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV). Na fabricação de tubulações para adutoras, a empresa acrescenta na parte estrutural do tubo, carga de areia (Figura 3.3), com o objetivo de reduzir custos e atender as exigências de rigidez para a utilização desses tubos em aplicações de saneamento básico e para adutoras de água potável. Na confecção dos compósitos foi utilizada areia quartzosa com tamanho máximo de partícula de 0,6 mm.



Figura 3.3. Adição de areia em tubulações durante o processo de fabricação [70].

3.1.4. Diatomita

A diatomita usada neste trabalho é proveniente da região de Ceará - Mirim no Estado do Rio Grande do Norte, apresenta cor branca e encontrava-se na forma de pó, como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4. Diatomita em forma de pó.

3.2. Definição das Frações de Cargas

Inicialmente, fez-se a mistura da resina com as cargas (resíduo de poliéster, resíduo de EVA, areia e diatomita), individualmente, buscando-se o maior percentual a ser adicionado à resina para cada tipo de carga, visando principalmente a redução nos custos em compósitos. As cargas foram adicionadas aos poucos, pesando-se as quantidades antes da mistura com a resina, até uma quantidade que não compromettesse o escoamento da mistura no molde. Desta forma, frações de massa de resíduos de poliéster (para as três granulometrias), resíduo de EVA, areia e de diatomita utilizadas na confecção das placas foram determinadas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Frações em massa das cargas utilizadas.

Carga	%
Poliéster	40
EVA	7,5; 10 e 12,5
Areia	75
Diatomita	20 e 40
Areia + Diatomita	(A) 70 + (D) 5

3.3. Confecção das Placas de Compósitos

Placas de compósitos para a preparação dos corpos-de-prova foram, inicialmente, confeccionadas utilizando-se um molde de vidro composto de base e tampa com dimensões de 430 x 430 x 7 mm. Antes da preparação da mistura (resina + carga), aplicou-se um desmoldante a base de cera de carnaúba na superfície do molde para facilitar a remoção das placas após a cura. Em um recipiente plástico de dois litros foi realizada a mistura, sendo logo em seguida colocada no molde de vidro, observando-se o escoamento do material até que toda a cavidade do molde fosse preenchida. O volume de material calculado foi o necessário para confeccionar uma placa nas dimensões de 270 x 270 x 7 mm. Após o preenchimento do molde com a mistura, utilizou-se o contra molde (tampa) para pressionar (manualmente) a mistura contra a base, no intuito de reduzir a quantidade de bolhas de ar e obter uma superfície plana com bom acabamento superficial em ambas as faces. Após um tempo de aproximadamente 20 minutos, o molde foi aberto e as placas foram desmoldadas. O desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas é apresentado na Figura 3.5.

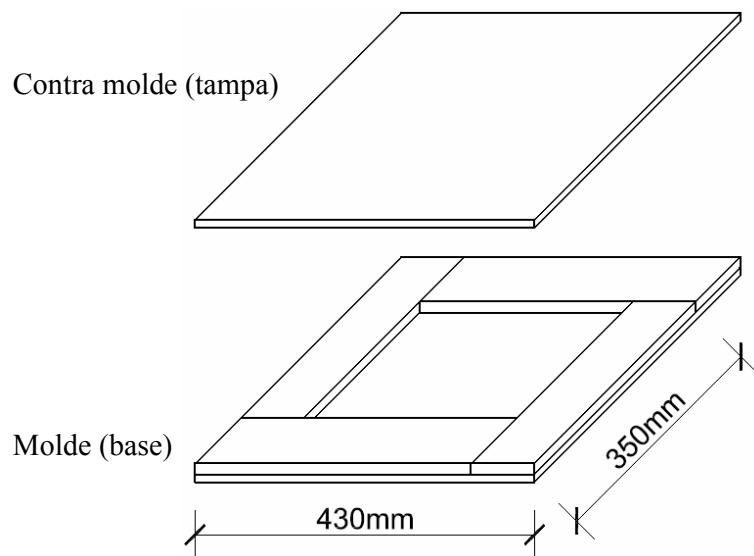


Figura 3.5 – Desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas.

Com o procedimento descrito, observou-se a presença de muitas bolhas no compósito após a cura, o que comprometeria as propriedades mecânicas dos compósitos. Diante deste problema, foi desenvolvido um sistema de vácuo para o molde, no intuito de diminuir a presença de bolhas de ar no compósito. O contra molde foi então substituído por uma placa de poliamida, utilizada para fechar o molde, onde foi executada uma malha de furos na região central, com 2 mm de diâmetro e 12 mm de distância entre centros, formando uma área quadrada de 270 x 270 mm. Os furos foram executados para permitir a aplicação de vácuo em toda a área coberta pela mistura (resina + carga), para a retirada de bolhas de ar do material antes da cura.

Após o fechamento do molde, foi colocada uma camada de feltro, seguida de um filme polimérico para o fechamento da bolsa de vácuo, sendo aplicado o vácuo logo em seguida. Após a cura, as placas foram retiradas do molde, para em seguida serem cortados os corpos-de-prova. Este procedimento permitiu a redução de bolhas de ar nos compósitos confeccionados. O procedimento utilizado na confecção das placas com a aplicação do vácuo é mostrado na Figura 3.6. A placa de poliamida e o detalhe dos furos para permitir a aplicação do vácuo e a retirada de bolhas de ar do compósito são ilustrados na Figura 3.7.

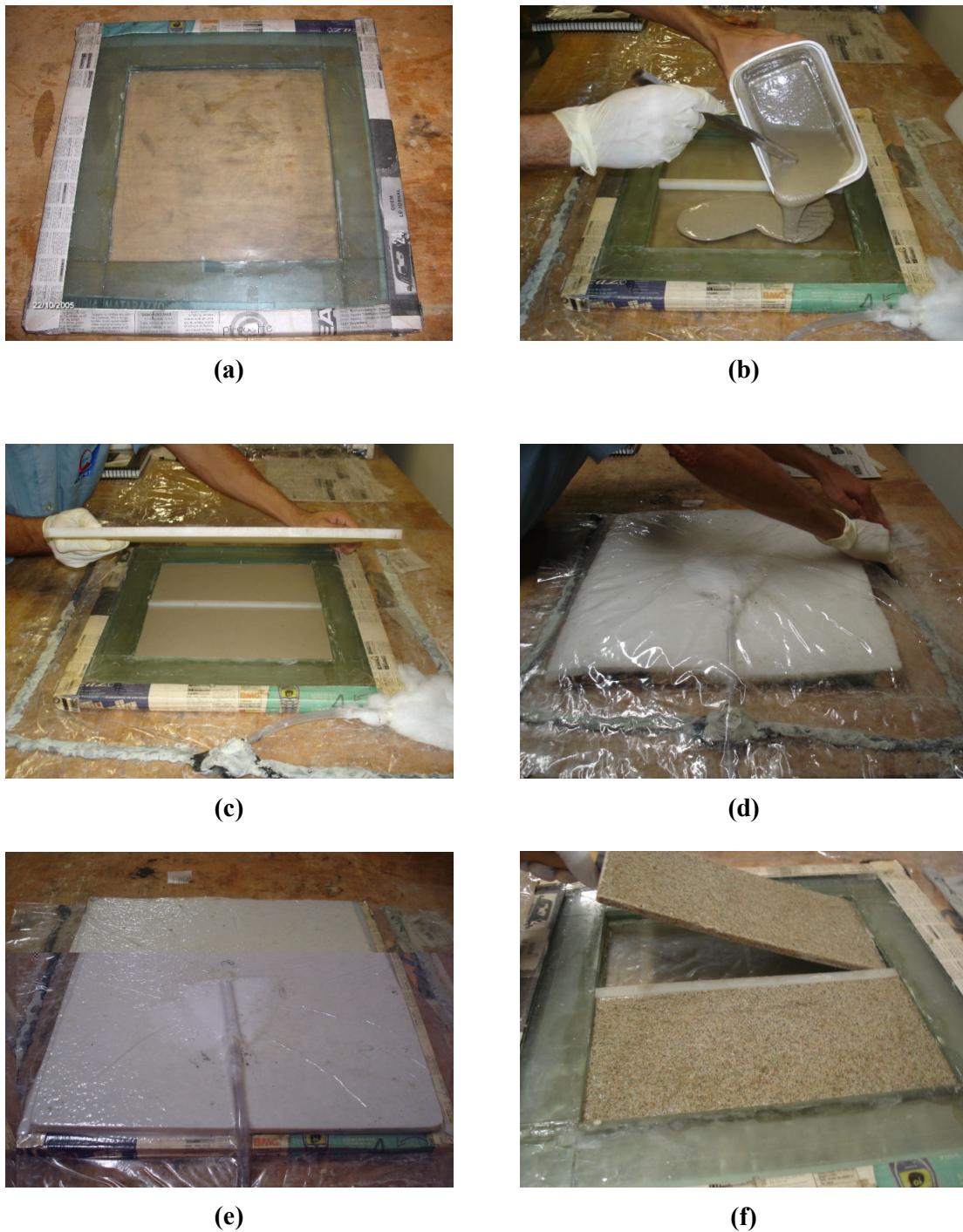


Figura 3.6 – Seqüência esquemática da confecção das placas. (a) preparação da superfície com o desmoldante, (b) colocação da mistura no molde, (c) fechamento do molde, (d) fechamento da bolsa de vácuo, (e) aplicação do vácuo e (f) retirada das placas.



Figura 3.7 – (a) Placa de poliamida e (b) detalhe dos furos para permitir a aplicação do vácuo e a retirada de bolhas de ar do compósito.

As placas de poliéster confeccionadas sem aplicação de vácuo apresentaram grande quantidade de bolhas de ar. Além deste problema, observou-se que os resíduos migraram para as extremidades do molde quando o mesmo foi pressionado para a retirada de bolhas. Isto ocorreu devido à compressão realizada sobre a mistura com o contra molde, uma vez que a tendência dos resíduos é sair junto com a resina pelas frestas do molde. Após a cura, a placa ficou com uma fração de volume de resina maior no centro, enquanto que nas extremidades a maior fração de volume era de resíduos de poliéster. Quanto menor a granulometria do resíduo, maior foi a quantidade de bolhas observadas, tanto na superfície quanto no interior da placa.

Com a aplicação de vácuo o problema da migração dos resíduos para as bordas foi resolvido. A quantidade de bolhas diminuiu consideravelmente e a distribuição dos resíduos na matriz se deu de maneira uniforme.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 pode-se observar a distribuição dos resíduos de poliéster na matriz. Na Figura 3.8 observa-se a concentração de resíduos nas extremidades da placa devido à compressão feita sobre a mistura com o contra molde, enquanto que na Figura 3.9 observa-se a distribuição uniforme dos resíduos na matriz obtida com a aplicação do vácuo.



Figura 3.8 – Concentração de resíduos nas extremidades da placa.



Figura 3.9 – Distribuição uniforme de resíduos na placa.

3.4. Confecção dos Corpos-de-Prova

As placas foram cortadas com um disco de corte circular diamantado, na forma de corpos-de-prova para os ensaios mecânicos de flexão e de impacto, sendo em seguida lixados para regularização das superfícies. As lixas utilizadas para tal procedimento foram lixas d'água números 150, 180, 240, 280 e 320. Para verificação de uniformidade, os corpos-de-prova tiveram suas espessuras e larguras medidas em cinco pontos diferentes com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,03 mm. A geometria e as dimensões dos corpos-de-prova

utilizados no ensaio de flexão e de impacto podem ser vistas nas Figuras 3.10 e 3.11, respectivamente.

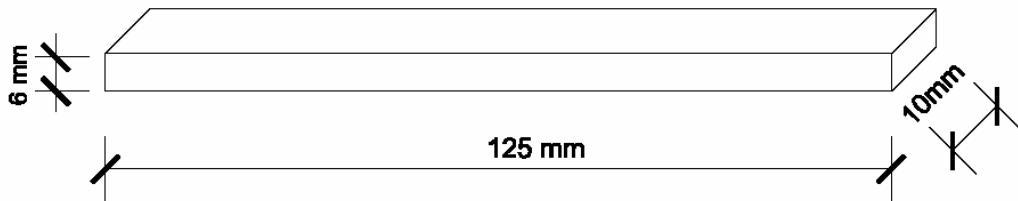


Figura 3.10 – Corpo-de-prova para ensaio de flexão.

As dimensões dos corpos-de-prova de flexão recomendadas pela norma ASTM D790 – 03 são de 127 x 12,7 x 3,2 mm. Entretanto, como um dos objetivos deste trabalho foi de analisar a influência da granulometria nas propriedades dos compósitos, os corpos-de-prova foram redimensionados, uma vez que as partículas de poliéster apresentam tamanho máximo de 4,8 mm, portanto maior que a espessura do corpo-de-prova recomendado. As dimensões dos corpos-de-prova foram modificadas para 6 x 10 x 125 mm, que são dimensões previstas na versão da mesma norma ASTM D790 – 93, de 1993.

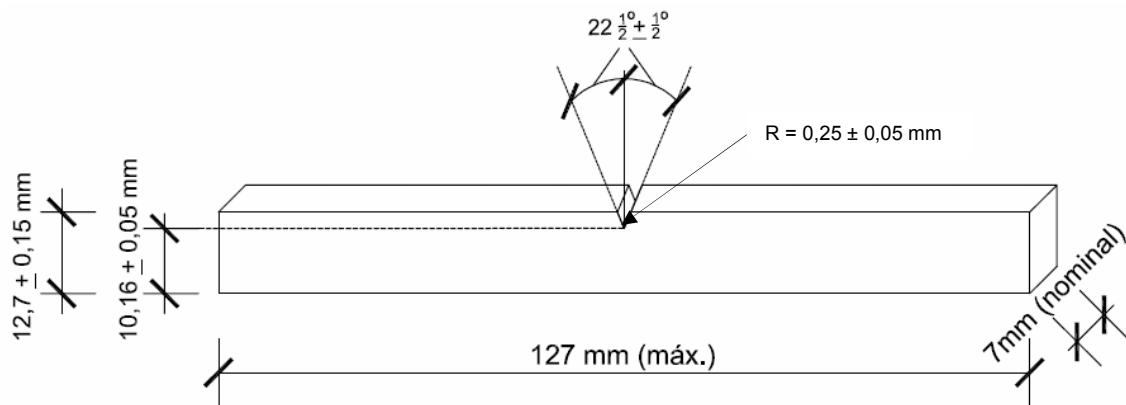


Figura 3.11 – Corpo-de-prova para ensaio de impacto.

Para a determinação da resistência ao impacto, utilizou-se o método Charpy, onde foram confeccionados corpos-de-prova nas dimensões nominais de 127 x 12,7 x 7 mm, e entalhe em V de 2,54 mm de profundidade, de acordo com recomendações da norma ASTM D 6110 – 05a [71]. O entalhe foi usinado com uma plaina limadora, sendo necessário para isso preparar um bits de aço rápido. O bits foi preparado com um ângulo de entalhe de 45° e raio de curvatura na ponta de 0,25 mm (Figura 3.12).

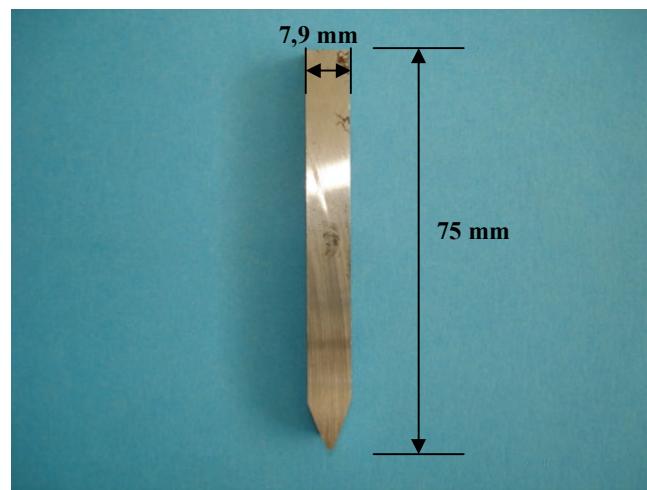


Figura 3.12 – Bits usado no entalhe dos corpos-de-prova.

Para garantir que o bits estava nas dimensões especificadas, para a preparação do entalhe nos corpos-de-prova, utilizou-se um projetor de perfil da marca Mitutoyo modelo PH – A14, onde foram observadas as suas dimensões. O projetor de perfil usado na verificação das dimensões do bits e o detalhe da usinagem do entalhe no corpo-de-prova na plaina limadora são mostrados nas Figuras 3.13 (a) e 3.13 (b) respectivamente.



Figura 3.13 – (a) Projetor de perfil e (b) detalhe da usinagem do entalhe no corpo-de-prova na plaina limadora.

3.5. Ensaio de Flexão

As propriedades mecânicas foram avaliadas, através de ensaios de flexão em três pontos. Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados em uma máquina de ensaios

universal AG1 – 100kN Shimadzu (Figura 3.14) seguindo recomendações da norma ASTM D790 – 03 [72]. Os ensaios de flexão foram realizados para a determinação do módulo de elasticidade, limite de resistência e deformação máxima dos compósitos (Apêndice). Foram utilizadas cinco amostras para cada tipo de carga com dimensões nominais de 6 x 10 x 125 mm, aplicando-se uma velocidade de 2,6 mm/min e distância entre apoios de 96 mm.

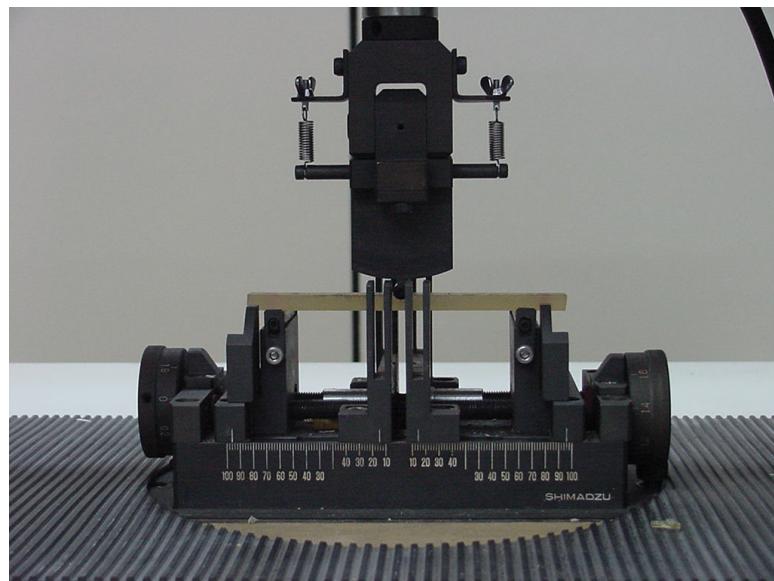


Figura 3.14 – Detalhe da máquina de ensaio de flexão em três pontos.

As equações (3.1), (3.2) e (3.3) foram utilizadas para determinar o módulo de elasticidade, o limite de resistência à flexão e a deformação máxima dos compósitos, respectivamente [71].

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (3.1)$$

Onde:

E_B = módulo de elasticidade à flexão (MPa),

L = distância entre os apoios (mm),

b = Largura do corpo-de-prova (mm),

d = espessura do corpo-de-prova (mm),

m = inclinação do trecho linear da curva força x deflexão (N/mm).

$$S_u = 3PL / 2bd^2 \quad (3.2)$$

Onde:

- S_u = Limite de resistência à flexão, (MPa),
- P = carga máxima aplicada, (N),
- L = distância entre os apoios, (mm),
- b = largura do corpo-de-prova, (mm),
- d = espessura do corpo-de-prova, (mm).

$$\varepsilon_{máx} = (6Dd / L^2) \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

- $\varepsilon_{máx}$ = deformação máxima, (%),
- D = deflexão máxima no centro do corpo-de-prova, (mm),
- d = espessura do corpo-de-prova (mm),
- L = distância entre os apoios (mm).

