



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Elaine Gonçalves

## **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Reforçados com Caulim**

MARABÁ - PA  
2010

Elaine Gonçalves

## **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Reforçados com Caulim**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Múcio Marcos Silva Nóbrega.

MARABÁ - PA  
2010

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II do CAMAR. UFPA, Marabá, PA**

---

Gonçalves, Elaine

Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos poliméricos reforçados com caulim / Elaine Gonçalves ; orientador, Múcio Marcos Silva Nóbrega. — 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2010.

1. Compósitos poliméricos. 2. Polímeros. 3. Caulim. I. Nóbrega, Múcio Marcos Silva, orient. II. Título.

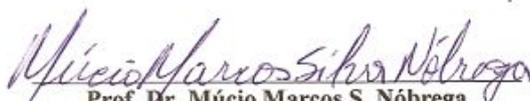
CDD: 21. ed.: 620.192

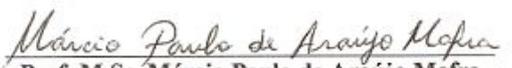
---

**ELAINE GONÇALVES**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Após a exposição da discente Elaine Gonçalves a Banca Examinadora composta pelos professores abaixo, reuniu-se e aprovou o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), intitulado “Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Reforçados com Caulim”, por atender aos requisitos estabelecidos é atribuído o conceito **EXCELENTE**.

  
**Prof. Dr. Múcio Marcos S. Nóbrega**  
Orientador

  
**Prof. M.Sc. Márcio Paulo de Araújo Mafra**  
Avaliador

  
**Prof. M.Sc. Clésianu Rodrigues Lima**  
Avaliador

Marabá – PA  
Agosto/2010

*Dedico esta dissertação  
aos meus pais amados, **Maria e Alceu**  
à minha querida **Nina**  
ao meu namorado **Eduardo**  
e ao meu Pai Criador **Deus**, meu Porto Seguro.*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus, luz que me guia em todos os momentos, por ter me dado condições de concluir uma etapa muito importante na minha vida, por ter me dado coragem para nunca desistir apesar das dificuldades.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. e Orientador Múcio Marcos Silva Nóbrega, por sua dedicação, ajuda e colaboração para a realização do trabalho.

Ao meu amado pai Alceu (*IN MEMORIAN*), a minha mãe Maria, meus sobrinhos Vinicius e Caio meus irmãos Evandro e Júnior, meu padrasto Reginaldo, ao meu amigo de rocha de fé Né Arrais, por acreditarem em mim.

Ao meu namorado Eduardo pelo apoio, paciência, companheirismo, carinho, atenção e incentivo.

Agradecer ao meu amigo querido Eliezer Villa Nova pelas aulas de Cálculo.

A todas as amigas conquistadas nessa fase tão importante da minha vida e em especial: a minha Keka Ana Cássia Queiroz, a Biscoito Fino Elzinha Gouveia, Gilda, Lorena e Very Beatriz.

A minha Xará Elaine Andrade que me ajudou muito nesse trabalho.

Agradecer as minhas amigas de longas datas: Zaíra, Conceição, Luciene, Odete e Valdilã que sempre me apoiaram e me incentivaram nessa longa jornada.

Aos amigos Jhoni, Dimereis, Gustavo, por ajudarem no peneiramento do caulim.

Aos técnicos (as) de Laboratório Rita de Cássia, Beto, Gilson e ao Geanso.

A minha Nina, minha amiga e companheira em todos os momentos.

Enfim, aqueles que direta ou indiretamente auxiliaram na realização deste estudo.

A todos, muito obrigada!

*"Continuamos a dizer que reconhecemos os grandes amigos no momento de nosso sofrimento, mas não é verdade. Os verdadeiros amigos são aqueles que suportam a duração de nossa alegria."*

*(trecho do livro Carta entre amigos de Pe. Fábio de Melo e Gabriel Chalita).*

## RESUMO

O Brasil movimenta quantidades significativas de cargas minerais, porém o beneficiamento e a otimização das propriedades dessas cargas para a aplicação em polímeros ainda deve ser estudado. As cargas minerais têm sido utilizadas em misturas com os mais variados tipos de polímeros, misturas estas chamadas compósitos, com a finalidade de barateamento de custos e, mais particularmente, porque agregam melhorias das características físicas e químicas das peças fabricadas. Definir as características e os ensaios em função da aplicação da carga é relevante tanto para prever como para melhorar o desempenho do material. Neste trabalho, estudou-se a influência da adição caulim como agente de reforço, nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster. O principal objetivo foi avaliar o comportamento mecânico desse material com porcentagens de 10 a 60% em massa 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 tração, flexão e de microdureza Vickers. Os resultados dos testes mecânicos mostraram que, os compósitos obtiveram valores inferiores de resistência a tração e maior módulo quando comparados a matriz pura. Em relação aos ensaios mecânicos de flexão e de microdureza, observou-se um significativo aumento das propriedades com a adição da carga.

**Palavras-chave:** Compósitos Poliméricos. Caulim. Propriedades Mecânicas.

## **ABSTRACT**

Brazil produces and markets significant quantities of mineral fillers. Notwithstanding, a lot must be studied on the improvement and the optimization of filler's properties for the application in polymers. The mineral fillers have been used in mixtures with the more varied types of polymers, these mixtures are designated as composites, in order of cheapening of costs and, more particularly, because they add improvements of the physical and chemical characteristics of the fabricated pieces. To define the characteristics and the tests in function of the application of the filler is relevant both to predict how to improve the performance of the material. In this work, was studied the influence of the addition of kaolin as reinforcing agent, in the mechanical properties of polyester matrix composites. The main goal was to evaluate the mechanical behavior of this material with percentages 10-60% by mass comparing them with the properties of pure resin. Bodies of test were fabricated and the mechanical properties of composites obtained were analyzed through of tensile tests, flexion and Vickers microhardness. The results of the mechanical tests showed that, the composites obtained lower values of tensile strength and higher elastic modulus when compared with the pure matrix. About mechanical tests of flexion and microhardness, was observed one significant increase of the properties with the addition of filler.

**Keywords:** Polymeric composites. Kaolin. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Em (a) caulim associado aos minerais caulinita, quartzo, muscovita e Feldspato (b) beneficiamento do caulim	15
<b>Figura 2.1</b>	Classificação dos materiais compósitos	19
<b>Figura 2.2</b>	Classificação das fibras quanto à composição (a partir de ZHU, 1993)	20
<b>Figura 2.3</b>	Classificação das cargas quanto à composição. (Oréfice et al., 2001)	20
<b>Figura 2.4</b>	Corpo de prova submetido a ensaio de tração. A seta expressa o sentido de aplicação da força	27
<b>Figura 2.5</b>	Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos	28
<b>Figura 2.6</b>	Caulim	34
<b>Figura 3.1</b>	Caulim em forma de pó	38
<b>Figura 3.2</b>	Desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas	40
<b>Figura 3.3</b>	Seqüência esquemática da confecção das placas. (a) preparação da superfície com o desmoldante, (b) colocação da mistura no molde, (c) fechamento do molde (d) retirada das placas	41
<b>Figura 3.4</b>	Placas de 10 a 60 % em massa de caulim	42
<b>Figura 3.5</b>	Etapas experimentais dos compósitos de Resina Poliéster com Caulim	42
<b>Figura 3.6</b>	Corpo-de-prova para ensaio de tração	43
<b>Figura 3.7</b>	Corpo-de-prova para ensaio de flexão	43
<b>Figura 3.8</b>	Foto dos corpos de provas serrados manualmente	44
<b>Figura 3.9</b>	Foto ilustrando o procedimento do ensaio de microdureza	44
<b>Figura 4.1</b>	Corpos de provas para ensaios (a) 50% em massa (b) 60% em massa	46
<b>Figura 4.2</b>	Gráficos Propriedades x (%) em massa para o ensaio de tração	49
<b>Figura 4.3</b>	Gráfico resistência x (%) em massa para o ensaio de tração	49
<b>Figura 4.4</b>	Gráfico Resistência a Flexão x (%) em massa	51
<b>Figura 4.5</b>	Gráfico Módulo Elasticidade a Flexão x (%) em massa	52
<b>Figura 4.6</b>	Valores de Microdureza Vickers (HV)	53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	Frações em massa da carga	39
<b>Tabela 4.1</b>	Propriedades mecânicas dos compósitos obtidas em ensaio de tração	48
<b>Tabela 4.2</b>	Resistência à flexão e módulo de flexão (E) do compósito obtido por ensaios de flexão em 3 pontos	50
<b>Tabela 4.3</b>	Resultados do Ensaio microdureza Vickers	53

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	6
<b>ABSTRACT</b>	7
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	8
<b>LISTA DE TABELAS</b>	9
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	12
1.1. JUSTIFICATIVA	14
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	17
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS	17
<b>2.1.1. Definição e Classificação</b>	17
2.1.1.1 Reforços Utilizados em Compósitos	20
<b>2.1.2. Propriedades dos Compósitos Poliméricos</b>	23
<b>2.1.3. Ensaios Mecânicos em Compósitos</b>	26
2.2. MATRIZ DE POLIÉSTER	29
2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULADOS	30
2.4. CARGAS EM COMPÓSITOS	32
<b>2.4.1. Caulim</b>	33
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	38
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	38
<b>3.1.1. Caulim</b>	38
3.2. DEFINIÇÃO DAS FRAÇÕES DE CARGAS	39
3.3. CONFECÇÃO DAS PLACAS DE COMPÓSITOS	39
3.4. CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	42
3.5. ENSAIO DE TRAÇÃO	43
3.6. ENSAIO DE FLEXÃO	45
3.7. ENSAIO DE MICRODUREZA	45
3.8. PENEIRAMENTO DO REFORÇO	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	46
4.1. CONFECÇÃO DAS PLACAS	46
4.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO	47

4.3. ENSAIOS DE FLEXÃO	50
4.4. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	52
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>55</b>
<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O caulim é um material que apresenta como mineral principal a caulinita e como acessórios os minerais mica, feldspato principalmente muscovita e quartzo. Portanto, quando se mistura caulim ao polímero, o compósito formado é fruto da interação do polímero com cada um destes minerais. Como as superfícies ativas destes minerais são diferentes, é de se esperar comportamentos diferentes de interação de cada um deles com o polímero no qual estão sendo misturados, o que irá se refletir no comportamento físico-químico final do compósito resultante.

O caulim possui muitas aplicações industriais. De acordo com suas características, pode ser utilizado como pigmento, carga e cobertura na indústria de papel, matéria-prima para a indústria cerâmica, matriz para catalisadores, cobertura digestiva de remédios etc. Além disso, pode ser usados na fabricação de cimento branco, pesticidas, vidros, adesivos, cosméticos, plásticos <sup>[1]</sup>. uso desse insumo mineral nos diferentes ramos industriais está relacionado às suas propriedades ópticas, mineralógicas e químicas.

Os caulins oferecem um conjunto único de propriedades entre as diferentes cargas minerais, boa resistência ao ataque químico por ácidos e álcalis; faixa ampla de granulometrias, desde muito pequena até tamanhos médios em micrometros; uma faixa ampla de custos de produção que os tornam acessíveis a todos os tipos de compósitos polímero-caulim; uma faixa ampla de interação com polímeros e agentes chamados “surfadores” (“surfiars”, isto é, modificadores de superfície), de forma a promover a compatibilidade para a produção de compósitos; é produzido com pureza desde moderada até muito alta; a produção industrial dos vários tipos pode ser bastante uniforme <sup>[2]</sup>.

A incorporação de cargas inorgânicas a uma matriz polimérica pode produzir materiais com melhores propriedades físicas e capazes de atender a aplicações tecnológicas que o polímero puro não seria capaz <sup>[3]</sup>. De maneira geral, estas cargas inorgânicas de dimensões mili e micrométricas são capazes de melhorar uma série de propriedades físicas do polímero.

Os materiais compósitos, originados da combinação das cerâmicas e dos polímeros, apresentam características mais apropriadas de resistência mecânica, rigidez, ductilidade, fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e comportamento pós-fissuração, quando comparados com os materiais que lhes deram origem <sup>[5]</sup>. Devido à sua complexa microestrutura, estes materiais são de difícil caracterização. Na avaliação das propriedades mecânicas deve-se levar em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz. As propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, compressão, flexão, impacto, fadiga, e abrasão, além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura <sup>[4]</sup>.

O tamanho das partículas também é outro fator importante, pois define a área de contato com a matriz. Em geral a resistência aumenta com a diminuição do tamanho da partícula. É necessária também uma boa dispersão das partículas na matriz, de modo que as cargas não formem agregados, impedindo o envolvimento completo pela matriz, o que gera concentração de tensões e conseqüente redução nas propriedades mecânicas <sup>[6]</sup>.

O objetivo principal desta investigação foi avaliar o efeito da adição de caulim nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster, comparando-os com as propriedades da resina sem carga.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Estudar o potencial de utilização desta carga mineral como alternativa de um novo compósito;
- Avaliar experimentalmente as propriedades mecânicas (resistência e módulo de elasticidade) do compósito em questão, por meio dos ensaios de tração, flexão e de Microdureza Vickers. Cabe-se ressaltar que o uso em função de suas propriedades ópticas, físicas, mineralógicas e químicas o uso desse insumo mineral pode ser utilizado em uma grande variedade de produtos, nos diferentes ramos industriais.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

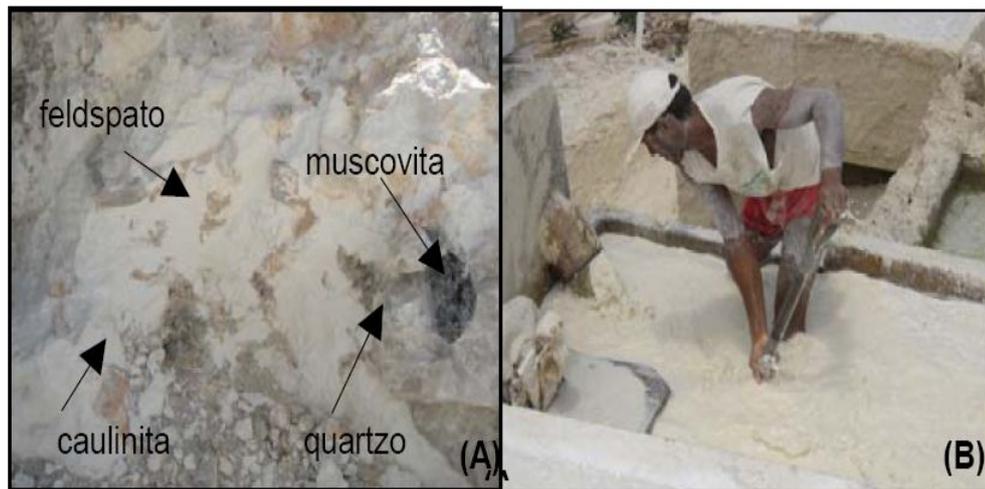
O tema escolhido para o desenvolvimento desta dissertação nasceu do interesse de se criar uma estreita relação entre as áreas de beneficiamento mineral e de materiais poliméricos. Para a obtenção de compósitos particulados com matriz polimérica são necessários, obviamente, as cargas minerais, e os polímeros. O estudo de cargas minerais objetivando seu uso em materiais poliméricos ainda requer intensos estudos devido ao importante papel dessas cargas dentro do compósito.