3.6. Ensaio de Impacto Charpy

Os ensaios de impacto foram realizados seguindo recomendações gerais da norma ASTM D 6110 – 05a [70] em uma máquina de impacto Charpy Leipzig. Cinco corpos-de-prova foram ensaiados para cada amostra. O martelo utilizado para o ensaio dos compósitos permite uma aplicação de energia de 0,49 J, com comprimento de 0,220 m, massa de 0,117 kg e velocidade de impacto de 2,89 m/s. O ensaio foi realizado para a determinação da resistência ao impacto, sendo os valores obtidos através das medidas dos cinco corpos-de-prova para cada tipo de compósito. O comprimento do pêndulo e a energia de impacto usados neste trabalho não estão em conformidade com os valores estabelecidos na norma ASTM D 6110 – 05a [71]. Segundo a norma, o comprimento do pêndulo deveria estar entre 0,325 m e 0,406 m e o martelo utilizado aplicar uma energia de impacto de 2,7 J. Entretanto, mesmo com uma energia inicial de 0,49 J, a energia necessária para romper o corpo-de-prova foi menor que 85% da energia inicial, como requer a norma. Na Figura 3.15 é mostrado o equipamento usado para o ensaio de impacto.



Figura 3.15 – Máquina de ensaio Charpy.

Antes de determinar a resistência ao impacto das amostras, o equipamento de ensaio Charpy foi calibrado através do cálculo de correção de perda de energia, de acordo com o procedimento estabelecido no Anexo A2 da norma ASTM D 6110 – 05a.

Determinou-se o comprimento do pêndulo ($L = 0,220\text{ m}$) e a altura máxima do centro de percussão na posição inicial do pêndulo ($h_M = 0,4267\text{ m}$). Em seguida, iniciou-se o processo de calibração, seguindo a seguinte ordem:

1. Com o pêndulo na posição inicial e o ponteiro do marcador na posição zero, soltou-se o pêndulo para o primeiro balanço sem corpo-de-prova, para se medir a energia de correção (E_A) de perda de energia por atrito com o ar e por atrito do ponteiro no marcador. O valor medido foi $E_A = 0,0027\text{ Kgf} \cdot \text{m} = 0,0264\text{ J}$. Esta é lida na escala de energia do equipamento especificada para o pêndulo utilizado, que é de $E_M = 0,05\text{ Kgf} \cdot \text{m} = 0,4891\text{J}$;
2. Sem reiniciar a posição do marcador, mediu-se a correção de energia (E_B), depois de duas liberações adicionais do pêndulo, sem o corpo-de-prova, onde foi medido $E_B = 0,001\text{ Kgf} \cdot \text{m} = 0,0098\text{ J}$;

3. Calculou-se o ângulo máximo percorrido com um balanço do pêndulo ($\beta_{máx}$), através da equação:

$$\beta_{máx} = \cos^{-1} \{1 - [(h_M / L)(1 - E_A / E_M)]\} \quad (3.4)$$

Onde:

E_A = correção da energia por atrito do pêndulo com o ar e por atrito do ponteiro no marcador (J),

E_M = energia total do pêndulo (J),

L = comprimento do pêndulo. Distância do centro de rotação ao centro de percussão (m),

h_M = altura máxima do centro de percussão do pêndulo no início do teste (m),

$\beta_{máx}$ = ângulo máximo percorrido com um balanço do pêndulo.

O valor de $\beta_{máx}$ obtido foi de 146,58°.

Após o procedimento de calibração do equipamento, iniciaram-se os ensaios de impacto nos corpos-de-prova, fazendo-se as medições das energias de rompimento (E_S), em Joules. Em seguida, calculou-se a medida do ângulo percorrido para cada amostra (β), com suas respectivas energias de rompimento, através da seguinte equação:

$$\beta = \cos^{-1} \{1 - [(h_M / L)(1 - E_S / E_M)]\} \quad (3.5)$$

Onde:

β = ângulo percorrido pelo pêndulo para uma determinada amostra, e

E_S = leitura da energia de rompimento para cada amostra (J).

Com os valores dos ângulos para cada corpo-de-prova, calculou-se a energia total de correção (E_{TC}) para cada um deles, com a seguinte equação:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B / 2))(\beta / \beta_{máx}) + (E_B / 2) \quad (3.6)$$

Onde:

E_{TC} = energia total de correção para a energia de rompimento, E_s , de uma amostra (J),
 E_B = correção da energia de atrito do pêndulo (J).

Por último, os valores de correção de energia (E_{TC}) foram usados para se calcular a resistência ao impacto (I_s), para cada corpo-de-prova. A equação usada foi:

$$I_s = (E_s - E_{TC}) / t \quad (3.7)$$

Onde:

I_s = resistência ao impacto da amostra (J/m), por unidade de espessura;
 t = espessura da amostra (m).

3.7. Análise Granulométrica das Cargas

A distribuição granulométrica das amostras de poliéster, EVA e areia foi obtida através do método de pesagem de massa residual ou porcentagem retida em peneiras padronizadas ASTM, de acordo com a NBR – 7217 [73]. De acordo com esta norma, a amostra a ser testada não deve ter massa inferior a 1000 g. Entretanto por se tratar de resíduos com densidade baixa, foram usados 300 g de poliéster e 100 g de EVA para esse ensaio. As amostras foram peneiradas, através da série normal de peneiras padronizadas pela ABNT, de modo que as partículas foram separadas e classificadas em diferentes tamanhos. Foi utilizado um agitador eletromecânico de peneiras Viatest, modelo 76773. O tempo de peneiramento foi de 30 min. Por se tratar de um pó muito fino, a distribuição granulométrica da diatomita foi obtida em um granulômetro a laser da marca Cilas, modelo 920L.

3.8. Análise Microscópica e Química

As superfícies de fratura dos corpos-de-prova foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um equipamento Philips, modelo XL-30-ESEM, operando a 20 kV e utilizando detector de elétrons secundários. As amostras foram preparadas a partir dos corpos-de-prova ensaiados no ensaio de impacto. Para a análise fractográfica no MEV, as amostras foram presas a um suporte com auxílio de uma fita de carbono e a superfície da fratura foi submetida ao revestimento com carbono. As amostras foram

submetidas a um exame de sua microestrutura com o objetivo de detectar possíveis defeitos no processo de confecção dos compósitos como a presença de bolhas, distribuição das cargas na matriz, má impregnação por parte da resina nas cargas, bem como, da qualidade da aderência nas interfaces carga/matriz. A caracterização morfológica das cargas (resíduo de poliéster, resíduo de EVA, areia e diatomita) também foi feita por microscopia eletrônica de varredura. A composição química da areia e da diatomita foi determinada por fluorescência de raios-x.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios obtidos nas etapas metodológicas relatadas, de acordo com a seguinte ordem:

- 1) Análise granulométrica das cargas;
- 2) Confecção das placas;
- 3) Ensaio de flexão
- 4) Ensaio de impacto;
- 5) Análise microscópica e química das cargas.
- 6) Análise microscópica dos compósitos.

4.1. Análise Granulométrica das Cargas

Na Tabela 4.1 encontram-se as composições granulométricas do poliéster (após serem triturados), do EVA e da areia (na forma em que foram recebidos), mostrando os percentuais retidos acumulados (R.A.) nas peneiras e os percentuais passantes, enquanto que na Tabela 4.2 encontra-se a composição granulométrica da diatomita. Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, são apresentadas, as curvas granulométricas do poliéster, do EVA, da areia e da diatomita, respectivamente.

A curva granulométrica do resíduo de poliéster é mostrada na Figura 4.1. A amostra apresenta uma larga distribuição de tamanhos de partículas, se comparada com as demais cargas (EVA, areia e diatomita).

Os resultados da Tabela 4.1 mostram que o diâmetro máximo das partículas do resíduo de EVA é o mesmo da areia. A maior quantidade de EVA retida foi na peneira de abertura 0,15 mm (60,95%), enquanto que para a areia a maior quantidade ficou retida na peneira de 0,3 mm (76,46%). Fazendo-se uma análise do tamanho dos grãos, verifica-se que a maioria dos grãos, tanto do EVA quanto da areia, estão entre 0,15 e 0,3 mm.

A areia é constituída por um conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetro equivalente) estão compreendidas entre 0,05 mm e 4,8 mm [73]. Dentro desta faixa, pode-se dizer, ainda, que aquelas que têm esta medida inferior a 0,42 mm são consideradas areias finas, e as demais são as areias grossas. De acordo com a NBR 7217, a areia utilizada na confecção dos compósitos foi classificada como fina, pois apresentou 96 % de material retido nas peneiras com 0,30 e 0,15 mm de abertura.

Na análise granulométrica da diatomita, o diâmetro das partículas variou de 4,40 µm a 114,08 µm (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 – Composição granulométrica do poliéster, do EVA e da areia

Peneiras (mm)	Poliéster		EVA		Areia	
	% R. A.	% Passante	% R. A.	% Passante	% R. A.	% Passante
6,3	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
4,8	0,62	99,38	0,00	100,00	0,00	100,00
2,4	58,81	41,19	0,00	100,00	0,00	100,00
1,2	80,22	19,78	0,00	100,00	0,00	100,00
0,6	92,24	7,76	0,02	99,98	2,65	97,35
0,3	96,66	3,34	25,84	74,16	79,11	20,89
0,15	98,24	1,76	86,79	13,21	99,04	0,96
Fundo	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
Diâmetro Máx. (mm)	4,80		0,60		0,60	

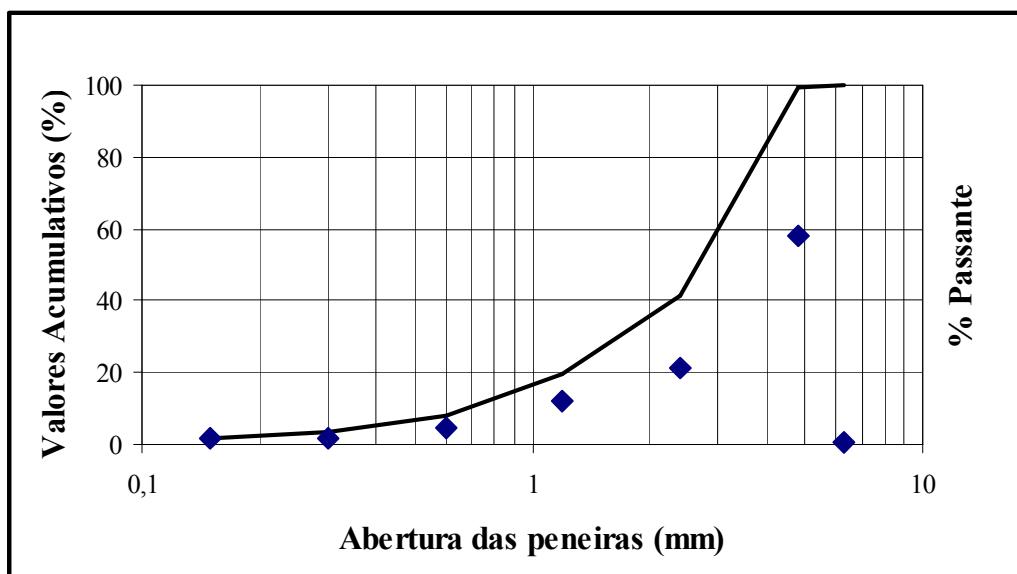


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica do poliéster.

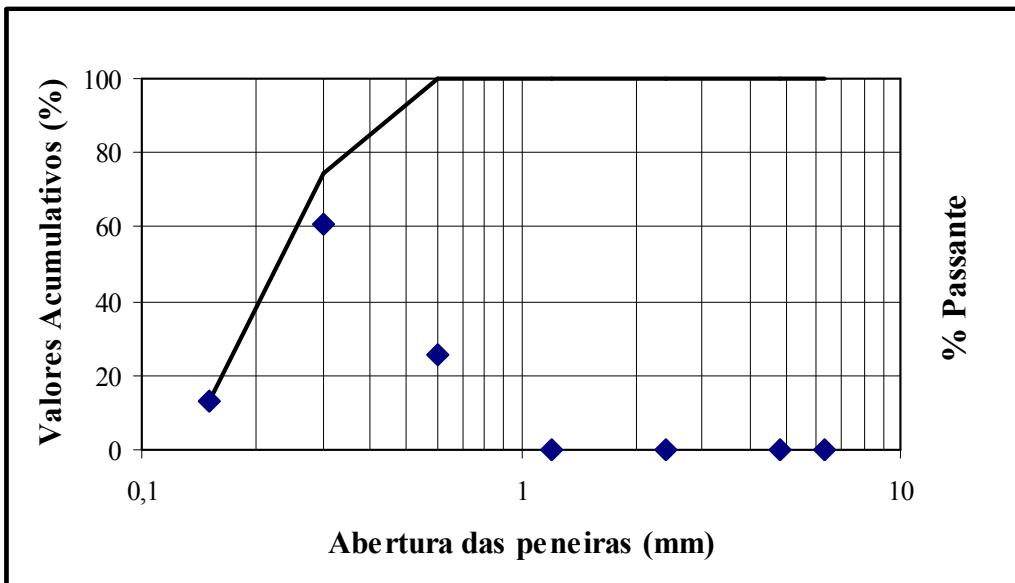


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica do EVA.

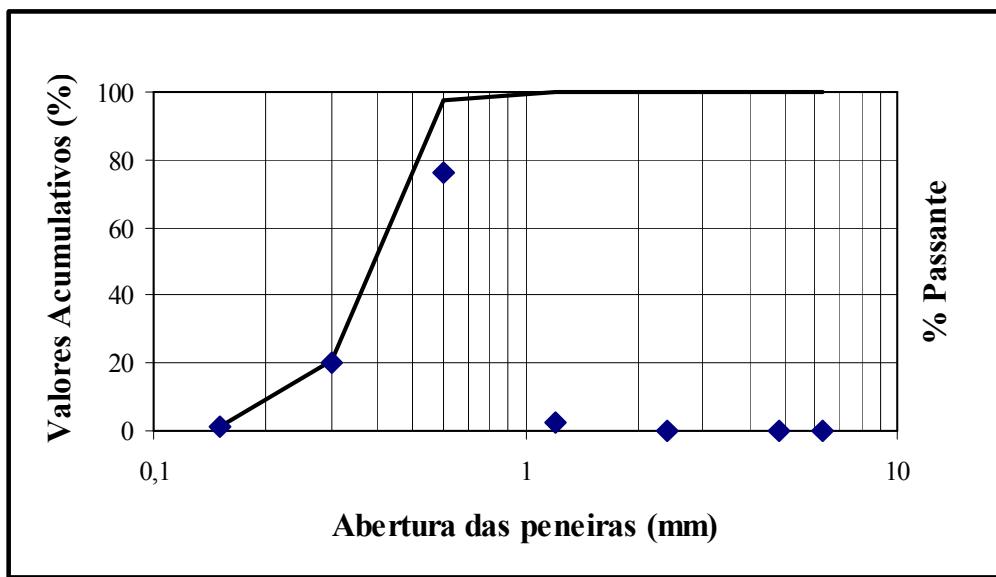


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da areia.

Tabela 4.2 – Composição granulométrica da diatomita

Granulometria	% Acumulado
Diâmetro de até 4,40 μm	10% das partículas
Diâmetro de até 27,34 μm	50% das partículas
Diâmetro de até 114,08 μm	90% das partículas

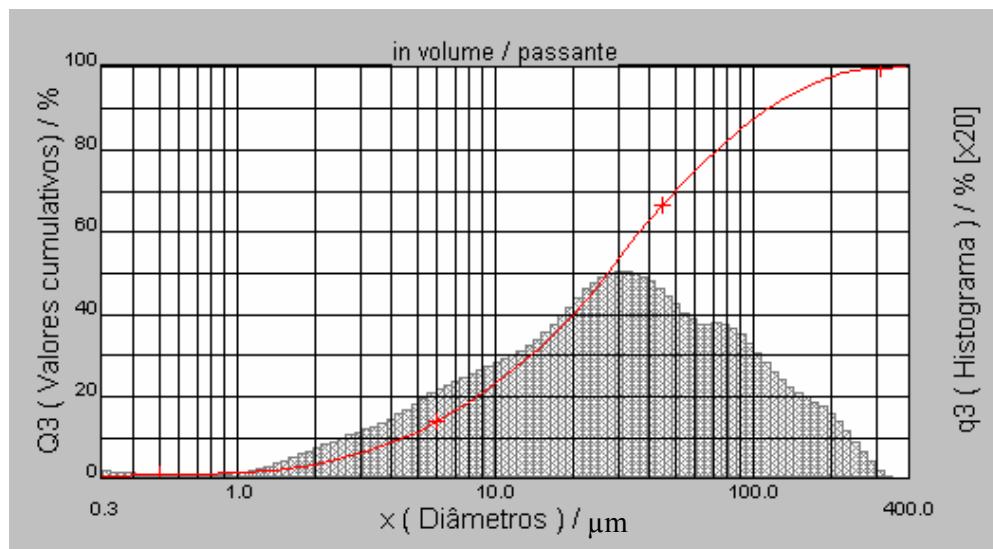


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da diatomita.

4.2. Confecção das Placas

Ensaios preliminares mostraram a necessidade de se aplicar vácuo na confecção das placas, devido à grande presença de bolhas nos compósitos. Portanto, os resultados apresentados a seguir, dizem respeito ao processo de confecção das placas com aplicação de vácuo. Após a desmoldagem das placas, foi feita uma análise visual de cada uma, para se verificar problemas decorridos do processo de confecção dos compósitos. Defeitos no processo de confecção também causam defeitos danosos no material, como a presença de microvazios, ou bolhas, que afetam significativamente a resistência ao cisalhamento.

4.2.1. Placas Confeccionadas com Resíduo de Poliéster

Nas placas confeccionadas com poliéster, observou-se que quanto menor o tamanho dos grãos, maior foi a quantidade de bolhas no interior do compósito.

As placas com menor tamanho de grão (0,3 mm) apresentaram vazios tanto na superfície quanto no interior do compósito. Isto ocorreu devido à grande concentração de partículas, que fez com que as bolhas existentes na mistura não se deslocassem até a superfície. Já as placas com o maior tamanho de grão (1,2 mm), praticamente, não apresentaram vazios no interior das mesmas. Isto pode ser associado ao maior espaço entre os grãos, que facilitou a migração das bolhas para a superfície. Este fato foi observado após o corte das placas para a confecção dos corpos-de-prova para ensaios de impacto. Na Figura 4.5 mostra-se os corpos-de-prova de poliéster para as três granulometrias. Foi observada uma maior presença de vazios no interior dos corpos-de-prova com granulometria de 0,3 mm. Na amostra com 0,6 mm e 1,2 mm do resíduo, observa-se que a presença de vazios praticamente não existe. As regiões com maior concentração de vazios estão indicadas com setas brancas.

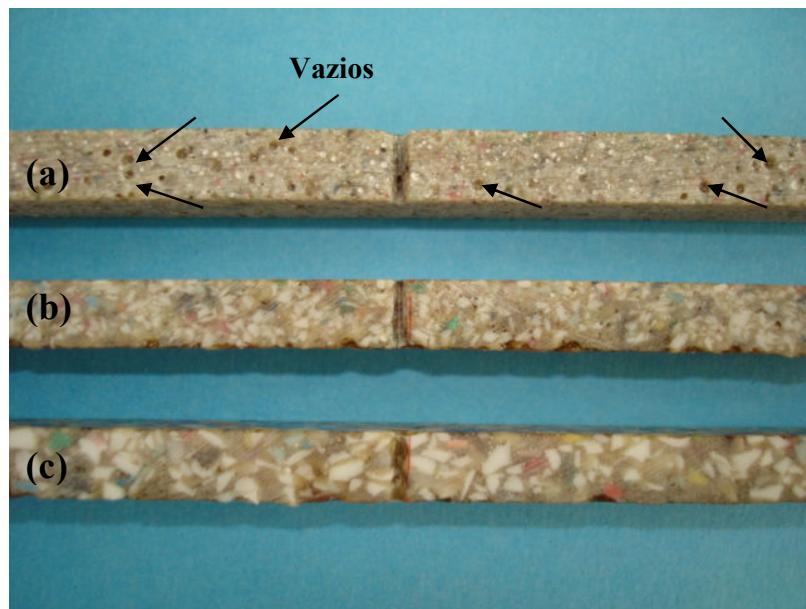


Figura 4.5 – Corpos de prova para ensaio de impacto com as três granulometrias de poliéster.