Dentro desta busca por materiais novos e ecologicamente corretos, tem se destacado a utilização de particulados como material de reforço. A incorporação aleatória de cargas mineral tem comprovado a eficiência desta técnica na melhoria das propriedades mecânicas do material, principalmente no que se refere ao aumento do módulo de elasticidade, sendo que a deformabilidade e a tenacidade diminuem com a redução do tamanho de partícula. O conhecimento da distribuição granulométrica das partículas é de vital importância, pois partículas maiores aumentam a resistência a abrasão, mas por outro lado tem efeitos adversos na deformabilidade e falha do material. A concentração de tensões no compósito aumenta com o aumento do tamanho da carga. A fração fina da distribuição granulométrica é igualmente importante, já que a tendência à aglomeração da carga aumenta com a redução do tamanho de partícula. Esta possível aglomeração, que se tornam sítios de iniciação de trincas, pode reduzir a rigidez e, principalmente, a tenacidade. Já a forma da partícula é também um parâmetro importante em relação às propriedades mecânicas, por exemplo, o efeito de reforço aumenta com o aumento da anisotropia - fator de forma - da partícula [7].

A escolha do particulado de caulim, como elemento de reforço da matriz polimérica fundamenta-se, principalmente, por tratar-se de um bem mineral extremamente versátil em função de suas características tecnológicas, do seu baixo custo, e abundante no meio, visto que, no Brasil, somente os estados do Pará e Amapá detêm cerca de 80% das reservas oficiais do país, sendo 818 milhões de toneladas no Pará e 361 milhões de toneladas no Amapá [8]. É utilizado, principalmente, como carga ou matéria-prima; na indústria cerâmica e na construção

civil; para extensão e reforço de polímeros; para suporte de catalisadores e fibra de vidro; como veículo, adsorvente, diluente; como agente polidor.

A Figura 1.1a ilustra o caulim associado aos minerais caulinita, muscovita, feldspato e quartzo e a Figura 1.1b ilustra o beneficiamento, de forma rudimentar.



**Figura 1.1:** Em (a) caulim associado aos minerais caulinita, quartzo, muscovita e Feldspato (b) beneficiamento do caulim.

Normalmente as cargas minerais são produzidas com controle de tamanho e geometria. Podem ser classificadas como bidimensionais, como o talco e a mica e tridimensional como o caulim. Quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a área superficial da carga e, conseqüentemente, a quantidade de interfaces polímero/carga também aumenta. Espera-se uma melhora nas propriedades mecânicas com o aumento desses pontos de adesão. Por outro lado quanto maior a área superficial da carga maior será a dificuldade de dispersão na matriz ou o controle da viscosidade no processamento [6, 7].

## 1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho consiste em um estudo experimental das propriedades mecânicas de um material compósito formado por matriz polimérica reforçada, por caulim. As demais etapas realizadas estão indicadas a seguir:

No Capítulo 1 apresenta a introdução.

No Capítulo 2 foram identificados alguns trabalhos de pesquisadores que estudaram temas relacionado ao assunto.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia e todo aparato experimental utilizados para a realização dos testes.

Os resultados experimentais dos testes realizados são apresentados no Capítulo 4, através de tabelas e gráficos, acompanhados de comentários e análises.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre assuntos relacionados a este trabalho. Os assuntos são organizados de forma a dar ao leitor subsídios para uma melhor compreensão do trabalho experimental e indicadas referências bibliográficas para que, se for o caso, o leitor possa se aprofundar em tópicos de seu interesse. Neste trabalho, procurou-se também desenvolver temas que agregassem conhecimento geral ao leitor, principalmente, se este não tiver formação na área de compósitos poliméricos. Quanto à estruturação desta revisão, esta foi entendida como apropriada para o entendimento do estudo de compósitos particulados de matriz orgânica de poliéster. Devido à ênfase do estudo, inicialmente, foram tratados assuntos que se relacionam ao compósito com definição e classificação, abordando também as cargas minerais, a seguir, assuntos relacionados às propriedades mecânicas. Num terceiro momento estudaram-se o caulim e as propriedades relevantes deste mineral.

### **2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS**

#### **2.1.1. Definição e Classificação**

Os materiais oriundos do emprego de cargas minerais e de fibras em uma matriz são denominados materiais compósitos. Portanto, um compósito é basicamente qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, para que desta forma adquira-se uma melhor combinação de propriedades, que são criadas a partir da combinação de dois ou mais materiais distintos <sup>[9]</sup>.

Compósitos podem ser definidos como um sistema constituído de materiais, que têm suas propriedades afetadas pela introdução de quantidades significantes de um segundo constituinte <sup>[10]</sup>.

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 <sup>[11, 12]</sup>. A denominação destes materiais é bastante diversificada, podendo ser tratados na literatura como: compostos, conjugados ou compósitos <sup>[13]</sup>. Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros.

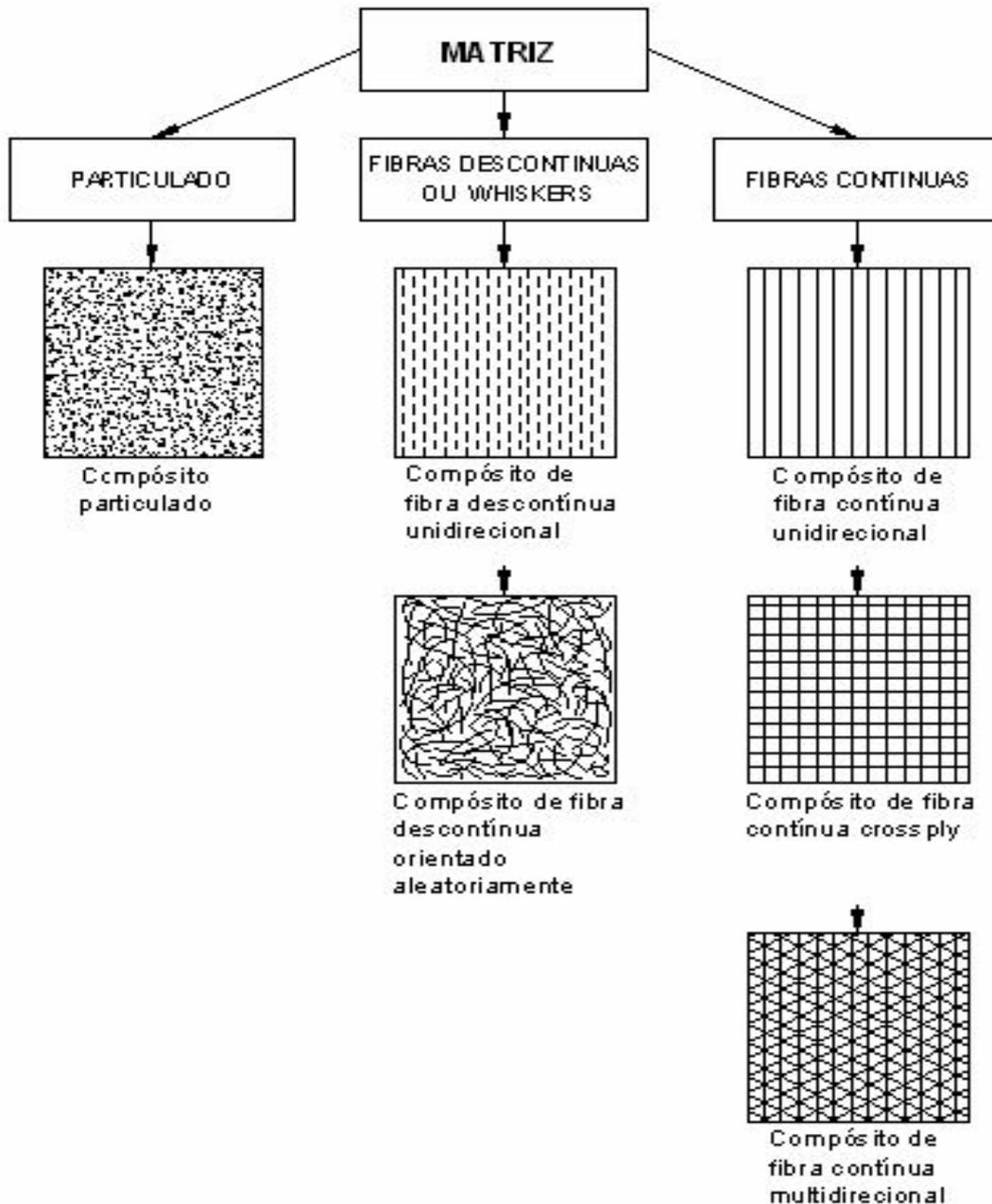
As possíveis combinações são condicionadas às condições de processamento às incompatibilidades entre os componentes. Compósitos para aplicações estruturais, geralmente, utilizam fibras sintéticas ou naturais, como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou distribuição 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 <sup>[14]</sup>.

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 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 <sup>[13]</sup>.

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 <sup>[15]</sup>.

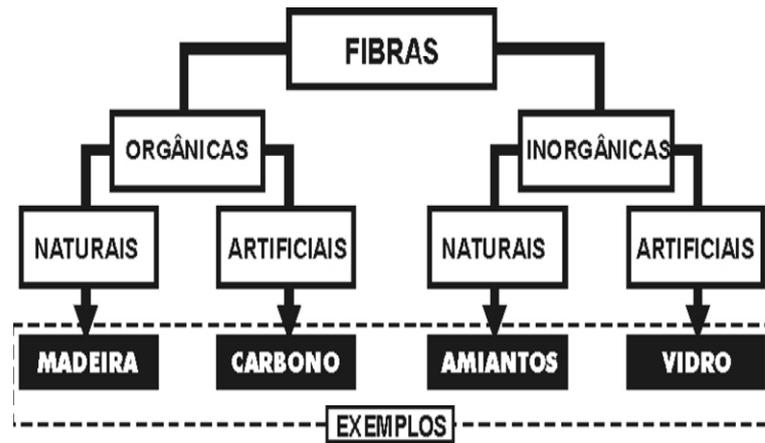
Nos compósitos, a fase dispersa pode ter a forma de fibras ou particulados, sendo responsável por suportar o carregamento aplicado. Em função

do tipo da fase dispersa, os materiais compósitos podem ser classificados em três categorias gerais, ver Figura 2.1



**Figura 2.1:** Classificação dos materiais compósitos <sup>[16]</sup>.

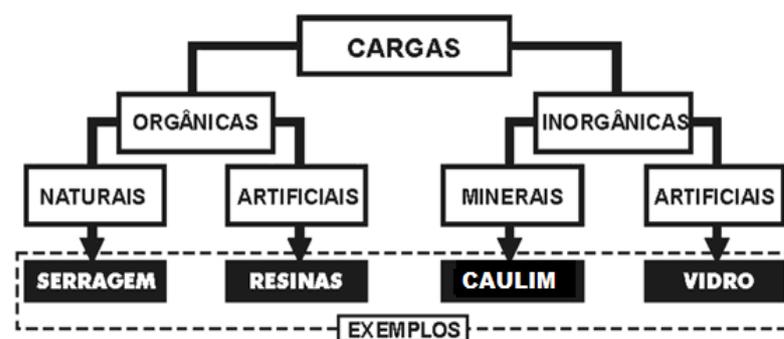
Compósitos de fibras descontínuas (whiskers): contêm pequenas fibras como reforçadores. Quanto aos reforços de fibras, podem ser classificadas por sua composição, tal como ZHU (1993), organizou, mostrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Classificação das fibras quanto à composição (a partir de ZHU, 1993) <sup>[17]</sup>.

Compósitos particulados: também chamados como cargas, apresentam-se como partículas esféricas, cúbicas ou plaquetas, aumentam a rigidez, podendo ou não aumentar a resistência do compósito. Devem ser inertes à matriz e podem ter origem mineral, vegetal ou artificial, como visto na Figura 2.3. As cargas tradicionais são o talco, carbonato de cálcio e caulim.

Os compósitos são materiais que possuem fases químicas e/ou físicas distintas, distribuídas no interior de uma fase contínua, denominada matriz <sup>[18]</sup>. Em matriz polimérica, estes agentes (partículas) são chamados de agentes de preenchimento ou fillers e são adicionados para ampliar a rigidez do material (módulo elástico), reduzir custo e modificar propriedades térmicas e elétricas, entre outras <sup>[19]</sup>.



**Figura 2.3:** Classificação das cargas quanto à composição. (Oréfica et al., 2001)

### 2.1.1.1 Reforços Utilizados em Compósitos

Os materiais reforços são os que realçam propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo. A importância de adicionar um reforço à matriz polimérica deve-se principalmente às vantagens desse material de reforço, como elevada rigidez e resistência em relação à matriz polimérica, e tamanho, forma e características da superfície da partícula, a fim de proporcionar uma efetiva ligação mecânica. As propriedades do compósito são altamente dependentes da interação polímero/reforço, sendo que o reforço deve preservar as características da matriz polimérica.

Segundo HOLLAWAY (2003) <sup>[20]</sup>, pode-se dizer que as propriedades dos compósitos dependem:

- Das propriedades do reforço;
- Das propriedades da resina;
- Da taxa de reforço adicionada à resina;
- Da geometria e da orientação do reforço na resina,
- Do método de processamento do compósito.

Na maioria dos casos, as propriedades mecânicas do reforço, resistência e módulo de elasticidade, são bem maiores do que as propriedades da resina. Portanto, seria sensato dizer que, à medida que aumenta o teor de reforço, as propriedades mecânicas do compósito são melhoradas, mas na prática isso nem sempre acontece. O teor de reforço a ser adicionado à matriz depende do tipo de processo utilizado para misturar os componentes, além de ser influenciado pelo tipo de resina e pela forma com que o reforço é incorporado à matriz.

Existem limites ideais para que o reforço seja totalmente encapsulado pela resina, obtendo-se um compósito com a maior eficiência possível. Geralmente, o teor de reforço a ser empregado varia entre 30 e 40% em volume <sup>[21]</sup>. Conhecendo bem as propriedades mecânicas dos compósitos, é possível empregá-los na indústria da construção, desde que as deformações e os deslocamentos estejam dentro das prescrições funcionais e estéticas, e, principalmente, que não ocorra ruína, durante a vida útil prevista para a estrutura.

Em função da eficiência do reforço mecânico, as fibras e as cargas minerais podem ser classificadas da seguinte maneira <sup>[22]</sup>:

- Fibras de reforço: são as fibras de módulo e resistência elevada, como as fibras de vidro, de carbono, de aramida, etc.;
- Cargas minerais reforçantes: são minerais com estrutura fibrosa ou lamelar, como mica, talco, caulim, etc.;
- Cargas minerais de enchimento: são também conhecidas como cargas funcionais, pois sua função principal é baratear o custo da matriz polimérica. São os minerais com formato esferoidal, como sílica, quartzo, alumina, etc.