(a) 0,3 mm, (b) 0,6 mm e (c) 1,2 mm.

4.2.2. Placas Confeccionadas com Resíduo de EVA

Para as placas confeccionadas com adição de resíduo de EVA, observou-se que quanto maior o percentual de EVA, menor foi a quantidade de bolhas na superfície da placa, porém, no interior do compósito observou-se uma maior quantidade de bolhas.

As placas com o menor percentual de EVA (7,5%) apresentaram pequenas bolhas em sua superfície, sendo desprezível a quantidade delas no interior do compósito. Isto ocorreu devido à aplicação do vácuo, que fez com que as bolhas existentes na mistura se deslocassem

até a superfície. Já as placas com o maior percentual de EVA (12,5%) apresentaram maior quantidade de bolhas no interior das placas, sendo desprezível a quantidade delas na superfície das placas. Isto pode ser associado ao aumento na viscosidade da mistura, com o aumento no percentual de EVA, que dificultou a migração das bolhas para a superfície, levando ao aprisionamento das mesmas no interior do compósito. Após o corte das placas, para a confecção dos corpos-de-prova, estes foram lixados para a retirada dos vazios deixados pelas bolhas superficiais das placas.

A presença de vazios no interior do compósito foi observada, após o corte das placas para a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de impacto. Na Figura 4.6 mostra-se os corpos-de-prova para os três percentuais de EVA. Foi observada uma maior presença de vazios nos corpos-de-prova com 12,5% de EVA. Na amostra com 7,5% do resíduo, observa-se que a presença de defeitos ocasionados pela presença de bolhas praticamente não existe. As regiões com maior concentração de vazios deixados pelas bolhas estão indicadas com setas brancas.

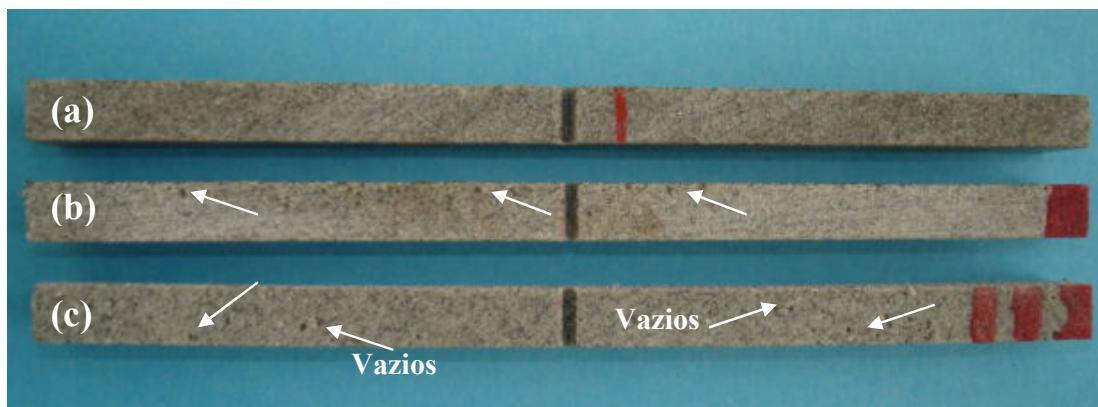


Figura 4.6 – Corpos de prova para ensaio de impacto com os três percentuais de EVA. (a) 7,5% de EVA, (b) 10% de EVA e (c) 12,5% de EVA.

4.2.3. Placas Confeccionadas com Areia

Foram confeccionadas placas com 50% e 75% em massa de carga de areia. As placas com 50% apresentaram decantação da areia no fundo do molde, uma vez que a fase dispersa possui densidade maior que a matriz.

Devido a essa variação de densidade e a contração da resina, no processo de cura, a região superior da placa com maior fração de volume de resina se contraiu mais, por possuir menor módulo que a região inferior, onde a fração de volume de carga é maior, reduzindo

assim a contração. O resultado foi uma placa distorcida e com variação de propriedades na espessura.

Na Figura 4.7 observa-se a placa distorcida devido à distribuição não uniforme da carga na resina e ao efeito da contração no processo de cura causando a curvatura da placa.

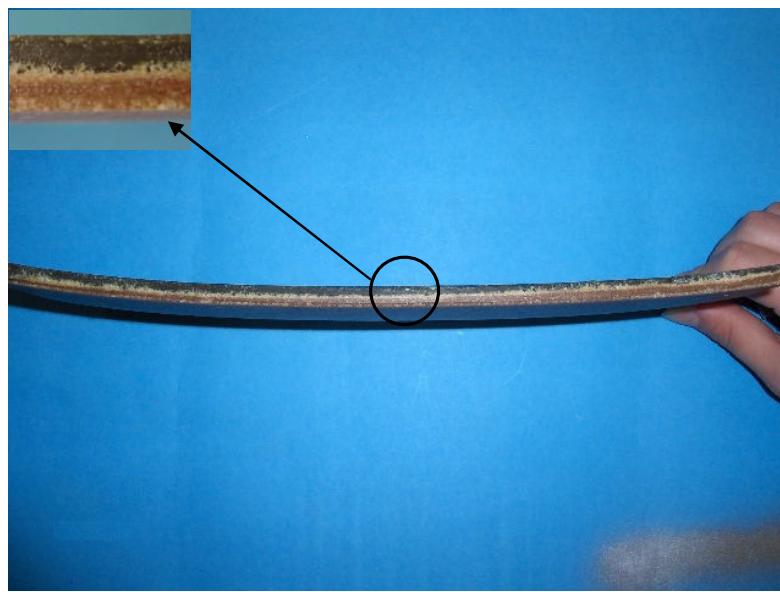


Figura 4.7 – Distorção da placa com 50% de areia.

Para solucionar o problema da distribuição das partículas, a quantidade de carga de areia foi aumentada para 75% de areia, o mesmo percentual utilizado por uma empresa local fabricante de tubulações de fibra de vidro, visando a redução de custos e o aumento na rigidez da tubulação. Com esse percentual o problema da decantação da areia foi solucionado, havendo assim, uma distribuição uniforme da carga de areia na matriz, e preenchimento de toda a cavidade do molde. Portanto, somente a placa com 75 % de areia foi utilizada para os testes mecânicos.

4.2.4. Placas Confeccionadas com Diatomita

Inicialmente, placas com 50% de diatomita foram confeccionadas, mas verificou-se certa dificuldade no escoamento da mistura no molde. Por se tratar de partículas muito pequenas, a diatomita também aumentou muito a viscosidade da resina, dificultando assim a retirada de bolhas de ar do compósito.

Diante destes problemas os percentuais utilizados na confecção de placas para os ensaios mecânicos foram de 20% e 40%. As placas confeccionadas com 40% de diatomita

apresentaram uma superfície mais áspera, devido ao maior percentual de diatomita na mistura. A placa com 20% de diatomita sofreu uma pequena distorção durante o processo de cura, enquanto que a placa com 40% não apresentou este problema. Esta distorção é mostrada na Figura 4.8, onde a placa com 20% de diatomita está sobreposta a de 40%, mostrando a distorção em relação a outra. O percentual de 40% de diatomita utilizado como carga se mostrou ideal, pois reduziu a tendência natural da resina de se contrair durante a cura.

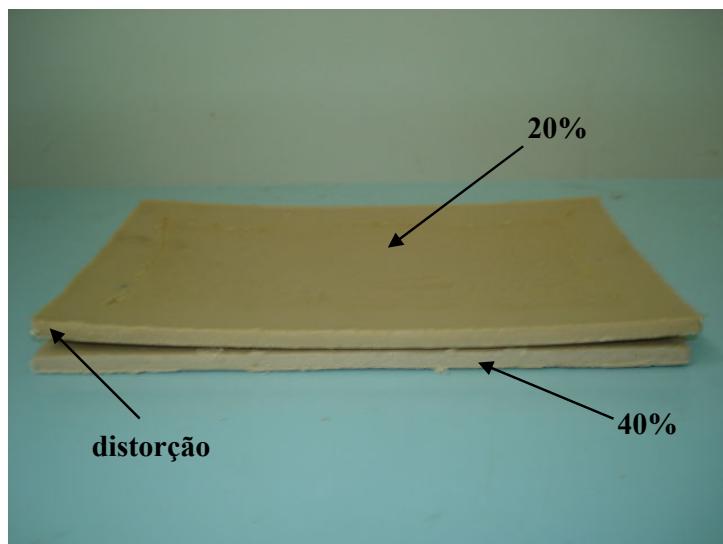


Figura 4.8 – Distorção da placa com 20% de diatomita.

4.3. Ensaios de Flexão

Os ensaios de flexão em três pontos forneceram três informações referentes aos compósitos com adição de cargas, obtidos em relação ao compósito sem carga: módulo de elasticidade (E), limite de resistência à flexão (S_u) e deformação até a ruptura ($\epsilon_{máx}$). Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de flexão com os valores médios e os respectivos desvios padrão calculados de acordo com a norma ASTM D 790 – 03 estão mostrados na Tabela 4.3. Os mesmos resultados estão apresentados graficamente nas Figuras 4.9 a 4.20.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas dos compósitos

Carga	E (GPa)		S _u (MPa)		ε _{máx} (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Sem carga	2,5	0,2	90,8	5,2	1,35	0,05
Poliéster 48 mesh	2,1	0,1	26,8	2	0,32	0,02
Poliéster 28 mesh	2,1	0,07	20,1	1,5	0,25	0,02
Poliéster 14 mesh	2,1	0,1	19,6	1,5	0,23	0,03
EVA 7,5%	1,7	0,1	18,5	0,5	0,28	0,02
EVA 10%	1,2	0,06	17,9	2,2	0,38	0,05
EVA 12,5%	1,1	0,10	12,5	3,1	0,28	0,06
Areia	5,7	0,6	15,2	0,9	0,16	0,02
Diatomita 20%	3,3	0,6	33,3	6,0	0,28	0,03
Diatomita 40%	4,5	0,3	32,6	3,2	0,20	0,02
Areia + Diatomita	6,7	0,3	17,8	0,8	0,13	0,01

Nas Figuras 4.9 a 4.11 estão apresentados os resultados dos módulos de elasticidade dos compósitos confeccionados com poliéster, EVA e diatomita.

Os compósitos com a adição de resíduo de poliéster apresentaram o mesmo módulo para as três granulometrias (48 mesh, 28 mesh e 14 mesh), como mostra a Figura 4.9. Portanto, a variação na granulometria das partículas não promoveu influência nos resultados, obtendo-se assim valores de módulos iguais (2,1 GPa), já que se trata, basicamente, da mesma família de poliéster da matriz.

Com relação ao EVA, observou-se uma tendência de redução no módulo com o aumento do percentual do resíduo adicionado à matriz poliéster. O módulo dos compósitos com adição de EVA, para os três percentuais utilizados, pode ser visto na Figura 4.10, onde observa-se a redução do módulo com o aumento do percentual de carga, tendo-se o maior valor de módulo para o percentual de 7,5%, que foi de 1,7 GPa. O aumento no percentual em massa do resíduo de EVA no compósito diminuiu o módulo do mesmo, por se tratar de uma carga de módulo menor que a matriz.

Os módulos dos compósitos com a adição de 20 % e 40% de diatomita podem ser observados na Figura 4.11. Percebe-se que, o aumento no percentual de diatomita ocasionou um aumento nos valores do módulo, obtendo-se o maior valor para o compósito com adição de 40% (4,5 GPa).

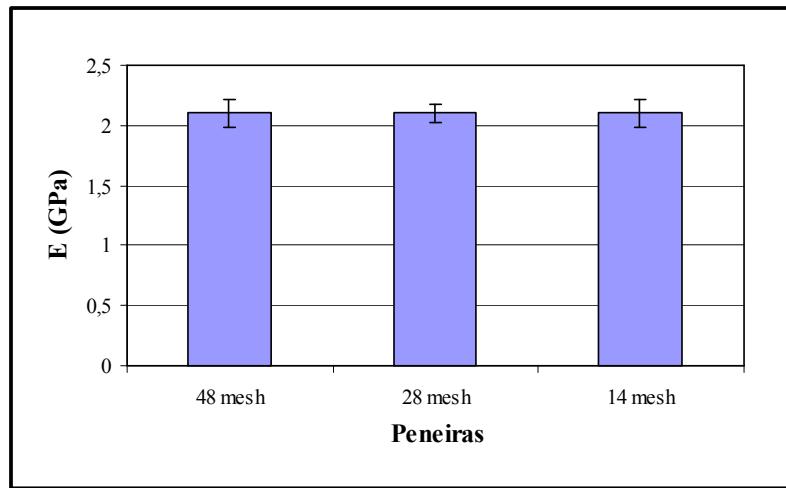


Figura 4.9 – Módulo de elasticidade dos compósitos com adição de poliéster.

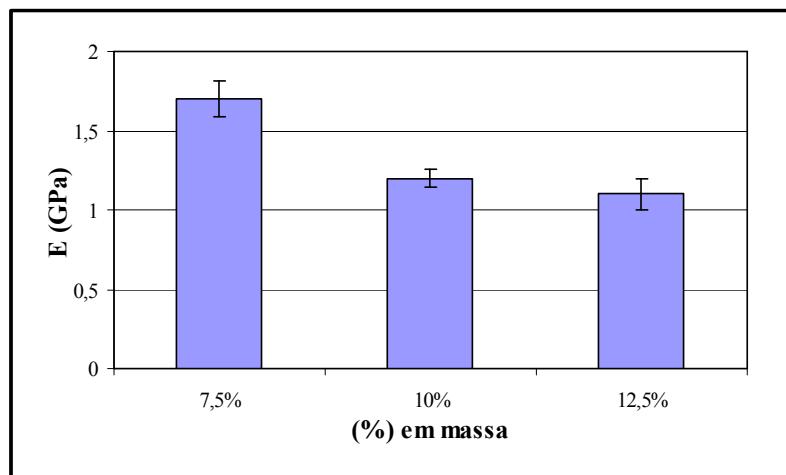


Figura 4.10 – Módulo de elasticidade dos compósitos com adição EVA.

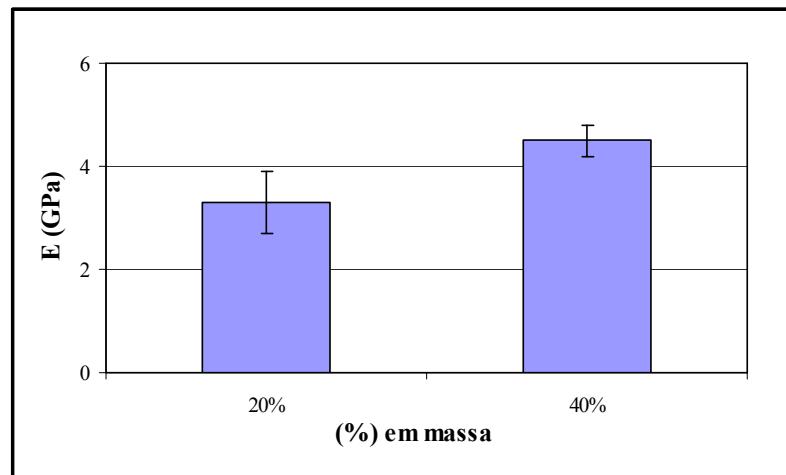


Figura 4.11 – Módulo de elasticidade dos compósitos com adição de diatomita.

Os limites de resistência à flexão dos compósitos com adição de poliéster, EVA e diatomita são mostrados nas Figuras 4.12 a 4.14.

Nos compósitos onde foram adicionados poliéster, observou-se uma redução no limite de resistência com o aumento do tamanho das partículas, apesar de não ter tido variação nos valores de limite de resistência entre os compósitos confeccionados com as granulometrias de 28 mesh e de 14 mesh (Figura 4.12). O maior valor no limite de resistência entre os compósitos confeccionados com poliéster foi de 26,8 MPa, para a menor granulometria (48 mesh).

Em relação aos compósitos com adição de EVA o limite de resistência foi, praticamente, o mesmo para os percentuais de 7,5% e 10% (aproximadamente 18 MPa), havendo uma queda para 12,5 MPa no compósito com 12,5% de EVA, como pode ser visto na Figura 4.13.

Já a diferença nos percentuais em massa (20% e 40%) de diatomita adicionados aos compósitos não promoveram diferença nos valores do limite de resistência, obtendo-se assim, o valor médio de 33 MPa, como mostra a Figura 4.14.

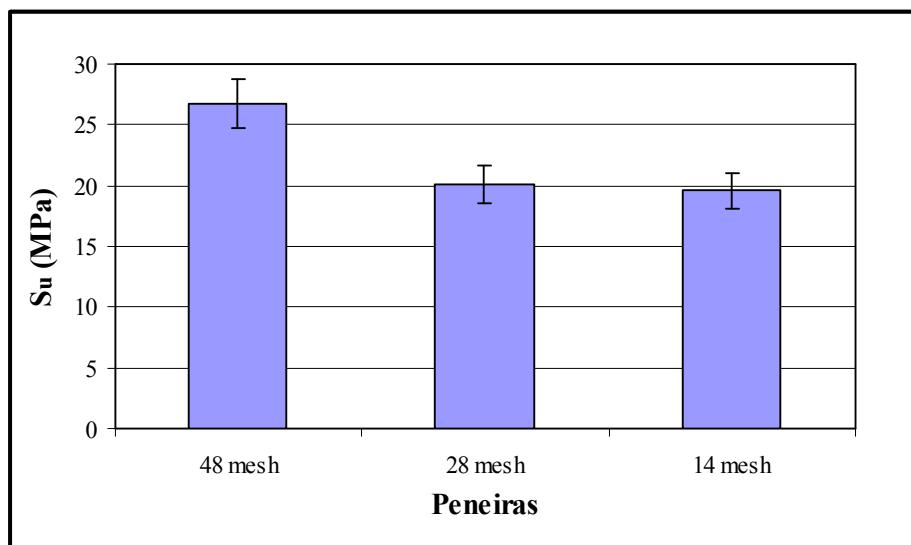


Figura 4.12 – Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de poliéster.

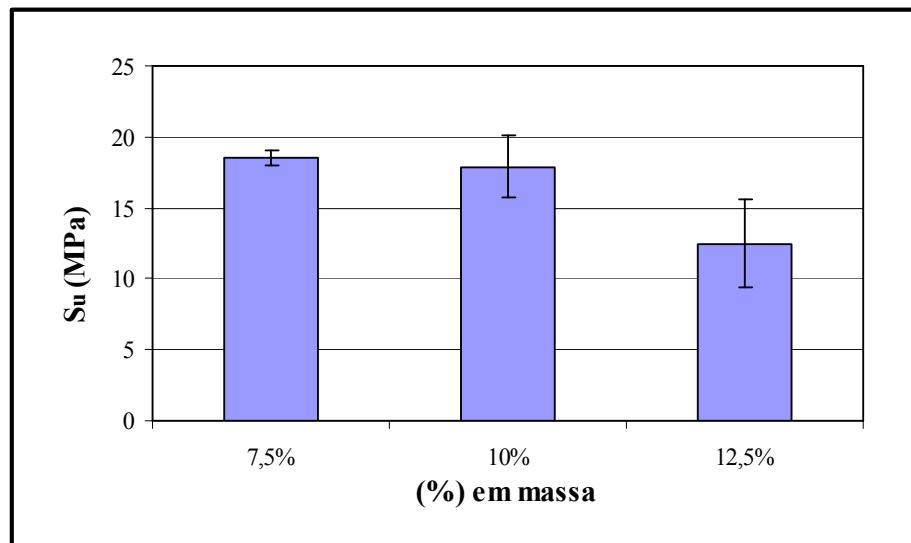


Figura 4.13 – Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de EVA.