O melhor reforço é aquele que atende as características de projeto, com o menor custo. Durante algum tempo, segundo Sousa (2005), esse material era empregado com a principal função de redução de custo do produto final, já que diminuía a quantidade de polímero empregada. Porém, com o passar do tempo, outras funções foram atribuídas a esses materiais, como aumento de rigidez, de resistência à flexão, temperatura de distorção térmica (HDT), condutividade térmica e dureza, passando a ser denominadas de cargas reforçativas.

Outras propriedades podem ser alcançadas, dependendo do tipo de reforço particulado a ser empregado. As principais são: aumento de resistência à tração, à flexão, à abrasão, química e ao impacto, além de diminuir o encolhimento e o empenamento de peças moldadas. Geralmente, os reforços particulados são beneficiados antes de serem incorporados como cargas, sendo que os reforços minerais mais importantes são os carbonatos de cálcio, argilas e talcos <sup>[22]</sup>.

Segundo SOUSA (2005), existe alguns fatores que, muitas vezes, limitam o uso de fibras e de cargas minerais, reforçantes ou de enchimento, em matrizes poliméricas:

- Difícil processabilidade e ação abrasiva nos equipamentos de compostagem e transformação de termoplásticos, principalmente a teores elevados de reforço incorporado;

- Queda acentuada na resistência ao impacto e tenacidade e/ou ductilidade do compósito, principalmente em matrizes de termoplásticos tenazes;
- Efeito de anisotropia nas propriedades mecânicas e empenamento de peças moldadas, principalmente a elevados teores de fibras incorporadas. Esses efeitos podem ser minimizados pela combinação criteriosa de cargas minerais com fibras.

### 2.1.2. Propriedades dos Compósitos Poliméricos

A utilização de materiais compósitos e alternativos vem sendo incrementada a cada dia, na medida em que se torna mais generalizada a conscientização de que o uso de recursos renováveis e não agressivos ao meio ambiente faz parte de um novo modelo ecologicamente correto. Para a formação do 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 <sup>[9]</sup>. 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.

Assim, os seguintes fatores são fundamentais para as propriedades dos compósitos poliméricos <sup>[6]</sup>.

- 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:

$$P = P_a \cdot V_a + P_b \cdot V_b$$

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 <sup>[6]</sup>:

- Adsorção e molhamento: O molhamento eficiente da carga pelo polímero remove o ar incluído 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. 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 hidrofílicas.

#### 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 [6].

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, conseqüentemente, redução das propriedades mecânicas do material.

### **2.1.3. Ensaio Mecânicos em Compósitos**

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas pela resposta que estes apresentam, quando submetidos a solicitações. Ensaio de Tração consiste em submeter um corpo de prova a um esforço crescente de tração Figura 2.4, aplicado na sua direção axial, até que ocorra a ruptura. Estes ensaios nos permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompe. Durante o ensaio, o corpo de prova (CP) é alongado e, ao romper-se, a parcela elástica dessa deformação é

recuperada. A deformação que permanece após a ruptura é a plástica. No ensaio, o corpo de prova é fixado pelas extremidades às garras e é sujeitada a um esforço de tração gradualmente crescente, deformando até a ruptura. As deformações são medidas por um extensômetro acoplado à parte útil do CP. A força de tensão atua na seção transversal do material. A aplicação de uma força axial de tração num corpo preso produz uma deformação no corpo, isto é, um aumento no seu comprimento com diminuição da área da seção transversal. Este aumento de comprimento recebe o nome de alongamento.



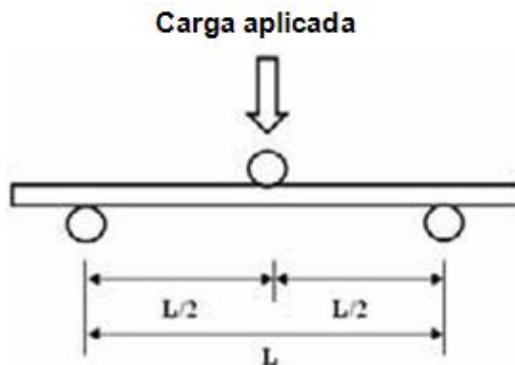
[

**Figura 2.4:** Corpo de prova submetido a ensaio de tração. A seta expressa o sentido de aplicação da força.

As máquinas empregadas para realização do ensaio de tração são geralmente denominadas máquinas universais para ensaio de materiais. O resultado realmente interessante para a determinação das propriedades dos materiais ensaiados é a relação entre os valores de tensão e deformação. A partir dessa relação podemos traçar um gráfico que relaciona os valores de tensão e de deformação.

Um dos ensaios mecânicos mais utilizados na caracterização de compósitos é o ensaio de flexão em três pontos. Que consiste na aplicação de uma carga no centro de um corpo de prova específico, padronizado, apoiado em dois pontos, como mostra a Figura 2.5. 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 <sup>[23]</sup>. Os principais resultados do ensaio de flexão são: módulo de elasticidade, limite de resistência à flexão.



**Figura 2.5:** Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos.

Dureza é a medida da resistência de um material a uma deformação permanente ou plástica localizada <sup>[9]</sup>. Quanto maior a dureza, maior a resistência à abrasão do material.

Técnicas quantitativas para determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é relacionada a um número índice de dureza; quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza. As durezas medidas são apenas relativas (dependem de uma escala padrão) <sup>[9]</sup>.

De acordo com CALLISTER (2002), os testes de dureza são simples e baratos, os corpos de prova não precisam de preparo especial; e, é não destrutivo os corpos de prova não são fraturados, nem excessivamente deformados.

Há várias maneiras de se medir a dureza de um material (Brinell, Rockwell, Shore Vickers e Knoop). O ensaio de dureza realizado será o de microdureza Vickers. Segundo GREGORY et al (1992) <sup>[24]</sup> os valores de dureza de compósitos variam com o tipo de cura, a quantidade e o tamanho das partículas.

Nos compósitos particulados de matriz polimérica o comportamento mecânico do material depende de fatores como a estrutura do monômero, a flexibilidade das cadeias, o peso molecular, a quantidade de ligações cruzadas, a cristalinidade, a orientação das cadeias, temperatura de uso e características das cargas como a forma o tamanho das partículas, e a adesão superficial, etc <sup>[25]</sup>.

## 2.2. MATRIZ DE POLIÉSTER

As resinas poliéster constituem uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular. 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 <sup>[26]</sup>.

O nome “poliéster” é usado para descrever uma categoria de materiais obtidos geralmente por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. Poliéster significa: poli (muitos, portanto muitos grupos ésteres); éster (é uma função química; um éster é obtido através da seguinte reação: ácido + álcool = éster + água). 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 aeração de álcoois com

cloretos de acilam ou anidridos. Dependendo da formulação inicial, pode-se obter um poliéster saturado ou insaturado <sup>[27]</sup>.

As resinas de poliéster são utilizadas na fabricação de peças moldadas, com ou sem fibra de vidro, tais como: piscinas, barcos, banheiras, tanques, telhas, 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 <sup>[28]</sup>. 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 <sup>[11]</sup>. Os poliésteres insaturados são bastante utilizados em conjunção com fibras de vidro para obter um polímero reforçado que apresente excelentes propriedades mecânicas como à 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 <sup>[29]</sup>.

### 2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULADOS

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 <sup>[9]</sup>. 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 <sup>[9]</sup>. 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 <sup>[30]</sup>. 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 <sup>[6]</sup>. 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 mecânicas dos compósitos <sup>[6]</sup>.

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 <sup>[11]</sup>. 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 exerce pouca influência demais nas propriedades dos compósitos, podendo conferir, dependendo da natureza destas, principalmente um aumento no módulo do compósito <sup>[31]</sup>.

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 <sup>[30]</sup>. 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 <sup>[30]</sup>. 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 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 <sup>[32]</sup>.

#### 2.4. 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 <sup>[33]</sup>.

Em estudos anteriores utilizou-se resíduo de EVA (Etileno acetato de vinila) oriundos da indústria calçadista como agregado para concreto leve na construção civil <sup>[34]</sup>. A partir de estudos, 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 <sup>[35]</sup>. 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 <sup>[36]</sup>.

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 <sup>[37]</sup>.

Em 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 <sup>[38]</sup>. 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 <sup>[39]</sup>. 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. Caulim**

O termo caulim ou “china clay” deriva da palavra chinesa Kauling (colina alta) e se refere a uma colina de Jauchau Fu, ao norte da China, onde o material é obtido, há muito tempo. É formado essencialmente pela caulinita, apresentando em geral cor branca ou quase branca, devida ao baixo teor de ferro. É um dos mais importantes e provavelmente um dos seis minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre (profundidade até 10 metros) <sup>[40]</sup>.

A primeira utilização industrial do caulim foi na fabricação de artigos cerâmicos e de porcelana há muitos séculos atrás. Somente a partir da década de 1920 é que se teve início a aplicação do caulim na indústria de papel, sendo precedida pelo uso na indústria da borracha. Posteriormente, o caulim passou a ser utilizado em plásticos, pesticidas, rações, produtos alimentícios e farmacêuticos, fertilizantes e outros, tendo atualmente uma variedade muito grande de aplicações industriais <sup>[40]</sup>.

Entende-se por caulim (Figura 2.6), o material formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Também podem ocorrer os minerais do grupo da caulinita, a saber: diquita, nacrita, folerita, anauxita, colirita e tuesita. Além disso, o caulim sempre contém outras substâncias sobre a forma de impurezas, deste traço até a faixa de 40 – 50% em volume, consistindo, de modo geral, de areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, etc. A fórmula química dos minerais do grupo da caulinita é  $Al_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ , onde m varia de 1 a 3 e n de 2 a 4 <sup>[40]</sup>.



**Figura 2.6:** Caulim

Embora o mineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) seja o principal constituinte do caulim, outros elementos além do alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio acham-se geralmente presentes. A composição química do caulim é usualmente expressa em termos de óxidos dos vários elementos, embora eles possam estar presentes em forma mais complicada e por vezes desconhecida <sup>[40]</sup>.

Entre as propriedades físicas do caulim, são citadas na literatura principalmente as mencionadas abaixo <sup>[40]</sup>:

- Desfloculação: é o ponto no qual o caulim na forma de uma barbotina, mais se aproxima de sua viscosidade mínima.
- Tixotropia: é o fenômeno de transformação sol-gel isoterma reversível, ou seja, quanto mais afastada de sua viscosidade mínima está o caulim na forma de barbotina, maior é a tendência de aumentar sua viscosidade com o tempo, podendo em certos usos, atingir a forma de gel; no entanto, pela agitação volta ao estado físico inicial;
- Viscosidade: é o tempo, em segundos, para escoar volumes de 200 e 250 cm<sup>2</sup> de barbotina em viscosímetro de Marinoti;
- Granulometria: é mais grosseira que as dos demais tipos de argila (menos que 0,2 microns);
- Cristalinidade: apresenta lamelas hexagonais bem cristalizadas;
- Densidade real: 2,6 g/cm<sup>3</sup>;
- Ponto de fusão: de 1.650 a 1.775°C;
- Resistência mecânica: baixa em relação às outras argilas;
- Plasticidade: menos plástico que as demais argilas;
- Morfologia: apresenta partículas lamelares euédricas;
- pH: depende do poder de troca de íons e das condições de formação do caulim; é medido com potenciômetro e oscila entre 4,3 e 7.
- Alvura: é a propriedade de medida da refletância do caulim, através de aparelhos como o ZE (Zeiss Elrepho), o Photovolt e o GE/Reflectometer;
- Módulo de ruptura: medido em atmosferas a 80% de umidade relativa;
- Abrasão: propriedade medida em termos de perda de peso em miligramas.

O caulim tem muitas aplicações industriais e novos usos estão constantemente sendo pesquisado e desenvolvido. É um mineral industrial de características especiais, porque é quimicamente inerte dentro de uma ampla faixa de pH; apresenta ótimo poder de cobertura quando usado como pigmento ou como extensor em aplicações de cobertura e carga; é macio e pouco abrasivo; possui baixas condutividades de calor e eletricidade; e seu custo é mais baixo que a maioria dos materiais concorrentes <sup>[40]</sup>.

Suas principais aplicações atualmente são como agentes de enchimento (filler) no preparo de papel; como agente de cobertura (coating) para papel “couché” e na composição das pastas cerâmicas. Em menor escala, o caulim é usado na fabricação de materiais refratários, plásticos, borrachas, tintas, adesivos, cimentos, inseticidas, pesticidas, produtos alimentares e farmacêuticos, catalisadores, absorventes, dentifrícios, clarificantes, fertilizantes, gesso, auxiliares de filtração, cosméticos, produtos químicos, detergentes e abrasivos, além de cargas e enchimentos para diversas finalidades <sup>[40]</sup>.

Os principais depósitos brasileiros estão nos estados do Amapá, Pará, Amazonas, no Amapá são do tipo sedimentar, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Norte. Os estados do Pará, Amapá e Amazonas detêm cerca de 97% das reservas nacionais. Quanto às reservas mundiais, os EUA ocupam o primeiro lugar com 58% e o Brasil situa-se em segundo lugar com 28%. Cerca de 62% do caulim produzido no mundo provém dos Estados Unidos, Coréia do Sul, República Tcheca, Brasil e Reino Unido <sup>[41]</sup>.

A produção brasileira de caulim beneficiado, em 2005, foi cerca de 2,4 milhões de toneladas e a de caulim bruto de aproximadamente 6,0 milhões de toneladas. A Rio Capim Caulim S/A mantém a liderança na produção nacional com 40%, seguida da CADAM com 31% e da Pará Pigmentos S/A com 22%. Todas as empresas aumentaram suas produções em decorrência dos seus investimentos em P&D, que resultaram no desenvolvimento de novos produtos. Desse modo, houve um aumento significativo nas suas capacidades instaladas de produção <sup>[42]</sup>. A produção de caulim oriunda dos estados de São Paulo, Paraná, Bahia, Minas

Gerais, Rio Grande do Sul e Santa Catarina atendem, principalmente, ao setor de cerâmicas brancas <sup>[41]</sup>.

O caulim é um bem mineral extremamente versátil em função de suas características tecnológicas das quais se podem destacar: para formação de filmes, como carga ou matéria-prima, na indústria cerâmica e na construção civil, para extensão e reforço de polímeros, para suporte de catalisadores e fibra de vidro, como veículo, adsorvente, diluente e como agente polidor <sup>[41]</sup>.

O consumo setorial de caulim no Brasil apresenta as seguintes participações: indústria de papel e celulose (46,7%), indústria cerâmica (33,2%), indústria de tintas e vernizes (8,3%) e outros (11,8%). Dentre estes, destacam-se os produtos farmacêuticos e veterinários, fertilizantes, vidro e borracha <sup>[40]</sup>.

No mundo o consumo setorial, em 1999, foi assim distribuído: 45,0% na indústria de papel, 16% na indústria cerâmica, 15,0% em refratários e 24,0% empregados para diversas finalidades, destacando-se as indústrias de cimento, “fiberglass”, borracha e tinta <sup>[40]</sup>.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o processo de confecção do compósito e os materiais aplicados. Será descrito o material utilizado como carga/reforço, com os respectivos percentuais, bem como os procedimentos de cada ensaio.