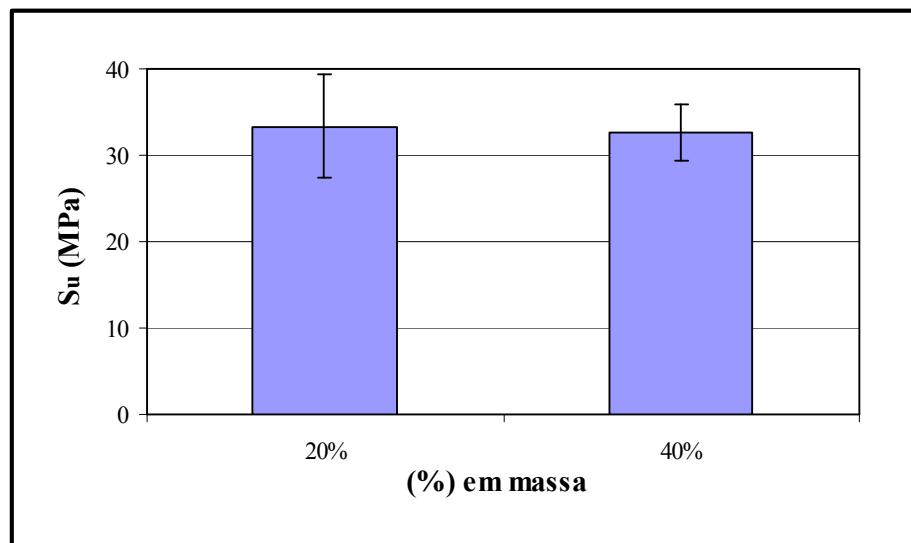


Figura 4.14 – Limite de resistência a flexão dos compósitos com adição de diatomita.

A deformação máxima dos compósitos com adição de poliéster, EVA e diatomita é mostrada nas Figuras 4.15 a 4.17.

Na Figura 4.15 observa-se a redução na deformação máxima com o aumento do tamanho das partículas. Assim como o limite de resistência, o aumento do tamanho das partículas também influenciou nos valores de deformação, ocasionando numa redução dessa propriedade. Essa limitação de deformação máxima, para os compósitos com carga de poliéster de tamanho de partícula maior, pode ser um importante fator de influência para a queda no limite de resistência.

Nos compósitos com adição de EVA a deformação foi a mesma para os percentuais de 7,5% e 12,5% (0,28%), tendo uma maior deformação para o percentual de 10%, onde este valor foi de 0,38% (Figura 4.16). Este aumento de deformação na ruptura influenciou de forma positiva a resistência mecânica dos compósitos com 10 % de EVA (Figura 4.13).

Ao contrário do módulo, onde os valores aumentaram com o aumento no percentual de diatomita, a deformação diminuiu com o aumento no percentual em massa de 20% para 40% (Figura 4.17). Apesar da diatomita ser uma carga de reforço, esta redução de deformação na ruptura com o aumento do percentual de carga influenciou de forma negativa a resistência mecânica, que não aumentou com o aumento da fração de massa.

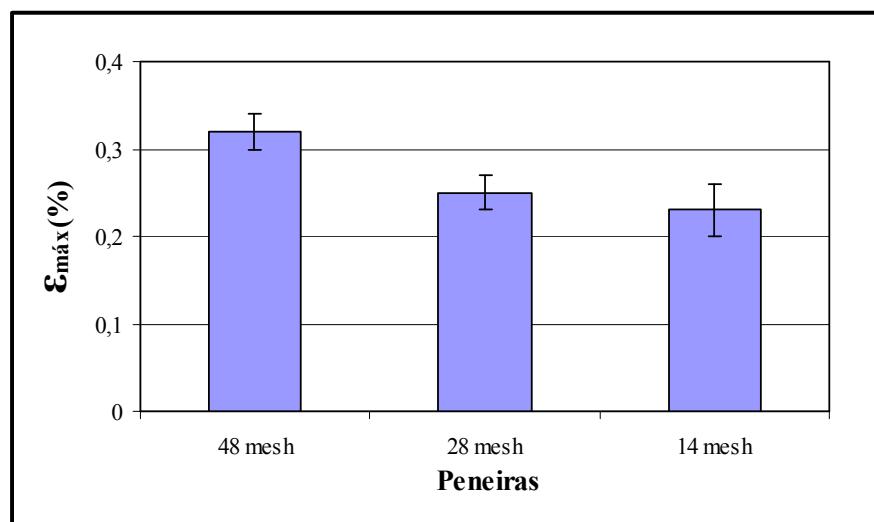


Figura 4.15 – Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de poliéster.

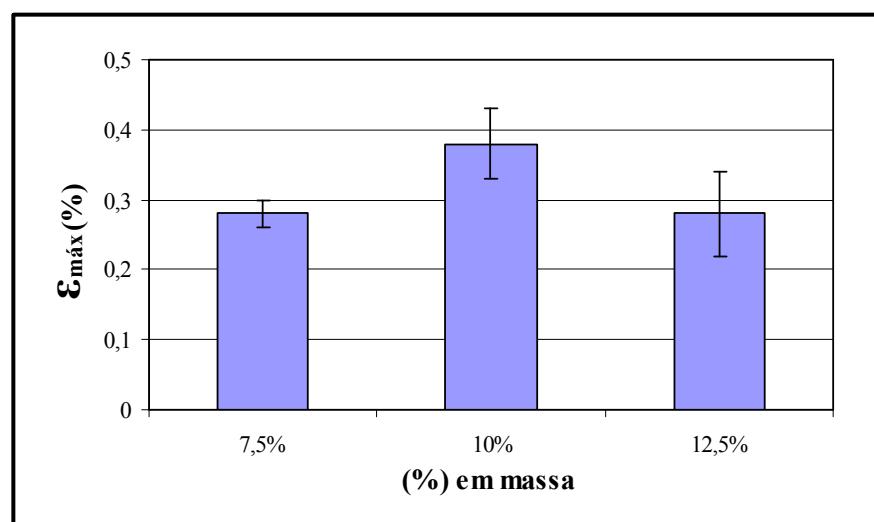


Figura 4.16 – Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de EVA.

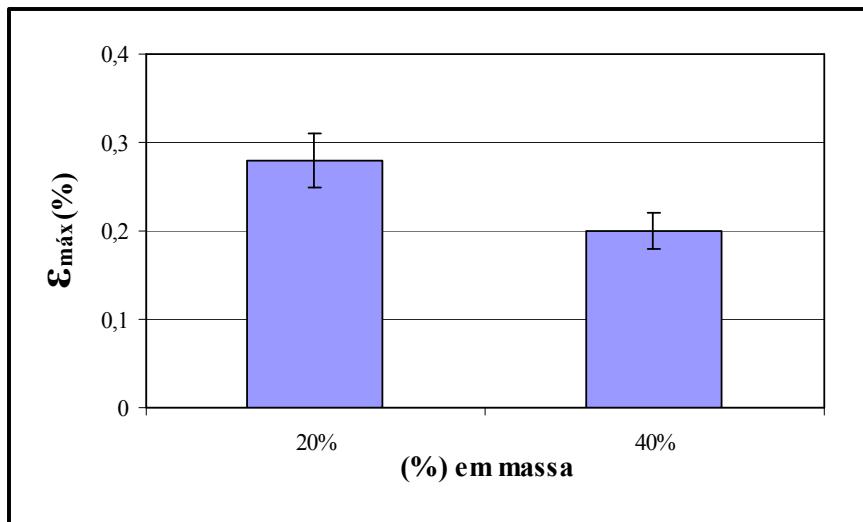


Figura 4.17 – Deformação máxima na flexão dos compósitos com adição de diatomita.

Os valores dos módulos, dos limites de resistência e das deformações máximas, para todos os compósitos com adição de cargas, são mostrados nas Figuras 4.18 a 4.20, onde são comparados com os valores da resina pura.

Os resultados dos ensaios de flexão realizados neste trabalho revelam que a adição de cargas em compósitos pode resultar em um aumento ou decréscimo nos valores do módulo de elasticidade em relação à resina pura, dependendo do tipo de carga (Figura 4.18). Os aumentos no módulo de elasticidade em relação à resina pura chegaram a 128 % para o compósito com adição de areia, 168 % para o compósito com adição de areia e diatomita e 80 % para o compósito com adição de 40% de diatomita, havendo uma queda no módulo para os compósitos com poliéster e EVA. A maior queda foi observada no compósito com EVA, obtendo-se o menor valor para o compósito com 12,5 % de EVA (1,1 GPa).

Com relação aos compósitos confeccionados com poliéster, o módulo foi o mesmo para as três granulometrias, chegando a uma redução de 19% em relação à resina pura, obtendo-se um módulo de 2,1 GPa. Não houve uma redução significativa no módulo para este tipo de compósito, já que a carga se trata, basicamente, da mesma família da matriz. Esta redução de módulo pode ser explicado por uma variação na composição da resina de poliéster utilizada nas cargas, em relação a resina poliéster da matriz.

Os compósitos confeccionados com EVA apresentaram valores de módulo abaixo dos compósitos sem adição de carga. Esse resultado já era esperado devido ao baixo módulo da carga [74]. Além disto, a grande quantidade de vazios no compósito com adição de 12,5 %

de EVA contribuiu para a redução no módulo, uma vez que o compósito com este percentual apresentou maior quantidade de vazios.

Nos compósitos com adição de areia o módulo chegou a 5,7 GPa, correspondendo a um aumento de 128 % em relação à resina pura. Esse aumento deve-se a alto módulo da carga de areia em relação à matriz.

Observou-se também que os valores de módulo dos compósitos com adição de diatomita, aumentaram com o aumento no percentual adicionado, chegando a 3,3 GPa para o percentual de 20 % e 4,5 GPa para o percentual de 40 %. Se comparados com os valores da resina pura, o aumento no módulo chegou a 32% para os compósitos com 20 % em massa de diatomita e 80 % para os compósitos com 40 %. O aumento na concentração de diatomita presente na matriz polimérica fornece uma mistura homogeneamente dispersa. Por se tratar de uma carga porosa, a adesão da diatomita com a matriz facilitou a transferência de esforços entre a matriz e o reforço.

No compósito com a mistura de areia e diatomita (70 % areia e 5 % diatomita), verificou-se que o módulo aumentou em 168 % em relação à resina pura e em 18 % em relação ao compósito somente com areia. A adição de diatomita à areia contribuiu para uma maior interação entre os grãos, diminuindo os vazios no compósito. A diatomita preencheu os vazios entre os grãos de areia, fortalecendo, assim, a interface do sistema, o que é fundamental para a transferência de tensões entre as fases presentes, resultando no aumento do módulo no compósito.

No caso do limite de resistência, observou-se uma redução dessa propriedade com a adição de carga, para todos os tipos de carga estudados (Figura 4.19). A aplicação de cargas provocou um aumento de porosidade no material. Os microvazios podem agir como concentradores de tensões, reduzindo as propriedades mecânicas dos compósitos [75]. O compósito reforçado com 12,5% em massa de EVA teve a maior redução no limite de resistência, chegando a aproximadamente 14% do limite de resistência da resina pura, atingindo o valor mais baixo que foi de 12,5 MPa. Nos compósitos com adição de cargas, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração do carregamento aplicado. O grau de reforço depende de uma ligação forte na interface da matriz-partícula [5]. Entretanto, as partículas também podem atuar como agentes nucleadores de trincas e assim contribuir para a redução da resistência mecânica dos compósitos [17].

A deformação máxima para todos os materiais estudados é mostrada na Figura 4.20. Observa-se uma redução dessa propriedade para todos os compósitos com adição de carga. Os valores de deformação até a ruptura dos materiais compósitos diminuíram em relação à resina

pura, independentemente da quantidade e do tipo de carga. A redução na deformação máxima para todos os compósitos com adição de cargas está associada com a redução da resistência máxima, como foi observado. Os compósitos reforçados com areia e os reforçados com a mistura de areia e diatomita apresentaram a menor deformação, antes da ruptura.

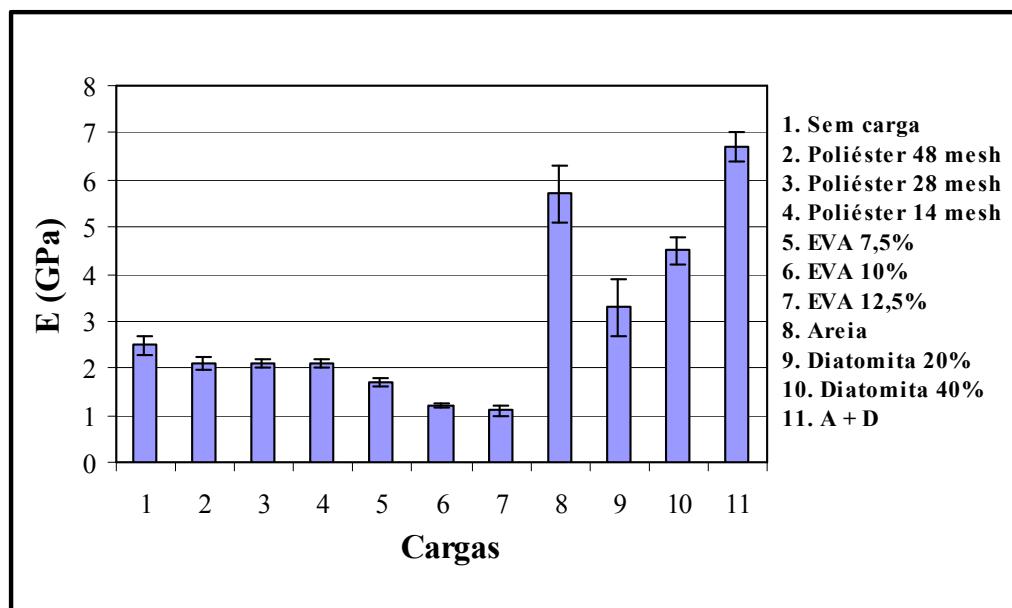


Figura 4.18 – Módulo de elasticidade dos compósitos.

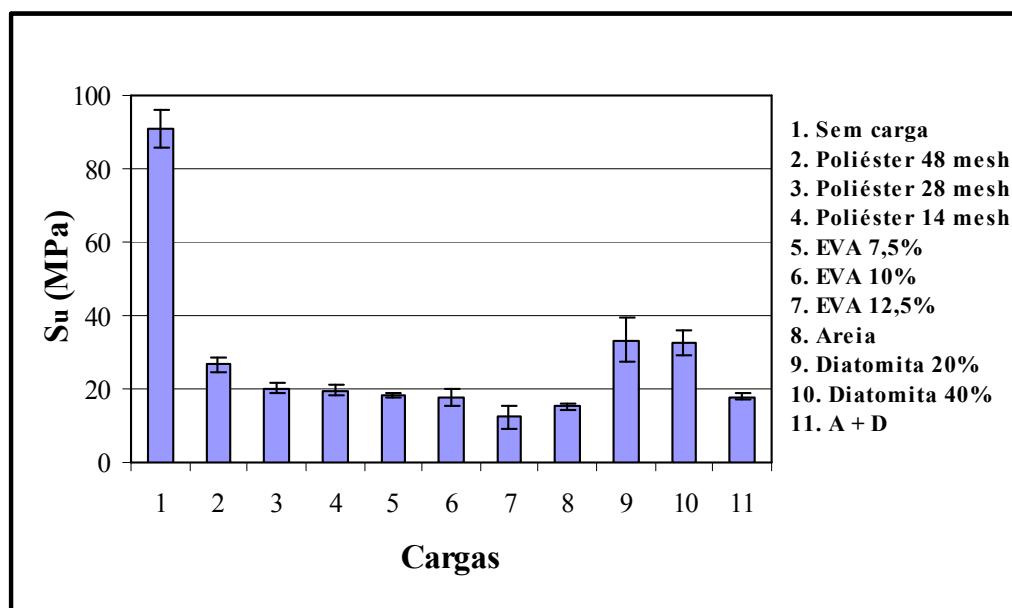


Figura 4.19 – Limite de resistência dos compósitos.

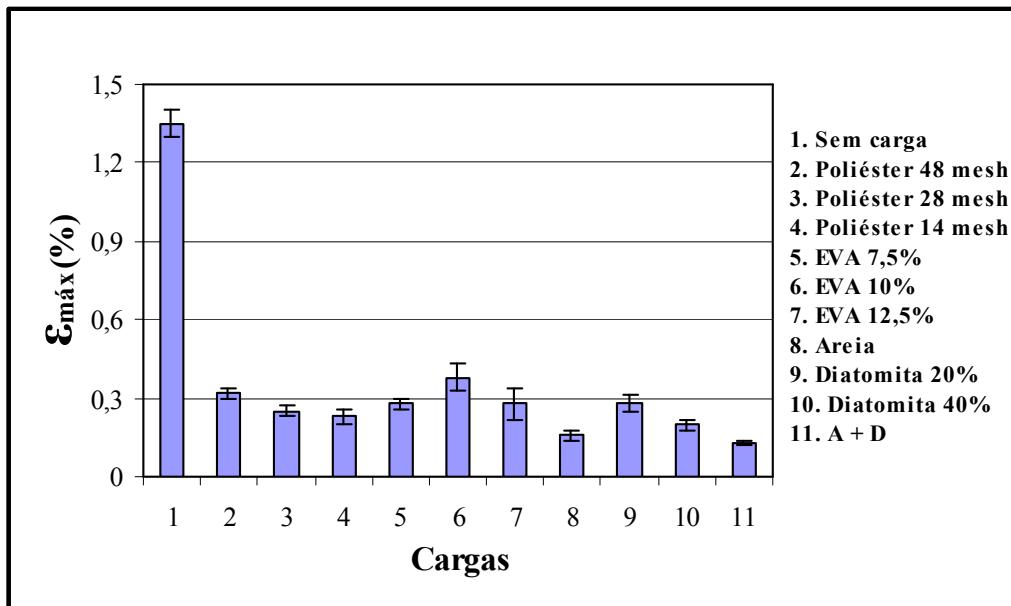


Figura 4.20 – Deformação máxima na flexão dos compósitos.

4.4. Ensaios de Impacto

Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de impacto com os valores médios e os respectivos desvios padrão calculados para todos os compósitos. Para facilitar uma análise comparativa dos resultados, os dados da Tabela 4.4 estão apresentados nas Figuras 4.21 a 4.24.

Tabela 4.4 – Resistência ao impacto (I_s) dos corpos de prova

Carga	I_s (J/m)	
	Média	Desvio padrão
Sem carga	15,3	2,1
Poliéster 48 mesh	9,0	0,7
Poliéster 28 mesh	8,7	0,8
Poliéster 14 mesh	8,6	0,4
EVA 7,5%	11,3	0,3
EVA 10%	13,8	1,7
EVA 12,5%	16,2	0,3
Areia	12,2	0,9
Diatomita 20%	11,3	1,7
Diatomita 40%	12,0	1,1
Areia + Diatomita	13,0	0,9

Na Figura 4.21 estão apresentados os resultados dos ensaios dos compósitos com a adição de 40% de resíduo de poliéster para as três granulometrias (0,3, 0,6 e 1,2 mm). A resistência ao impacto dos compósitos com as partículas de granulometria de 1,2 e 0,6 mm foi a mesma, enquanto que no compósito com granulometria de 0,3 mm a resistência foi um pouco maior, se comparadas as outras duas citadas anteriormente, chegando a uma resistência de 9 J/m. O comportamento foi similar ao observado com a resistência mecânica (Figura 4.12, página 63). De acordo com resultados de pesquisas anteriores o tamanho da partícula tem forte influência nas propriedades de polímeros modificados com cargas particuladas. De uma maneira geral a resistência do compósito aumenta com a diminuição do tamanho de partícula. Para cada tipo de matriz polimérica, existe um tamanho ótimo de partícula para melhorar as propriedades mecânicas de impacto, tração, flexão, fadiga [17]. A redução no tamanho da fase dispersa dentro de certo limite é importante no resultado final, pois aumenta a área interfacial e melhora a transferência de tensões impostas ao sistema [76]. Entretanto, no presente trabalho a variação na granulometria das partículas de poliéster não promoveu grande influência nos resultados, pelo fato da carga se tratar do mesmo material da matriz, obtendo-se assim valores de resistência ao impacto próximos.

Com relação ao EVA, observou-se uma tendência de aumento da resistência ao impacto com o aumento do percentual do resíduo adicionado à matriz de poliéster. A resistência ao impacto do EVA, para os três percentuais utilizados (7,5%, 10% e 12,5%) pode ser vista na Figura 4.22, onde observa-se um aumento gradativo da resistência com o aumento do percentual de carga, chegando a um valor máximo de 16 J/m para o percentual de 12,5%. Este resultado pode estar relacionado à excelente tenacidade da carga, resultando assim, em uma grande capacidade de absorção de energia.

A resistência ao impacto dos compósitos com a adição de 20 % e 40% de diatomita pode ser observada na Figura 4.23. Percebe-se que apesar dos valores próximos, o aumento no percentual de diatomita ocasionou um pequeno aumento nos valores de resistência ao impacto, obtendo-se o maior valor para o compósito com adição de 40% (12 J/m).

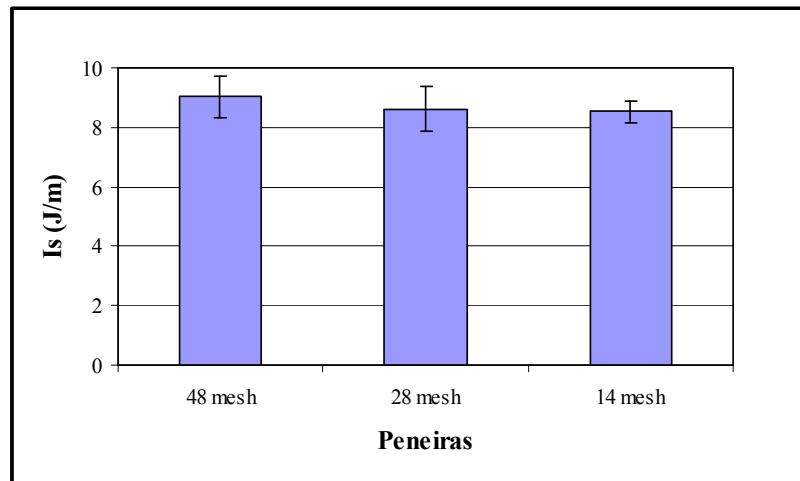


Figura 4.21 – Resistência ao impacto de corpos de prova com adição de poliéster.

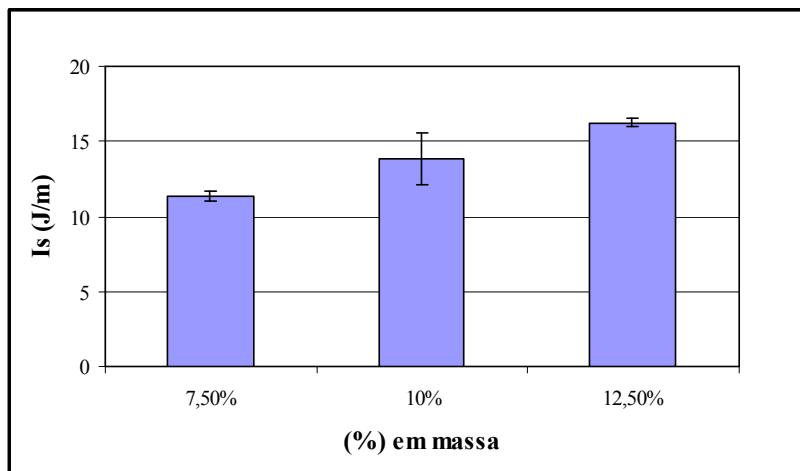


Figura 4.22 – Resistência ao impacto de corpos de prova com adição de EVA.

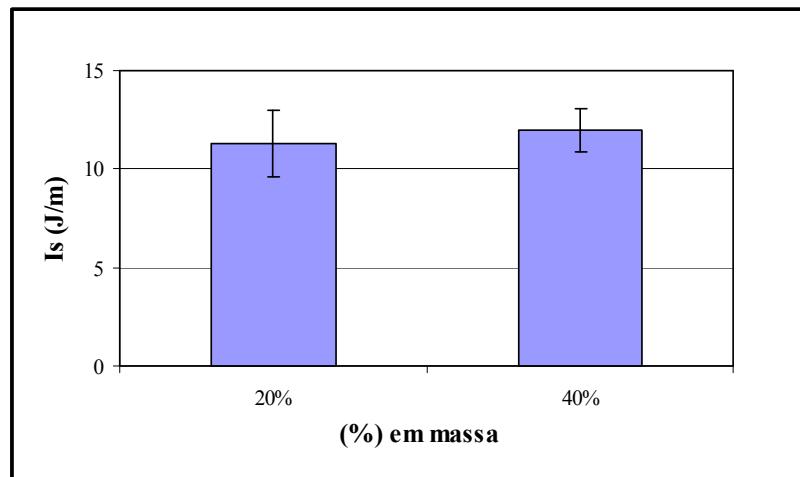


Figura 4.23 – Resistência ao impacto de corpos de prova com diatomita.

Na Figura 4.24 estão apresentados os valores de resistência ao impacto dos compósitos, para todas as cargas utilizadas, comparado-os com a resina pura. Para a análise comparativa com a resina, foram colocados neste gráfico os maiores valores de resistência ao impacto dos compósitos de poliéster (9 J/m, para a granulometria de 48 mesh), EVA (16 J/m, para o percentual de 12,5%) e diatomita (12 J/m, para o percentual de 40%), analisados anteriormente, além dos compósitos confeccionados com a carga de areia e os confeccionados com a mistura de areia + diatomita.

O compósito confeccionado com adição de EVA foi o que apresentou o melhor desempenho, com uma resistência ao impacto acima da resina pura. Isto ocorreu para o compósito com 12,5% de EVA, onde obteve-se um aumento de 6% em relação ao compósito sem carga. Neste caso as partículas de EVA, com propriedades elastoméricas, dificultam a propagação de trincas, favorecendo uma maior absorção de energia se comparado a resina de poliéster pura.

Observa-se também que para todas as outras cargas estudadas (poliéster, areia e diatomita) houve uma redução na resistência ao impacto em relação à resina pura. A menor resistência ao impacto foi registrada para o compósito reforçado com poliéster, com uma redução de 69,5%. Os compósitos com adições de areia e diatomita tiveram uma redução na sua resistência em 25,6% e 27,7% respectivamente.

O compósito com a adição de areia sofreu uma redução de 25,6% na resistência ao impacto. Esta queda se deve ao alto módulo da carga, tornando o compósito mais frágil, sem muita capacidade de absorver energia no impacto. No entanto, o valor de resistência ao impacto com a adição da areia foi o segundo melhor resultado, juntamente com a diatomita.

Pode-se observar, ainda, em relação ao compósito com a mistura de areia e diatomita, que o valor da resistência ao impacto foi superior a dos compósitos confeccionados com a adição apenas de areia ou de diatomita. Se comparado com o resultado do compósito com adição apenas da areia (resistência maior do que com a diatomita) o aumento foi de 6,4%. Esse resultado era esperado, uma vez que, por apresentar um tamanho de partícula menor do que a da areia, a diatomita preenche os espaços vazios entre os grãos de areia, promovendo uma maior interação entre as fases carga/matriz, fato este, responsável pelo melhor desempenho do compósito.

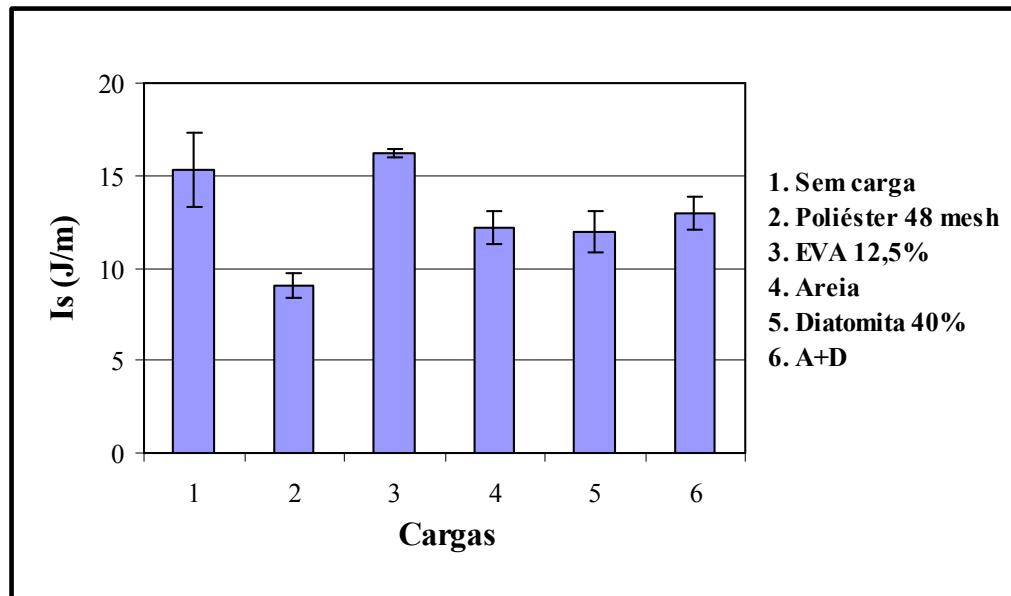


Figura 4.24 – Melhores resultados de resistência ao impacto.

Os corpos-de-prova após terem sido rompidos por impacto Charpy estão apresentados na Figura 4.25. O tipo de fratura ocorrida foi de aspecto frágil, com todos os corpos-de-prova totalmente separados em duas partes após o impacto.

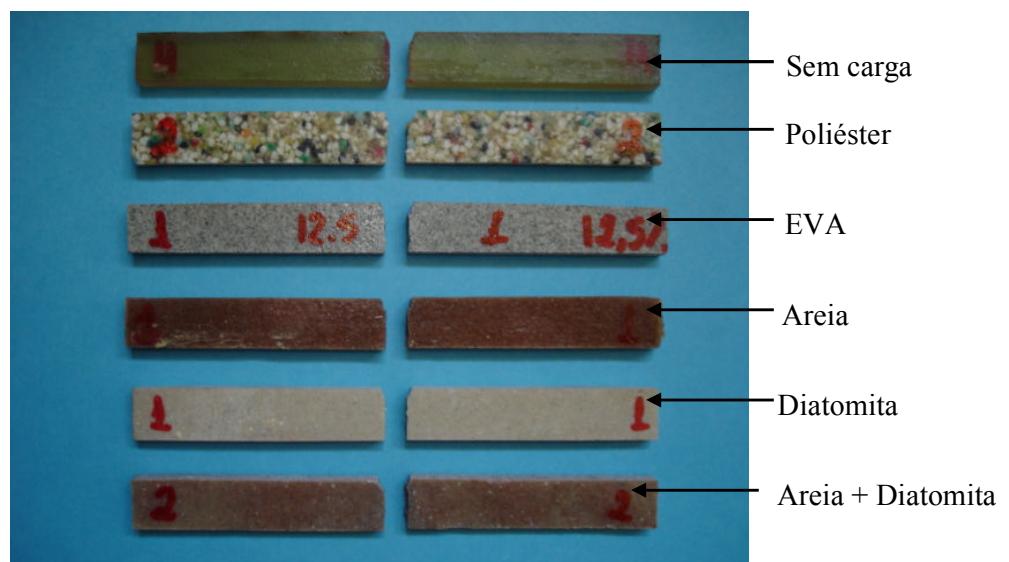


Figura 4.25 – Aspecto dos corpos de prova rompidos após o ensaio de impacto.

4.5. Análise Microscópica e Química das Cargas

A análise microscópica do resíduo de poliéster é mostrada na Figura 4.26, onde pode ser observada a morfologia da carga. Observa-se que as partículas apresentam tamanhos e formas diferentes, além de arestas cortantes e quinas vivas.

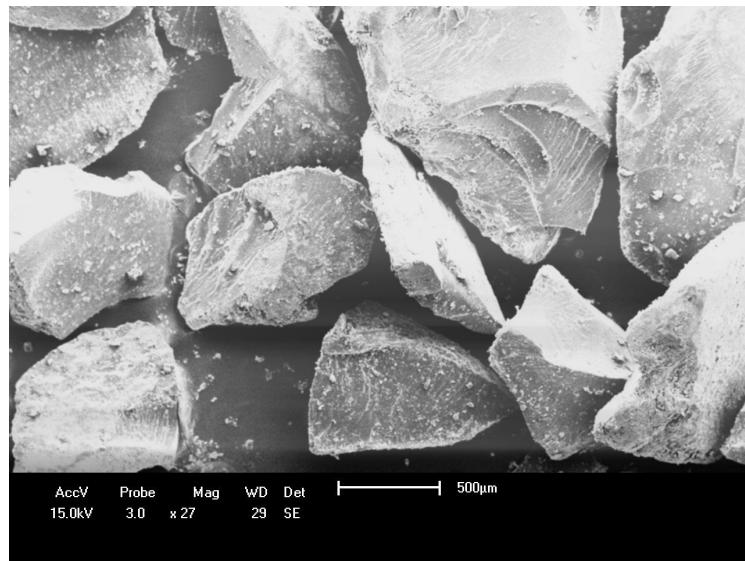


Figura 4.26 – Morfologia obtida por MEV do resíduo de poliéster.

Na Figura 4.27 observa-se a morfologia microcelular do resíduo de EVA. Observa-se que as partículas apresentam superfície irregular com reentrâncias.

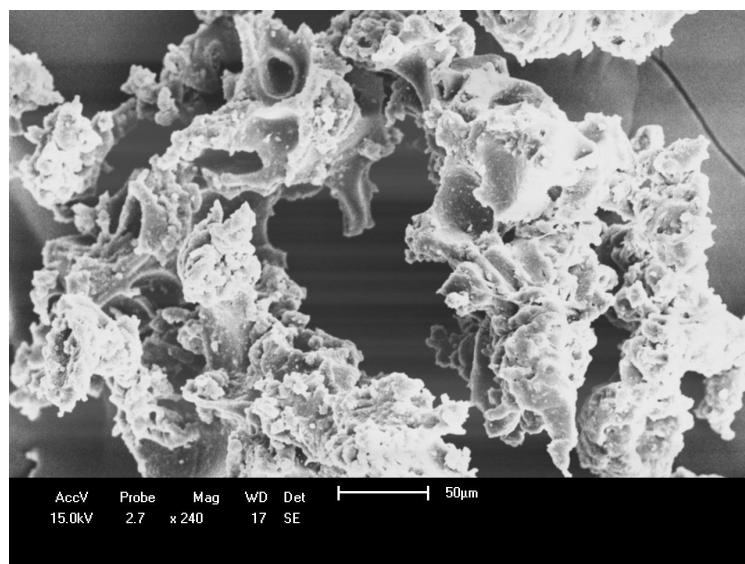


Figura 4.27 – Morfologia obtida por MEV do resíduo de EVA.

A morfologia da areia está apresentada na Figura 4.28. De modo geral, as partículas não apresentam arestas cortantes ou quinas vivas.

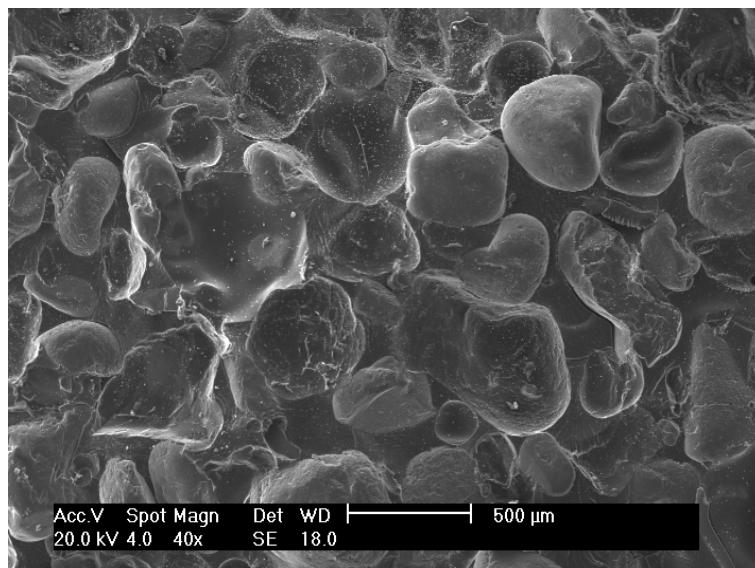


Figura 4.28 – Morfologia obtida por MEV da areia.

A composição química da areia determinada por Fluorescência de Raios-x é apresentada na Tabela 4.5. A maior parte da areia é composta por quartzo, representando 96,39% da amostra, sendo o restante composto por outros óxidos.

Tabela 4.5 – Composição química da areia obtida por Fluorescência de Raios-x

Composição química	Concentração
SiO ₂	96,39%
Al ₂ O ₃	2,55%
SO ₃	0,29%
Fe ₂ O ₃	0,29%
K ₂ O	0,18%
TiO ₂	0,13%
CaO	0,11%
ZrO ₂	0,03%
CuO	0,02%
ZnO	0,02%

Nas Figuras 4.29 e 4.30 são mostrados detalhes do aspecto morfológico da diatomita. Observa-se que as frústulas diatomáceas intactas possuem formato cilíndrico e navicular, além de apresentar poros circulares e elípticos, os quais designam a elevada propriedade filtrante deste material.

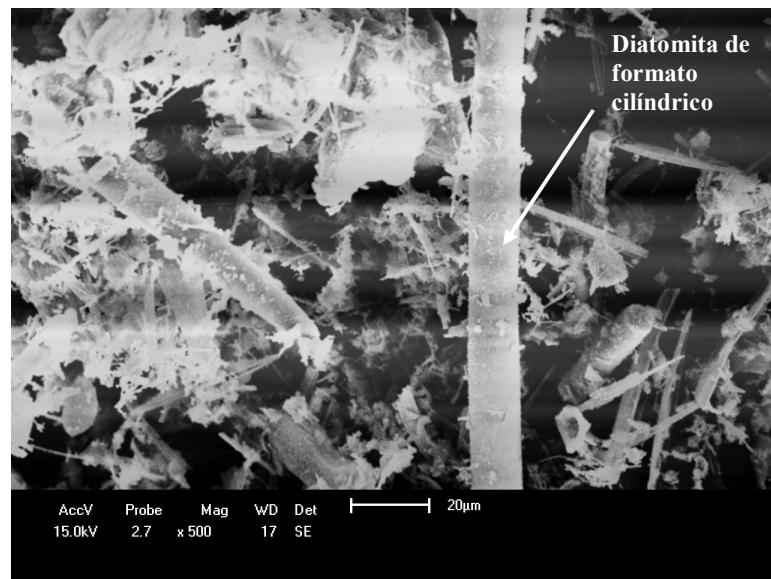


Figura 4.29 – Detalhe do formato cilíndrico da diatomita obtida por MEV.

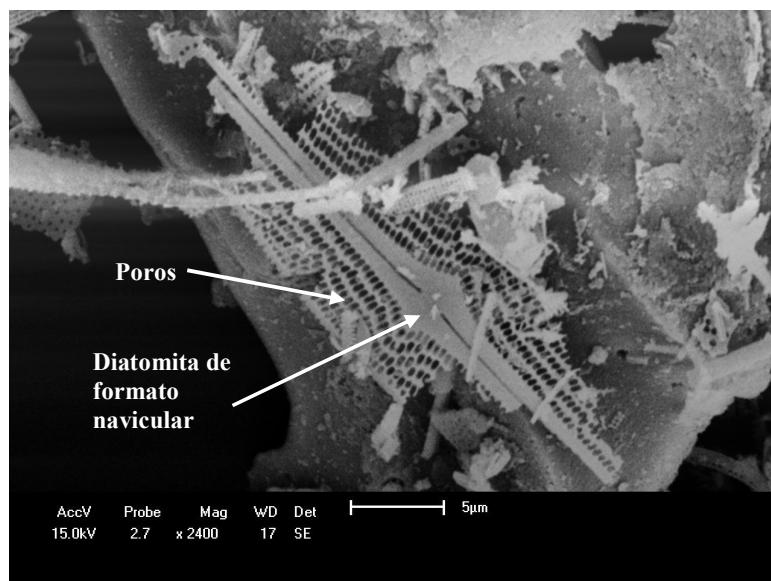


Figura 4.30 – Detalhe do formato navicular da diatomita, com poros circulares e elípticos, obtida por MEV.

O resultado da composição química obtida por Fluorescência de Raios-x da amostra de diatomita é apresentado na Tabela 4.6. Verifica-se que do ponto de vista químico o material é constituído basicamente por SiO_2 , Al_2O_3 e SO_3 que correspondem a 96,66%.