#### 3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os compósitos foram confeccionados em um molde de aço de forma a garantir placas retangulares com superfícies planas, com bom acabamento superficial. Utilizou-se como matriz polimérica, resina de poliéster insaturada, fabricada pela Embrapol do tipo ortoftálica pré-acelerada e catalisada com 1,5% de MEKP (peróxido de metil etil cetona). O desmoldante usado na produção das placas foi uma cera de polimento automobilístico. Para pesagem foi utilizada uma balança analítica. Como fase dispersa para a confecção do compósito foi utilizado caulim, e placa pura para fins de comparação de propriedades.

##### 3.1.1. Caulim

O caulim usado neste trabalho é proveniente de Belo Horizonte – Minas Gerais, adquirido no distribuidor Armazém dos Artefatos, apresenta cor quase branca e encontrava-se na forma de pó como mostra a Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Caulim em forma de pó.

### 3.2. DEFINIÇÃO DAS FRAÇÕES DE CARGAS

Inicialmente, um peneiramento foi realizado utilizando-se apenas as partículas que passaram na peneira de 325 mesh em seguida o caulim foi colocado no forno mufla numa temperatura de 100° C por volta de 2 horas para retirada da umidade residual. Após retirá-lo do forno, ficaram 30 minutos num dessecador para esfriar.

Para a preparação do experimento pesou-se todos os materiais e fez-se a mistura da resina + caulim + catalisador, buscando-se em cada placa preparada um menor percentual a ser adicionado de resina e um maior percentual de carga. O caulim foi adicionado aos poucos na resina + catalisador, numa quantidade suficiente para que não comprometesse o escoamento da mistura no molde. Desta forma, frações de carga de caulim, utilizadas na confecção das seis placas foram determinadas (Tabela 3.1).

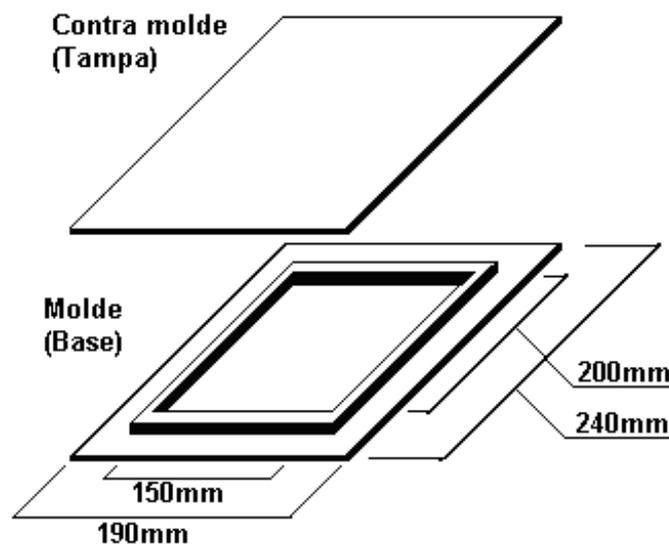
**Tabela 3.1:** Frações em massa da carga

Placas	% massa caulim
1 <sup>a</sup>	10
2 <sup>a</sup>	20
3 <sup>a</sup>	30
4 <sup>a</sup>	40
5 <sup>a</sup>	50
6 <sup>a</sup>	60

### 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 aço composto de base e tampa com dimensões de 200 x 150 x 3 mm. Antes da preparação da mistura (resina + carga + catalisador), aplicou-se um desmoldante a base de cera na superfície do molde para facilitar a remoção das placas. Em um recipiente plástico foi realizada a mistura, sendo logo em seguida colocada no molde. O volume de

material calculado foi o necessário para confeccionar placas nas dimensões de 200 x 150 x 3 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 deixar a placa com 3 mm e reduzir a quantidade de bolhas de ar e obter uma superfície plana com bom acabamento superficial em ambas as faces. Em seguida o molde é levado para estufa, numa de temperatura de 70°. Após um tempo de aproximadamente 5 horas, o molde foi aberto e a placa foi desmoldada. O desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas é apresentado na Figura 3.2. O procedimento utilizado na confecção das placas é mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.2:** Desenho esquemático do molde utilizado na confecção das placas.

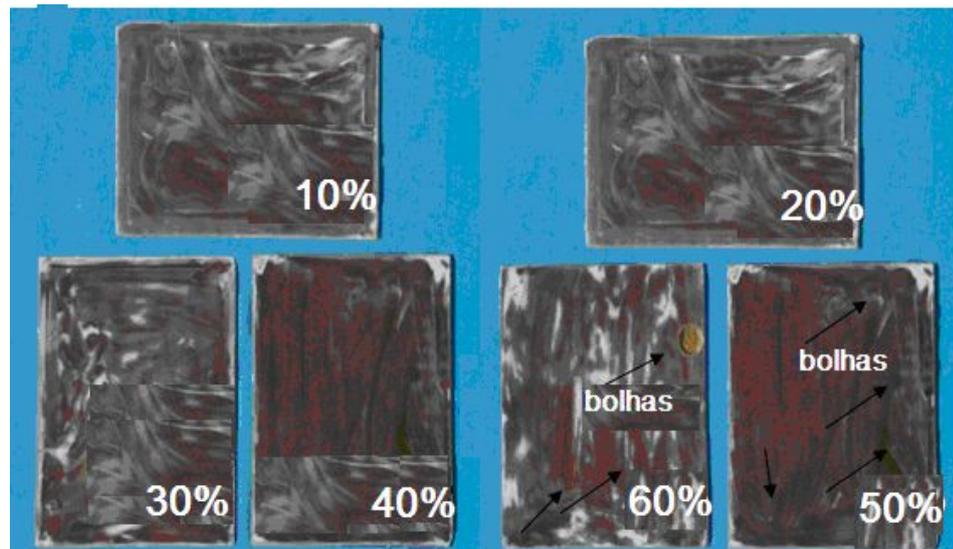
O sistema usado para união dos moldes foi o fechamento com feches mecânicos, permitindo assim baixa pressão de fechamento usando-se, parafusos para fechar-lo, portanto é um processo de fechamento manual, o procedimento utilizado na confecção das placas



**Figura 3.3:** Seqüência esquemática da confecção das placas. (a) preparação da superfície com o desmoldante, (b) colocação da mistura no molde, (c) fechamento do molde (d) retirada das placas.

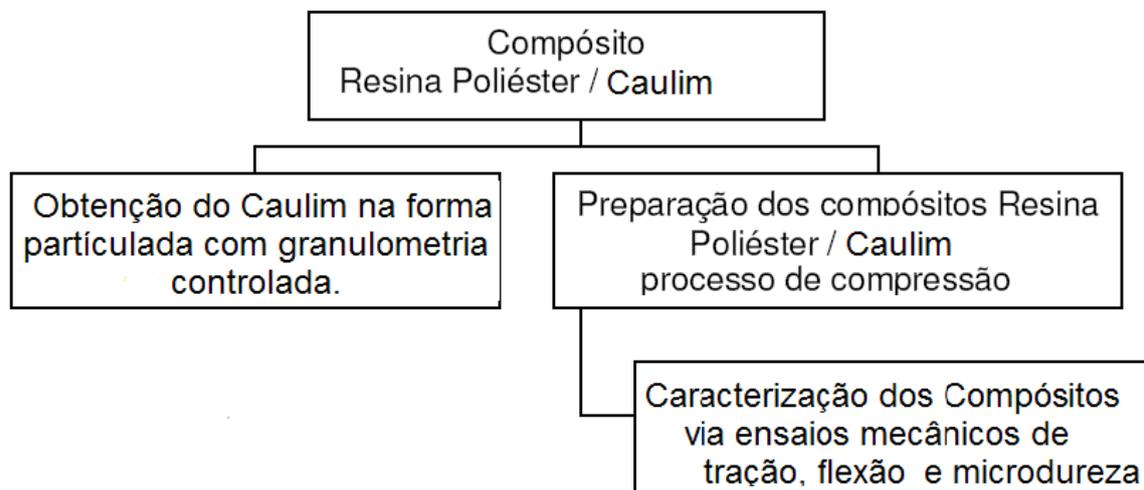
Com o procedimento descrito, observou-se a presença de muitas bolhas tanto na superfície quanto no interior das placas de 50 e de 60 % em após a cura, o que comprometeria as propriedades mecânicas dos compósitos. Diante deste problema, para que diminuíssem a presença de bolhas, repetiu-se todo o processo de preparação, a mistura ficou “descansando” por volta de 1 hora dentro do molde, antes de ir para o forno mufla, no intuito de diminuir a presença de bolhas de ar no compósito. A distribuição do caulim na matriz se deu de maneira uniforme nas placas de 10 a 40% é possível observar bolhas presentes nas placas de 50 e 60% em massa como mostra a Figura 3.