Tabela 4.6 – Composição química da diatomita obtida por Fluorescência de Raios-x

Composição química	Concentração
SiO_2	88,52%
Al_2O_3	4,44%
SO_3	3,70%
CaO	1,58%
TiO_2	0,88%
Fe_2O_3	0,62%
K_2O	0,16%
ZrO_2	0,07%
MnO	0,03%
Total	100%

4.6. Análise Microscópica dos Compósitos

As superfícies dos corpos-de-prova fraturados nos ensaios de impacto foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, com a finalidade de se observar as características da microestrutura dos compósitos, disposição das cargas na matriz e a interface carga/matriz.

4.6.1. Compósito com Partículas de Poliéster

Na Figura 4.31 é mostrada a análise microscópica da superfície de fratura do compósito reforçado com poliéster com faixa granulométrica de 1,2 mm, onde pode ser verificada a presença de vazios no compósito, indicados com as setas brancas. Mesmo se tratando de uma granulometria definida, observa-se que o resíduo retido nessa peneira é bastante heterogêneo nos tamanhos e nas formas.



Figura 4.31 – Superfície de fratura obtida por MEV do compósito com resíduo de poliéster.

O detalhe da aderência entre as fases é mostrado na Figura 4.32. Observa-se a boa aderência entre a matriz e o resíduo de poliéster. A boa aderência ocorreu devido ao resíduo de poliéster se tratar do mesmo material da matriz. Mesmo com a boa aderência, o resultado da resistência ao impacto do compósito com a adição desse resíduo foi o mais baixo. Esta queda drástica na resistência ao impacto pode ser explicada pela presença de muitos vazios no compósito. Além disso, a interface forte não funciona como obstáculo à propagação de trincas. Porém, a boa adesão contribuiu para o aumento no módulo do compósito.

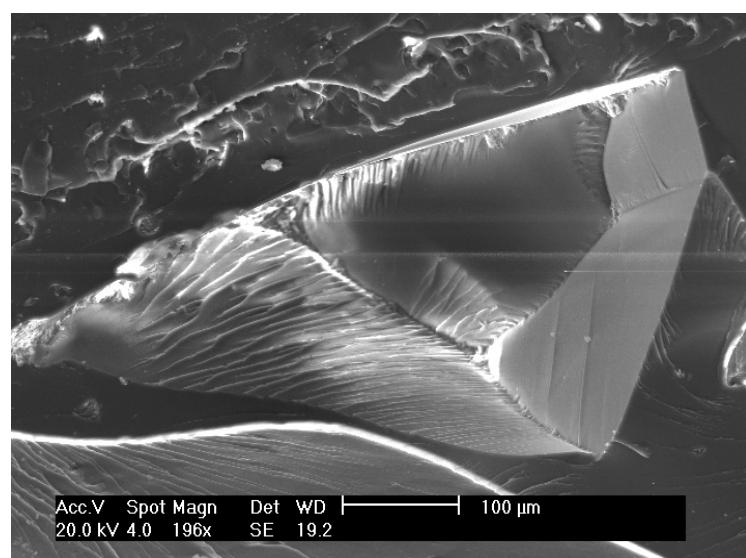


Figura 4.32 – Detalhe de uma partícula de poliéster obtida por MEV, mostrando a boa aderência da partícula com a matriz.

4.6.2. Compósito com Partículas de EVA

A distribuição do resíduo de EVA, na matriz polimérica, ocorreu de maneira uniforme. Observou-se grande presença de vazios, como indicado com as setas brancas na Figura 4.33.

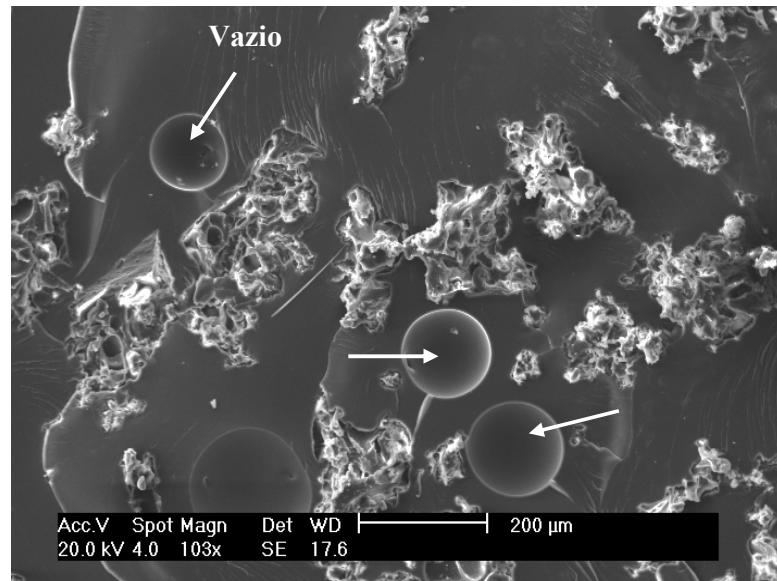


Figura 4.33 – Superfície de fratura obtida por MEV do compósito com resíduo de EVA.

Na Figura 4.34 é mostrado o detalhe de partículas do resíduo de EVA aderidas na matriz. Apesar da grande quantidade de bolhas nos compósitos com EVA, o resultado de resistência ao impacto foi o melhor, em relação a resina pura e aos outros tipos de cargas utilizados neste trabalho. A explicação para isto é o fato da grande capacidade do EVA em absorver a energia de impacto, compensando assim, a grande presença de bolhas presentes neste tipo de compósito. Quanto maior o percentual de EVA no compósito, maior foi a quantidade de bolhas no interior do compósito. Outro fator que pode ter contribuído na presença das muitas bolhas foi a má aderência entre os constituintes. Isto ocorre possivelmente devido à alta tensão interfacial existente entre os componentes [77], o que torna a interface com baixa resistência. Quando há molhamento eficiente da carga pelo polímero, este remove o ar incluso e cobre todas as protuberâncias da carga. Este mecanismo dependerá das tensões superficiais dos componentes [16]. Por ter muitas protuberâncias, o resíduo de EVA pode não ter tido um molhamento eficaz, devido, possivelmente, a alta tensão superficial desta carga, não tendo, assim, uma boa aderência.

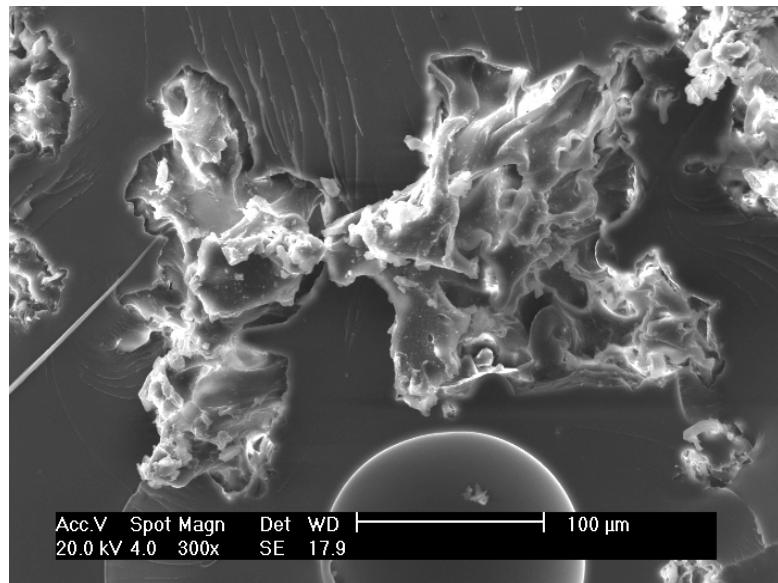


Figura 4.34 – Detalhe do resíduo de EVA aderido na matriz obtida por MEV.

4.6.3. Compósito com Areia

A Figura 4.35 permite visualizar a superfície de fratura dos compósitos com adição de areia, com a distribuição dos grãos na matriz. A distribuição dos grãos na matriz ocorreu de maneira uniforme. Também se observa na figura, a presença de um vazio associado, possivelmente, ao total descolamento de um grão de areia. No entanto, o descolamento de grãos foi muito raro nas amostras analisadas.

Apesar dos grãos de areia apresentarem textura áspera, alguns não apresentaram boa aderência com a matriz, como pode ser visto na Figura 4.36, onde é mostrado o detalhe da interface aberta em um possível descolamento do grão da matriz. Isto mostra que a interação da carga de areia com a matriz não foi muito eficiente. Este comportamento é comum no caso de partículas inorgânicas adicionadas a polímeros. Nestes casos a interação partícula/polímero pode ser melhorada com agentes de acoplamento como os silanos.

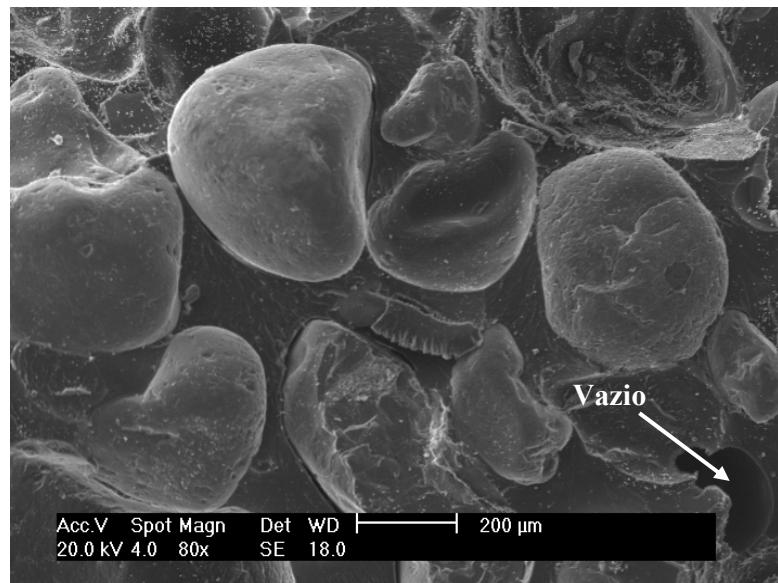


Figura 4.35 – Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da superfície de fratura do compósito com areia.

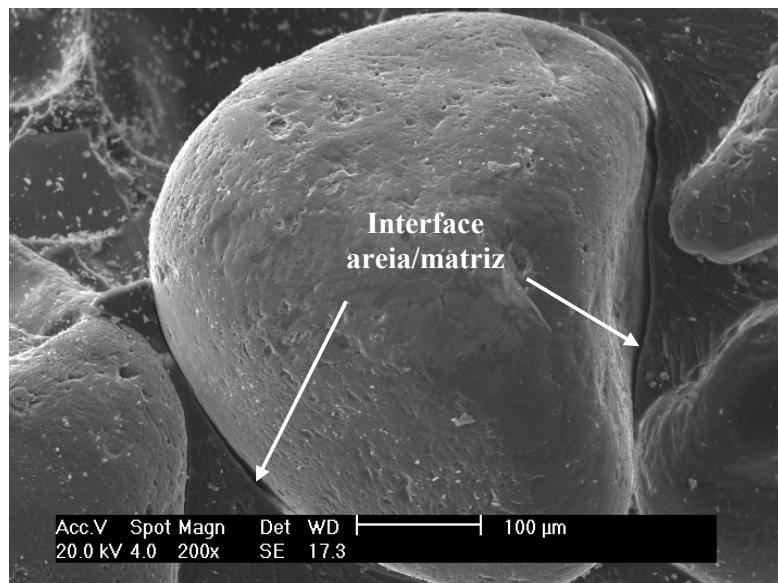


Figura 4.36 – Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da interface areia/mátriz.

Na Figura 4.37 é ilustrado, com maior aumento, o detalhe de um grão de areia fraturado, após o ensaio de impacto e o seu descolamento da matriz, que caracteriza uma adesão carga/mátriz relativamente baixa.

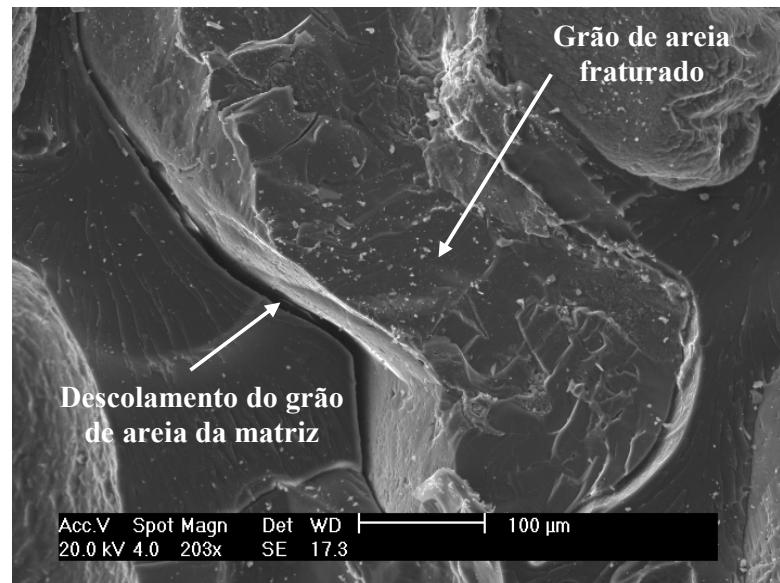


Figura 4.37 – Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe do grão de areia fraturado e seu descolamento da matriz.

4.6.4. Compósito com Diatomita

Na Figura 4.38 é mostrado o detalhe do aspecto da superfície de fratura do compósito com diatomita. Nota-se que a superfície do compósito é escamosa e contínua.

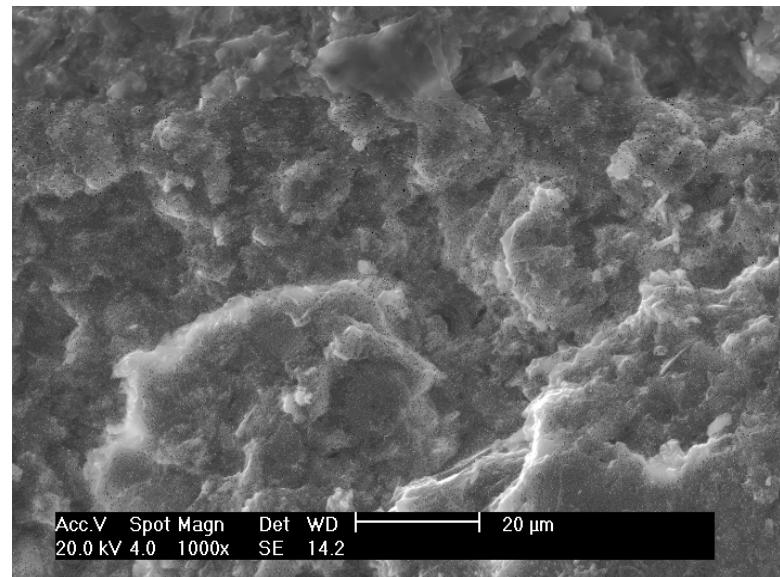


Figura 4.38 – Fotomicrografia obtida por MEV da superfície de fratura do compósito com diatomita.

Como no caso de compósitos com carga de EVA, observou-se um aumento considerável de vazios no compósito com o aumento da fração de massa de diatomita de 20% para 40%. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da viscosidade da mistura que dificultou a retirada de bolhas do interior do compósito. Nas Figuras 4.39 e 4.40, pode-se observar a diferença na superfície de fratura dos corpos-de-prova dos compósitos com 20% e 40% de diatomita, onde se verifica a presença de vazios, gerados por bolhas de ar no interior do compósito. Na Figura 4.40 pode ser visualizado o aumento considerável de vazios no compósito com 40% de diatomita. Apesar da grande quantidade de vazios presentes neste compósito, a resistência ao impacto foi superior ao compósito com 20% de diatomita, comprovando que o efeito do percentual de carga adicionada influí bastante no comportamento do compósito, uma vez que a quantidade de vazios foi muito alta. Verificou-se, também, que a interface entre a matriz e as partículas de diatomita é contínua, evidenciando bom ancoramento da matriz à carga. A distribuição de diatomita ao longo da matriz polimérica ocorreu de maneira uniforme, sem a presença de aglomerados. Quando se usam cargas porosas como o negro de fumo ou diatomita, consegue-se bons níveis de resistência devido a uma adesão mecânica mais eficiente e até difusão das macromoléculas na estrutura da carga, permitindo o agarramento mecânico [16].

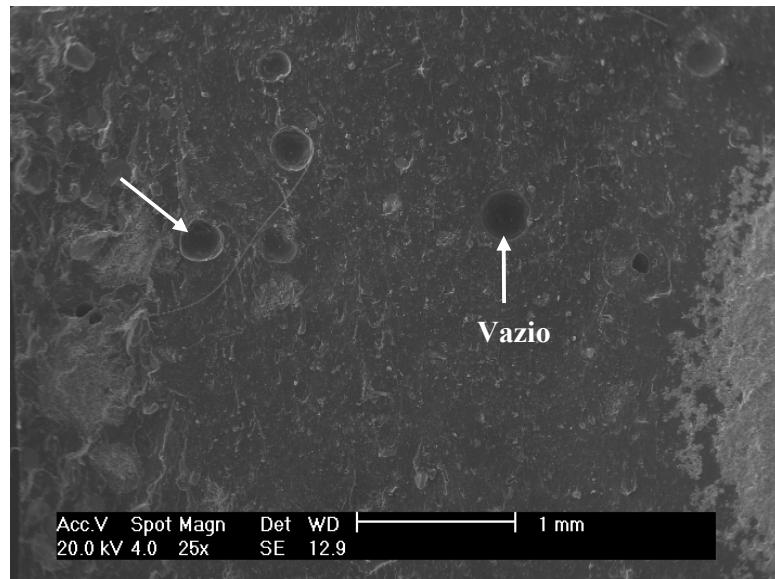


Figura 4.39 – Fotomicrografia obtida por MEV do compósito com 20% de diatomita.

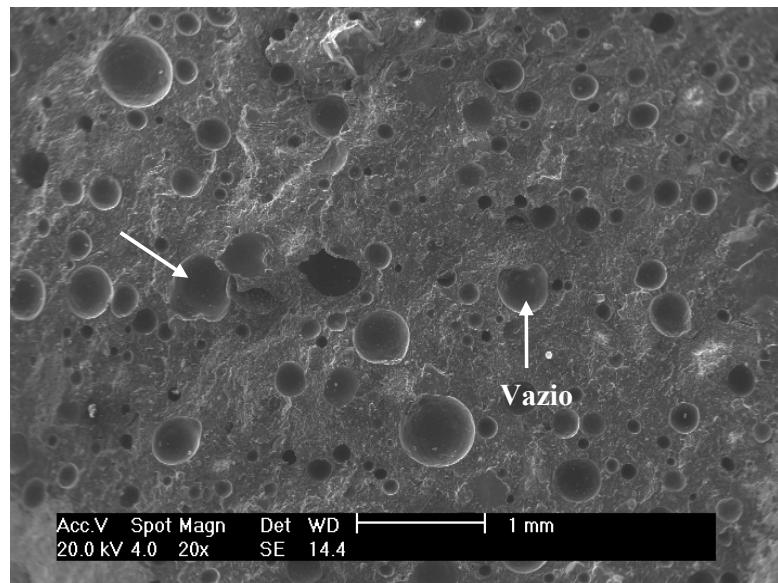


Figura 4.40 – Fotomicrografia obtida por MEV do compósito com 40% de diatomita.

4.6.5. Compósito com Areia e Diatomita

Na Figura 4.41 pode ser observado que não há descolamento de grãos ou possíveis grãos fraturados, como foi visto nos compósitos com areia. Apesar da presença de algumas bolhas de ar (indicação com setas brancas), houve uma melhora na resistência ao impacto e um aumento considerável no módulo do compósito com adição da diatomita na areia, em relação ao compósito só com areia. Isto é um indicativo de que a adição de diatomita na areia promoveu uma maior interação entre as fases presentes, fortalecendo a interface do sistema, o que é fundamental para a transferência de tensões entre as fases. A falta desta interação acarreta a presença de microvazios nas interfaces, o que leva à formação de trincas, e facilita a propagação destas, resultando em baixa resistência [78].

A micrografia mostrada na Figura 4.42 evidencia que a aderência na interface carga/matriz foi mais intensa no compósito reforçado com a mistura de areia + diatomita do que no compósito reforçado só com areia (comparar com a Figura 4.36, pág. 81), confirmando os valores medidos de resistência ao impacto. Percebe-se, na micrografia, a melhora na interface entre as cargas e a matriz polimérica, conforme indicado pelas setas.

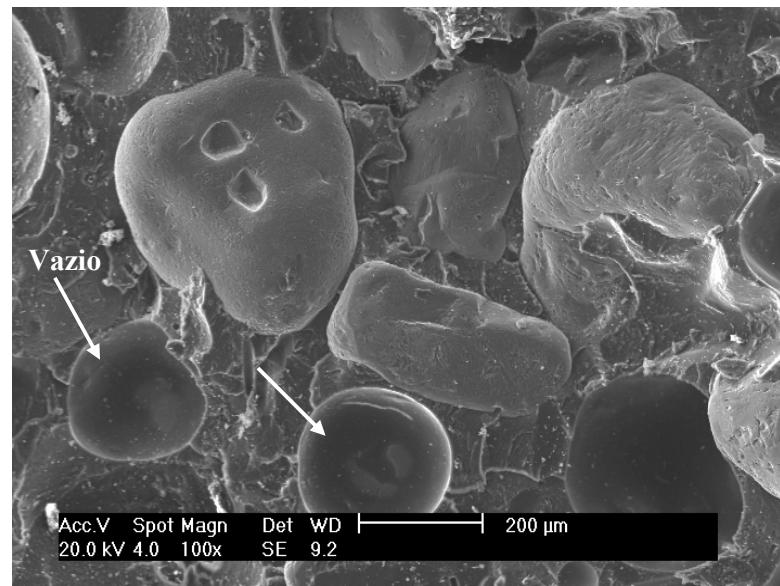


Figura 4.41 – Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da superfície de fratura do compósito com areia + diatomita.

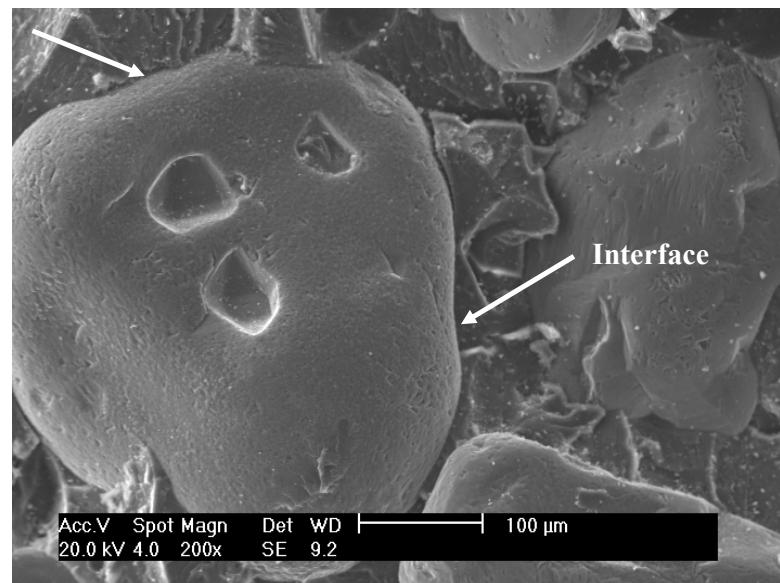


Figura 4.42 – Fotomicrografia obtida por MEV do detalhe da adesão carga/matriz no compósito com areia + diatomita.

5. Conclusões

Este trabalho avaliou os efeitos da adição de cargas nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster, comparando-os com as propriedades da resina pura. Com base nos ensaios mecânicos realizados, nas análises das amostras por microscopia eletrônica de varredura e na compatibilidade das cargas com a resina poliéster, a utilização das cargas de rejeitos industriais em compósitos mostrou-se viável, considerando que para cada tipo de carga haverá uma aplicação específica. As propriedades mecânicas dos compósitos estudados foram avaliadas, através dos valores de módulo de elasticidade, limite de resistência, e deformação, com base em ensaios de flexão em três pontos, e de resistência ao impacto, com base em ensaios de impacto Charpy.

De acordo com os resultados experimentais pode-se concluir que:

1) Em relação aos ensaios mecânicos de flexão e impacto:

- A variação da granulometria dos resíduos de poliéster não teve grande influência nos resultados dos módulos nem nos resultados de impacto, pelo fato de se tratar do mesmo material da matriz. Assim, os tamanhos de partículas não alteraram o comportamento do compósito;
- Os percentuais de carga adicionados nos compósitos com resíduo de EVA e diatomita tiveram grande influência nos resultados de módulo e de resistência ao impacto. Quanto maior o percentual de incorporação de diatomita no compósito, maior o módulo e a resistência ao impacto. Ao contrário da diatomita, o aumento do percentual em massa de EVA, diminuiu o módulo do compósito, devido as propriedades elastoméricas da carga;
- Todas as cargas utilizadas na confecção dos compósitos provocaram uma diminuição da resistência ao impacto em relação à resina pura, com exceção do EVA, onde houve um aumento de aproximadamente 6 %, chegando ao valor máximo de 16 J/m para o compósito com 12,5 % desta carga;
- A adição de diatomita e areia levou o compósito (areia + diatomita) a um pequeno aumento na resistência ao impacto e a um considerável aumento no módulo de elasticidade, em relação ao compósito confeccionado apenas com areia. A adição

de diatomita com a areia promove uma maior interação entre as fases presentes, ocasionando na melhora do desempenho do compósito;

- Em relação ao limite de resistência, a redução observada nessa propriedade, para todas as cargas estudadas, indica que as partículas podem atuar como agentes nucleadores de trincas, além de contribuírem para a redução da deformação, o que também provoca um efeito negativo no limite de resistência. Todos os compósitos com adição de cargas apresentaram comportamento frágil.

2) Em relação ao processo de confecção das placas de compósitos:

- A aplicação de vácuo foi necessária para a confecção das placas de compósitos. Verificou-se que o processo sem vácuo acarreta na migração das partículas para as bordas do molde. Além disto, a presença de bolhas no interior dos compósitos foi muito grande. Com a aplicação de vácuo a quantidade de bolhas diminuiu, consideravelmente, o problema da migração das partículas para as bordas do molde foi resolvido. O sistema de vácuo não se mostrou totalmente eficaz, uma vez que, alguns compósitos produzidos ainda apresentaram bolhas. A adição das cargas à resina aumentou a sua viscosidade, o que dificultou a retirada de bolhas;
- Por se tratar de pós muito finos, as cargas de EVA e de diatomita aumentaram a viscosidade da resina, dificultando assim a retirada de bolhas de ar do compósito. Quanto maior o percentual de massa das cargas, maior foi a quantidade de vazios no compósito;
- Em relação aos compósitos com diatomita, o percentual adicionado à resina de 40% se mostrou adequado por não causar distorções nas placas confeccionadas, como ocorreu com o compósito com adição de 20% de diatomita.
- O percentual de 75% de carga de areia foi considerado adequado por não apresentar decantação no fundo do molde e não causar a distorção da placa de compósito.

3) Em relação às análises microscópicas:

- Os resíduos de poliéster apresentaram boa adesão à matriz, havendo continuidade entre matriz e carga, devido ao resíduo se tratar do mesmo material da matriz;

- As protuberâncias do resíduo de EVA não permitiram um molhamento eficaz da resina na carga, devido a alta tensão superficial deste material, o que contribuiu para presença de vazios no compósito;
- O compósito com a adição da mistura de areia + diatomita mostrou-se viável não só do ponto de vista experimental, como também eficiente em relação à intensificação das interações carga/matriz na interface, levando a um melhor desempenho do compósito, o que prova a eficácia da adição de diatomita no compósito com areia;
- As análises microscópicas confirmaram a presença de bolhas provenientes do processo de confecção das placas e o molhamento não eficiente da carga pelo polímero, o que influenciou no desempenho dos compósitos. Além disto, mostrou a distribuição uniforme das partículas e a compatibilidade das mesmas com a matriz.

6. Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Realizar um estudo com a mistura das cargas de areia e EVA, através da análise de diferentes percentuais;
- Estudar a adição de diatomita à areia em tubulações de fibra de vidro, uma vez que a diatomita se mostrou mais eficiente do que a areia em compósitos que exigem maior rigidez;
- Estudar a aplicação dos resíduos de poliéster e de EVA em produtos acabados como placas decorativas para revestimento. Em substituição dos azulejos tradicionais, o material pode ser ideal para áreas molhadas, como banheiro e cozinha, impedindo a proliferação de fungos, além de contar com isolamento térmico e acústico (no caso do EVA).

Referências

- [1] FELIPE, R.C.T.S. **Tecnologia dos materiais compósitos.** Apostila. Pdf. 1 arquivo (1,18 MB). Disquete 3 ½. Adobe Acrobat. CEFET-RN - Natal, 2002.
- [2] NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.
- [3] SILVA, V.P. **Compósitos poliméricos de fibras curtas de sílica/silicona.** Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2005.
- [4] GIBSON, A. G. **Comprehensive Composite Materials: Design and Applications.** Ed. Inglaterra: Elsevier, v.6, 2000. Cap. 6.23: Composite materials in the offshore industry.
- [5] CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Rio de Janeiro, LTC, 2002.
- [6] CHRISTIE, I.; ROLFE, H.; LEGARD, R. **Cleaner Production in Industry: integrating business goals and environmental management.** London, Policy Studies Institute, 1995.
- [7] ARAÚJO, E.M.; MELO, T.J.A.; CARVALHO, L.H.; ALVES, K.G.B.; CARVALHO, R.S.; ARAÚJO, K.D.; SOUZA, T.L.F.; SANTOS, J.P. **Aproveitamento de Resíduos de Fibra de Vidro Provenientes de Indústrias da Paraíba na Produção de Compósitos.** Anais do I Congresso Brasileiro de Extensão Universitária, Paraíba, 2001.
- [8] FILHO, R. S. P. **Contribuição ao processo de reciclagem dos resíduos da indústria de calçados na construção civil: bloco eva – uma alternativa às alvenarias das construções.** Dissertação de Mestrado, UFPB, 2005.
- [9] GARLET, G. & GREVEN, H. A. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. da indústria calçadista na construção civil.** Anais do Workshop sobre Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. ANTAC - PCC /USP, São Paulo, 1996.

- [10] MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. Barueri, SP: Manole, 2005.
- [11] FERRANTE, M. **Seleção de materiais**. 2^a ed. 2002. Ed. Edufscar.
- [12] MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- [13] SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [14] FONSECA, V. M. **Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas em Compósitos Poliéster/sisal Quimicamente tratados**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1998.
- [15] HULL, D. **An Introduction to Composite Material**. Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [16] RABELO, M. **Aditivação de Polímeros**. São Paulo, Artliber Editora, 2000.
- [17] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaios dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1999. 247p.
- [18] MARSHALL, G. P.; WILLIAMS, J. G.; TURNER, C. E. **Fracture toughness and absorbed energy measurements in impact tests on brittle materials**. Impact Tests on Brittle Materials, p. 949-956, 1973.
- [19] **Ensaio de impacto.** Disponível em: <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/ensaios/ensa16.pdf>. Acesso em: 5 de jun. 2006.
- [20] GORNI, A. A. **A evolução dos materiais poliméricos ao longo do tempo**. Revista plástico industrial, 2003. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/hist_pol.html>. Acesso em: 23 de dez. 2005.

[21] MILES, D. C e BRISTON, J. H. **Tecnologia dos polímeros.** Editora da Universidade de São Pauo, p. 80- 81, 1975.

[22] MUSEU DO PLÁSTICO. **Resinas.** Disponível em:
<<http://www.sandretto.it/museo/PORTOGHESE/bplasti.htm>>. Acesso em: 23 de dez. 2005.

[23] MANO, E. B. **Introdução a polímeros.** Edigard Blucher, 2^a ed., São Paulo, 1986.

[24] BARRA, B. **Compósitos Poliméricos EMC 5706.** Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/_EMC5706/ORIGINAIS/COMP_SITOS.DOC>. Acesso em: 10 de jan. 2006.

[25] KELLY, A.; ZWEBEN C. **Comprehensive Composite Materials.** Elsevier, Oxford, 1^a ed, vol. 1, cap. 6, 2002.

[26] **Cargas Minerais.** Disponível em: <<http://www.comercialfiberglass.com.br>>. Acesso em: 10 de jan. 2006.

[27] VIANNA, W. L.; CORREA, C. A.; RAZZINO, C. A. **Efeitos do Tipo de Poliestireno de Alto Impacto nas Propriedades de Compósitos Termoplásticos com Farinha de Resíduo de Madeira. Artigo técnico.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, n° 5, p. 339-348, 2004.

[28] GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil.** Porto Alegre, 1998. 146p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

[29] BEZERRA, A. J. V. **Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA – Etíleno Acetato de Vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural,** Dissertação de Mestrado, UFPB/CCT, 2002.

[30] OLIVEIRA, M.G.; VIRGOLINO, M.H.; GOMES, A.C.O.; SOARES, B.G.; MOREIRA, V.X. **Caracterização das Propriedades Reológicas e Dinâmicas de Composições de**

borracha Natural com Resíduo de EVA. Disponível em:
[<http://www.scielo.br/pdf/po/v14n5/23061.pdf>](http://www.scielo.br/pdf/po/v14n5/23061.pdf). Acesso em: 5 de jan. 2006.

[31] SILVA, F. E. L.; MARTINELLI, A. E.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F.; NASCIMENTO, R. M.; CARVALHO, L. H. **Avaliação Microestrutural e Mecânica de Compósitos Polipropileno-diatomita.** In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2004, Porto Alegre. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2004.

[32] BARROS, G.A.; FERREIRA, E.P.C.; MELO, J.D.D. **Mechanical Properties of Fiberglass Pressure Pipes with Siliceous Sand Filler.** Anais do 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG.

[33] SOUSA, L. M.; REIS, J. M. L.; FERREIRA, A. J. M. **Characterization of Polymer Concrete Made with Recycled Aggregate.** Demegi, Portugal.

[34] GORNINSKI, J. P.; MOLIN, D. C. D.; KAZMIERCZAK, C. S. **Study of the Modulus of Elasticity of Polymer Concrete Compounds and Comparative Assessment of Polymer Concrete and Portland cement Concrete.** Pergamon, Brasil, 2004.

[35] OTMER, K. Sílica. In: WILEY, J et al. **Encyclopedia of chemical technology.** Interscience Publication, 4.ed., 1997. 977-1005.

[36] SOUZA, A. M. **Diatomita do Brasil.** Revista Bras. Farm., vol. XLIII (7-8): 27-28. Rio de Janeiro, 1962.

[37] ABREU, S. F. **Recursos minerais do Brasil.** 2^a ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher, Rio de Janeiro. Instituto Nacional de Tecnologia, v. 1, p. 255-258, 1973.

[38] MORO, S. L. **Propriedades de Diatomitos Brasileiros:** Dissertação de mestrado, EPUSP, São Paulo, 1977.

[39] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral do Brasil,** 2002.

- [40] BATISTA, C. M. **Perfil analítico de diatomita.** Ministério das minas e Energia – DNPM, Boletim 11: 2-7. Rio de Janeiro, 1973.
- [41] MORO, S. L.; KIYOHARA, P. N.; SANTOS, P. S. **Estudo preliminar de alguns diatomitos brasileiros em escala de laboratório.** Cerâmica, 27 (144): 481 (1981).
- [42] BICUDO, C. E. M.; BICUDO, R. M. T. **Algas de Águas continentais brasileira**, pág. 112, FUNBEC, São Paulo, 1970.
- [43] SANTOS, P. S. **Diatomita em tecnologia de argilas.** Vol. 2, p. 660. Ed. Edgard Blücher e EPUSP, São Paulo, 1975.
- [44] LIMA, I. P. C. **Caracterização e avaliação “IN VITRO” da adição de diatomita em uma resina composta comercial odontológica restauradora microhíbrida.** Tese de Doutorado, UFRN, Natal, 2005.
- [45] ABREU, S. S. F. **Principais Aplicações Industriais de Kieselguhr (Diatomito).** Revista Química Industrial, Rio de Janeiro, 9 (102); 13-17 (1940).
- [46] ABREU, S. F. **Extração e Beneficiamento do Kieselguhr.** Revista Química Industrial, Rio de Janeiro, 10 (108); 14-15 (1941).
- [47] ANDRADE, M. H. A.; TEIXEIRA, C. **Contribuição para o Conhecimento das Diatomáceas do Brasil.** Boletim Inst. Oceanográfico 8:171 (1975).
- [48] HOFFMANN, F. A. M. **Diatomito.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Publicação nº 306, São Paulo, 1948.
- [49] DANTAS, E. R. **Diatomito no Rio Grande do Norte.** Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Civil, 1982.
- [50] COSTA, J. L. **Oferta mundial de diatomita.** Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2005/DIATOMITA%202005rev.doc->>. Acesso em: 2 de jul. 2006.

[51] FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. **Beneficiamento de Diatomita da Bahia**. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Série rochas e minerais industriais, 7. 2002. 50p.

Disponível em:

<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/ensaios/ensa16.pdf>. Acesso em: 5 de jun. 2006.

[52] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Nº 313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília: Diário Oficial da República federativa do Brasil, 22 de novembro de 2002.

[53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10.004. **Classificação dos Resíduos Sólidos**, ABNT, 1987.

[54] SCHALCH, V. **Curso de resíduos sólidos: operação, manutenção e gerenciamento**. Maceió: ABES, 1991.

[55] KRAEMER, M. E. P. **A questão ambiental e os resíduos industriais**. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos/residuos-industriais/residuos-industriais.shtml>>. Acesso em: 12 de nov. 2006.

[56] SILVA, J. S. **Estudo do Reaproveitamento dos Resíduos Sólidos Industriais na Região Metropolitana de João Pessoa (Bayeux, Cabedelo, João Pessoa e Santa Rita) – PB**. Dissertação de Mestrado, UFPB, João Pessoa, 2004.

[57] VALLE, C. E. **Qualidade Ambiental: como ser competitivo protegendo o meio ambiente: (como se preparar para as Normas ISO 14000)**. São Paulo, Pioneira, 1995.

[58] MACLAREN, V.W., YU, Chang-Ching. **Solid Waste Recycling Behavior of Industrial-Commercial-Institutional Establishments**. Growth and Change. Vol. 28, winter, 1997, p. 93-109.

[59] RECICLOTECA. **Centro de informações sobre reciclagem e meio ambiente**. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/index.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2005.

- [60] CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **Reciclagem e Negócios**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/index.php>>. Acesso em: 19 abr. 2005.
- [61] WIEBECK, H. **Reciclagem do Plástico e suas aplicações industriais**. USP/SEBRAE SP, São Paulo, maio, 1997.
- [62] AWWA. **Fibreglass Pipe design Manual – M45**. USA, American Water Works Association, 1999.
- [63] HASMAN et al. Plastics: A Technical Overview. In: MUSTAFA, Nabil (ed.). **Plastics Waste Management: disposal, recycling, and reuse**. New York: Marcel Dekker, 1993. p.59-87.
- [64] PREZOTTO. **Etileno acetato de vinila – EVA. Planejamento e projeto da indústria química**. Porto Alegre, UFRGS. Nov. 1990, 256 p. (Trabalho de conclusão das disciplinas de planejamento e projeto da indústria química I e II) – Escola de Engenharia.
- [65] TRIUNFO, P. S. A. **Copolímero Etileno-Aacetato de Vinila (EVA) – Características e informações gerais**. Folheto da petroquímica Triunfo, RS, 1994.
- [66] ZATTERA, A. J.; BIANCHI, O.; ZENI, M.; FERREIRA, C. A. **Caracterização de Resíduos de Copolímeros de Etileno - Acetato de Vinila - EVA**. Artigo técnico científico. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 1, p. 73-78, 2005.
- [67] **Processo de fabricação do EVA**. Disponível em: <<http://www.ipen.br/cqma/pol/reciclo/poliret.html>>. Acesso em: 12 de jun. 2006.
- [68] FUKUMORI, K. JSAE Review, 23, p.259 (2002).
- [69] Contato pessoal com a empresa. Bonor indústria S/A.
- [70] BARROS, G. A. **Tubulações de PRFV com Adição de Areia Quartzosa Visando Sua Aplicação na Indústria do Petróleo**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2007.

- [71] ASTM D 6110 – 05a. **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.** p. 17, 2005.
- [72] ASTM D 790 – 03. **Standard Test Method for Flexual Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** p.11, 2003.
- [73] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 7217. **Agregados: determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [74] OLIVEIRA, M.G., VIRGOLINO, M.H., GOMES, A.C.O., SOARES, B.G., MOREIRA, V.X. **Caracterização das Propriedades Reológicas e Dinâmicas de Composições de borracha Natural com Resíduo de EVA.** Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v14n5/23061.pdf>>. Acesso em: 5 de jan. 2006.
- [75] LIN, T. L., JANG, B. Z. **Fracture Behavior of Hybrid Composites Both Short and Continuous Fibers.** Polymer Composites. V. 11, 1990.
- [76] BUCKNALL, C.B. **Toughened Plastics.** Applied Science Publishers, London (1977).
- [77] GUPTA, A. K. & Purwar, S. N. – J. Appl. Polym. Sci., 30, p. 1799 -1814 (1985).
- [78] FOLKES, M.J. & Hope, P.S. **Polymer Blends and Alloys.** Blackie Academic & Professional, Glasgow (1995).

Apêndice

Para os cálculos de módulo de elasticidade, utilizou-se o trecho linear do diagrama força x deflexão.

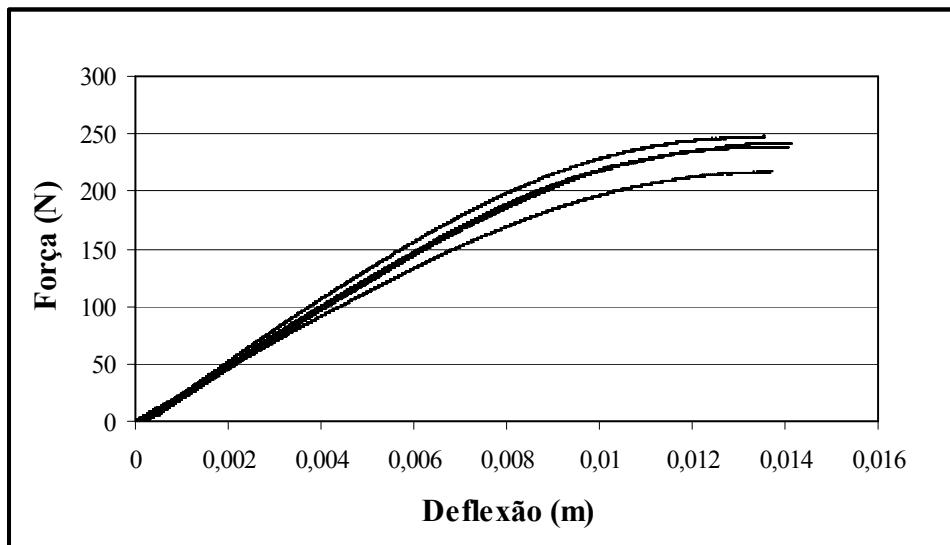


Figura A.1 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos sem carga.

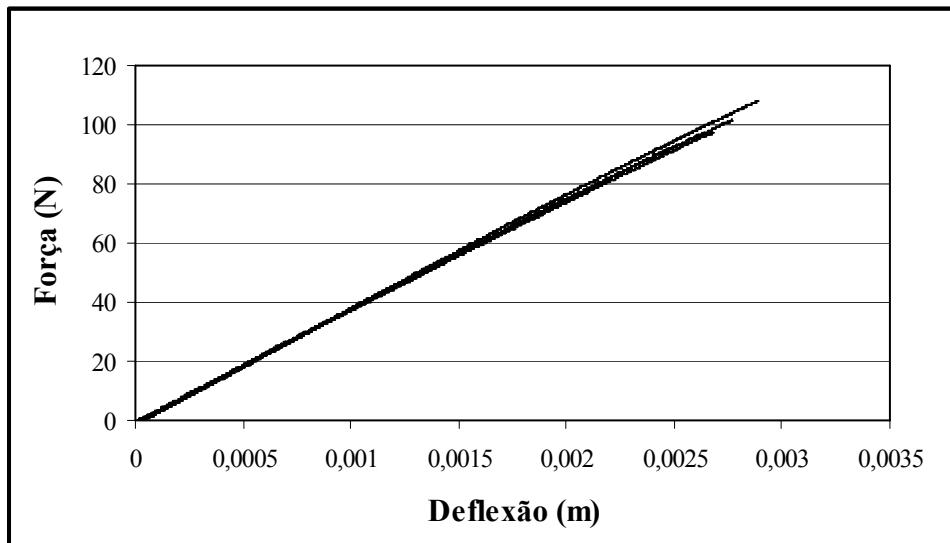


Figura A.2 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (0,3 mm).

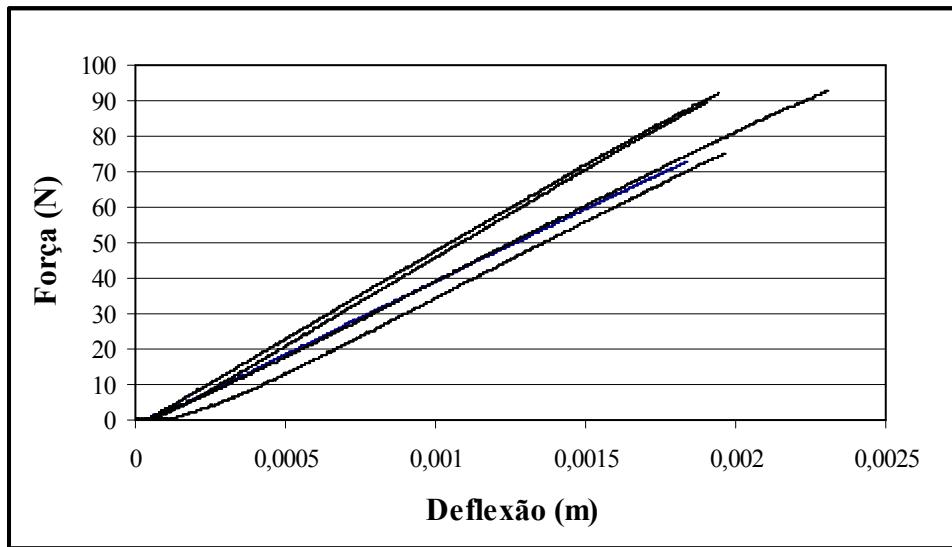


Figura A.3 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (0,6 mm).

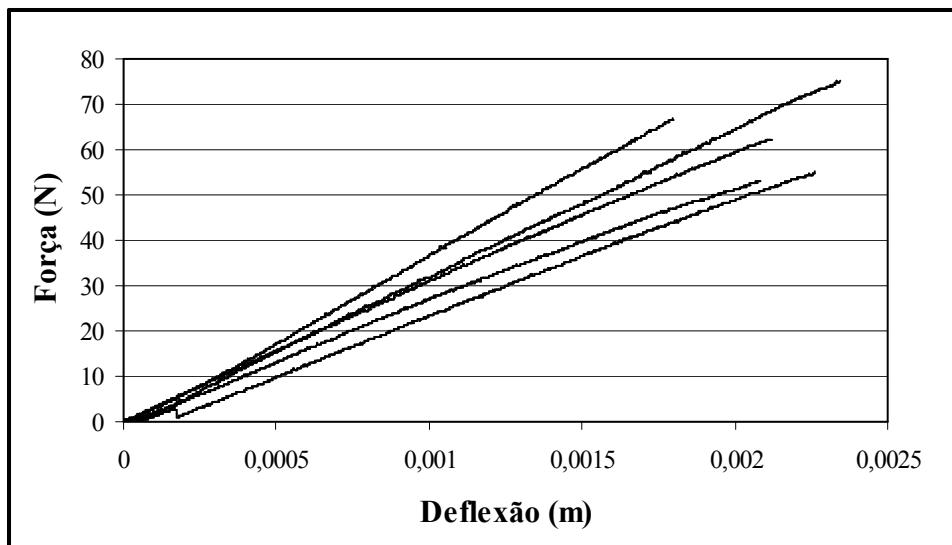


Figura A.4 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de poliéster (1,2 mm).

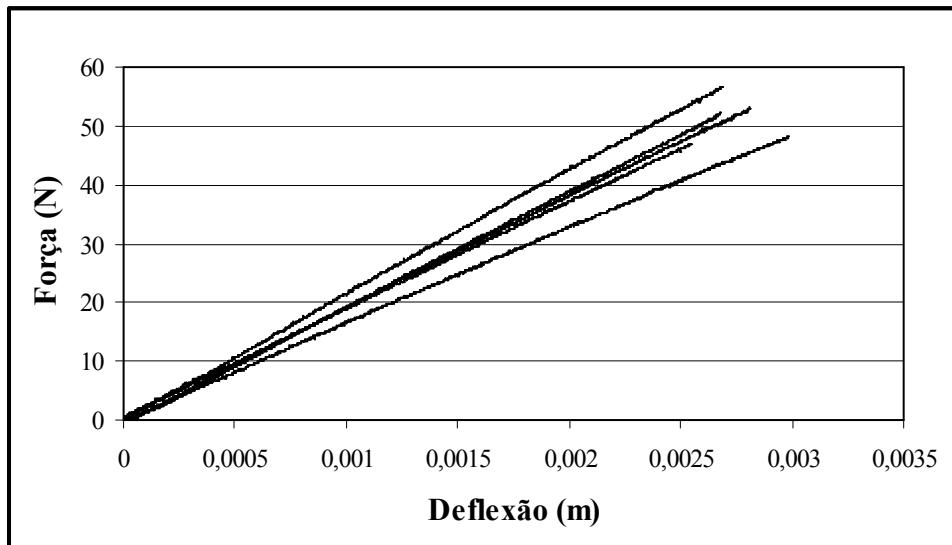


Figura A.5 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 7,5% de EVA.

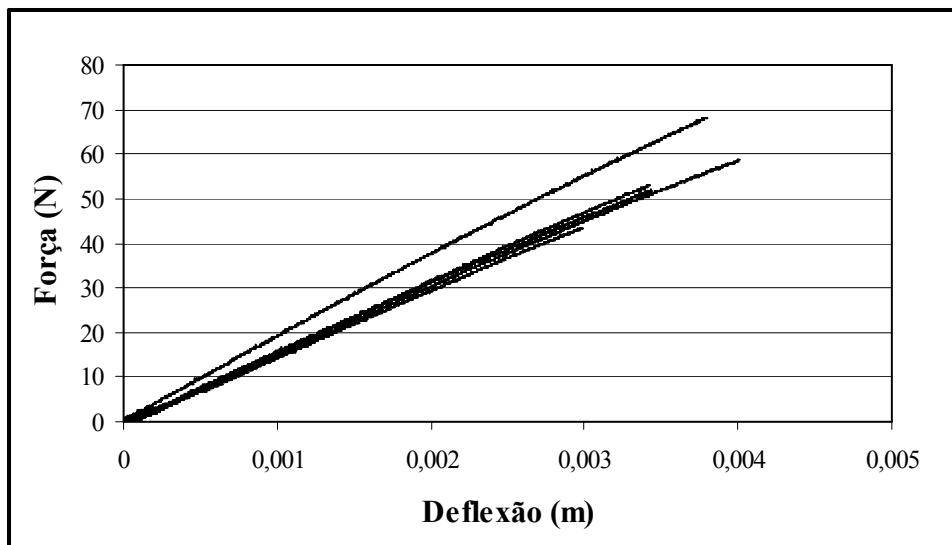


Figura A.6 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 10% de EVA.

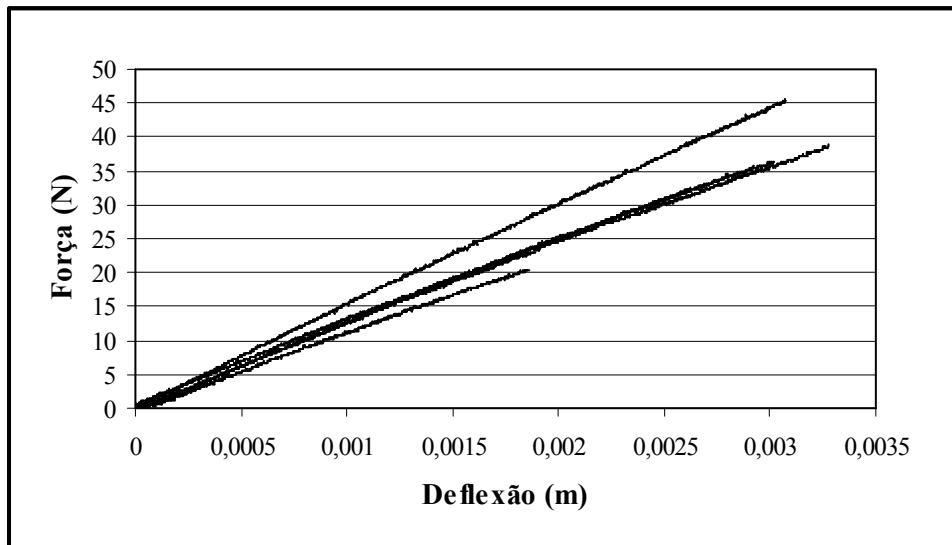


Figura A.7 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 12,5% de EVA.

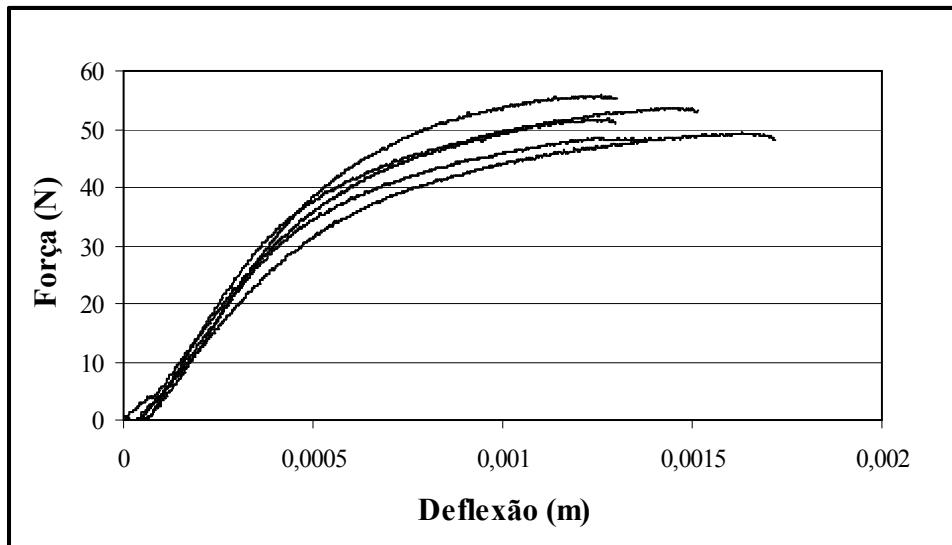


Figura A.8 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de areia.

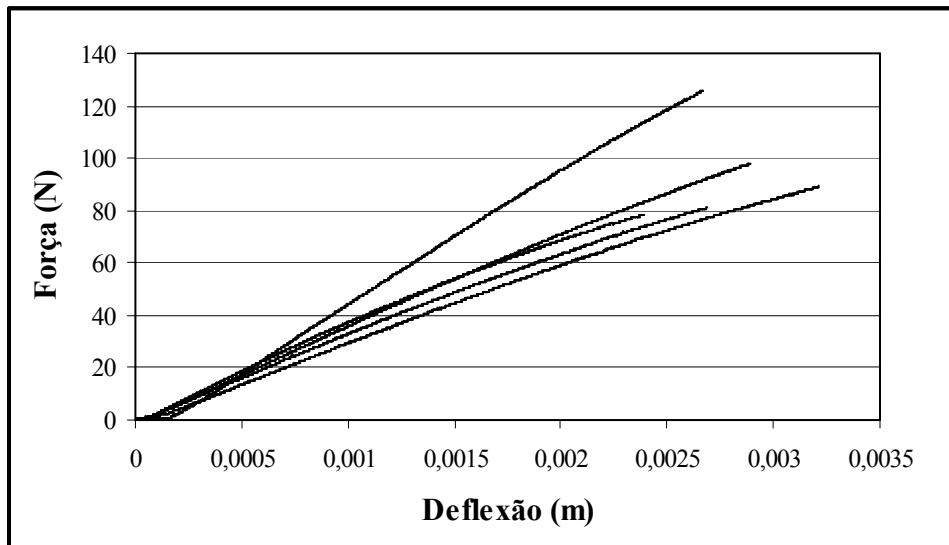


Figura A.9 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 20% de diatomita.

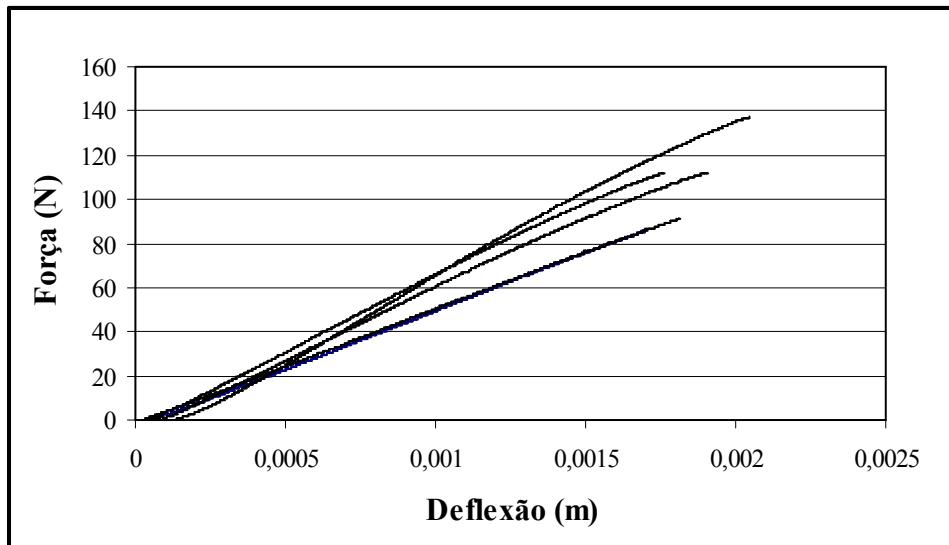


Figura A.10 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 40 % de diatomita.

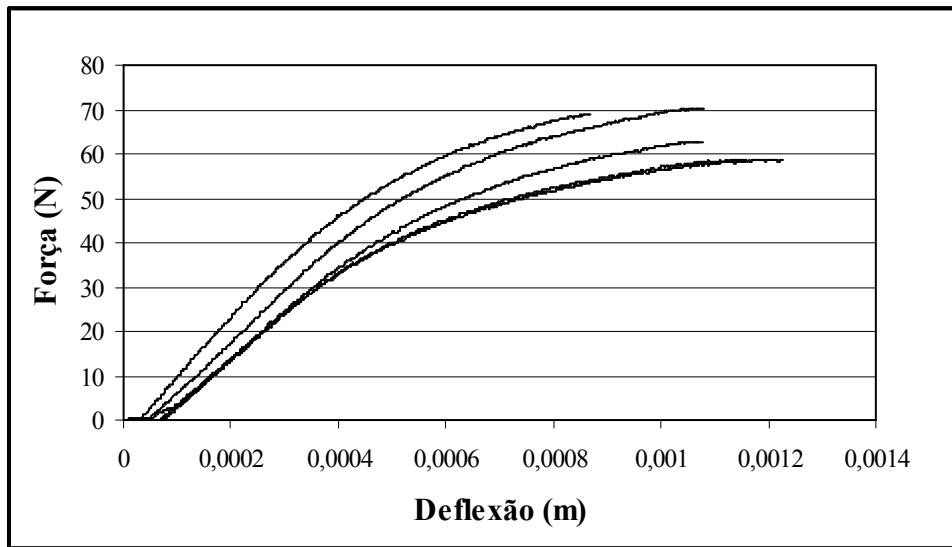


Figura A.11 – Gráfico força x deflexão do ensaio de flexão dos compósitos com adição de 70 % de areia e 5 % de diatomita.