As placas mostradas na Figuras 3.4, obtidas foram submetidas a pós-cura por 48 horas a 50°C para posterior usinagem dos corpos-de-prova



**Figura 3.4:** Placas de 10 a 60 % em massa de caulim.

A Figura 3.5 apresenta fluxograma das atividades experimentais que foram realizadas com a resina termofixas e o caulim.



**Figura 3.5:** Etapas experimentais dos compósitos de Resina Poliéster com Caulim.

### 3.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

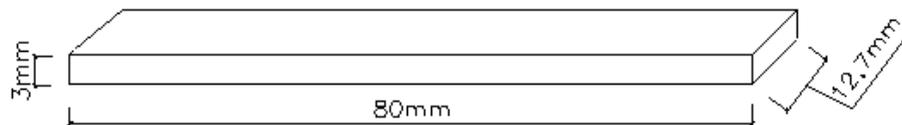
As placas foram cortadas manualmente com um arco de serra fixo 12", na forma de corpos-de-prova para os ensaios mecânicos de tração e flexão, sendo em

seguida lixados para regularização das superfícies. As lixas utilizadas para tal procedimento foram lixas d'água números 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 nos ensaios de tração e flexão podem ser vistas nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 respectivamente.



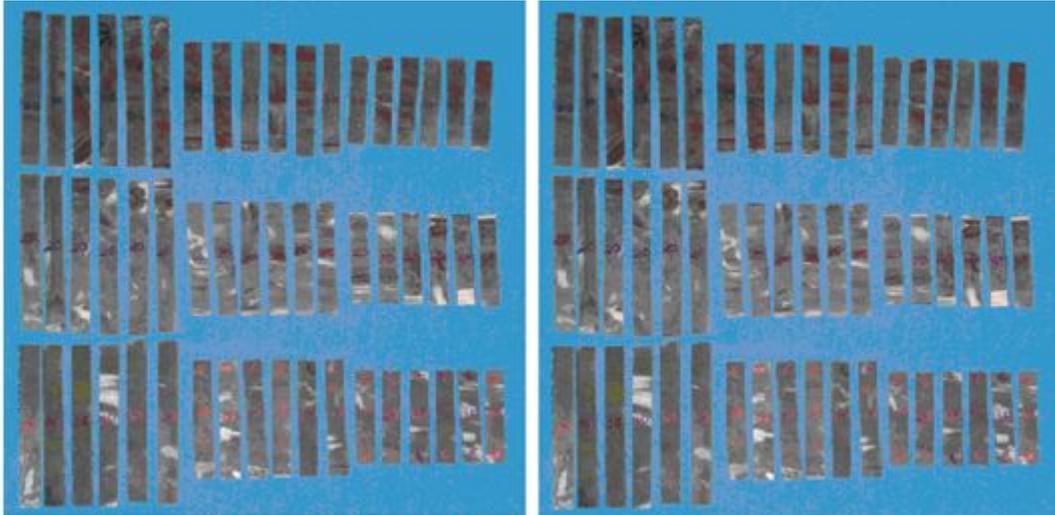
**Figura 3.6:** Corpo-de-prova para ensaio de tração.

As dimensões dos corpos-de-prova de tração recomendadas pela Norma ASTM D 3039 são de 110 x 12,7 x 3 mm.



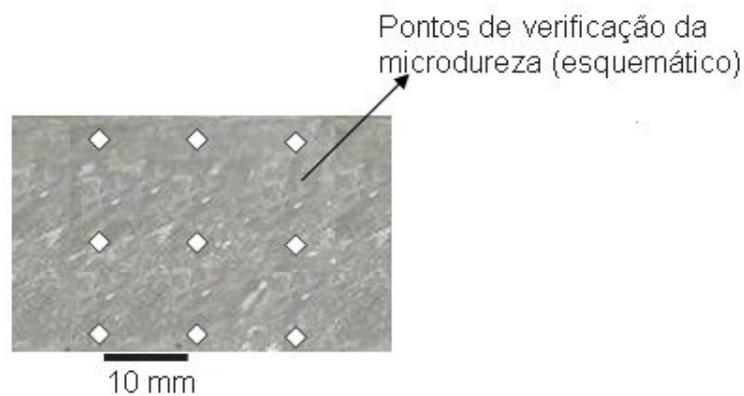
**Figura 3.7:** Corpo-de-prova para ensaio de flexão.

As dimensões dos corpos-de-prova de flexão recomendadas pela Norma ASTM D790<sup>[45]</sup> são de 12,7 x 80 x 3 mm.



**Figura 3.8:** Foto dos corpos de provas serrados manualmente.

Para determinação de ensaio da microdureza Vickers (HV), foram realizadas várias endentações em corpos de prova conforme mostra Figura 3.9. Os ensaios foram feitos segundo a norma ASTM C 1327 <sup>[47]</sup>.



**Figura 3.9:** Foto ilustrando o procedimento do ensaio de microdureza.

### 3.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

O Ensaio de Tração foi conduzido em uma máquina Universal Emic DL 20 KN, em temperatura ambiente com uma velocidade de 1 mm/min. tendo como base a Norma ASTM D 3039 <sup>[43]</sup>. Os ensaios de tração foram realizados para a determinação do módulo de elasticidade, limite de resistência e deformação na ruptura dos compósitos.

### 3.6. ENSAIO DE FLEXÃO

As propriedades mecânicas foram avaliadas, através de ensaios de flexão em três pontos. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal EMIC DL 20 KN, em temperatura ambiente, seguindo recomendações da Norma ASTM D 790 <sup>[45]</sup>. Os ensaios foram realizados para a determinação do módulo de elasticidade e limite de resistência dos compósitos. Foram utilizadas seis amostras para cada tipo de carga com dimensões nominais de 3 x 80 x 127 mm, aplicando-se uma velocidade de 1mm/min. e distância entre apoios de 33 mm.

### 3.7. ENSAIO DE MICRODUREZA

Ensaio de microdureza Vickers foi realizado com a finalidade de determinar a dureza do compósito em questão, foram utilizados 6 corpos de prova de cada amostra em forma de barra, utilizados no ensaio de tração. As endentações foram feitas em um microdurômetro digital Microhardness Tester MHV 2000 com penetrador tipo Vickers com carga 500 gf por 10 segundos. Foram realizadas três endentações separadas entre si por uma distância de 10 mm de uma extremidade a outra do perfil. Os ensaios foram feitos segundo a norma ASTM C 1327 <sup>[47]</sup>.

Cada impressão foi observada em microscópio e o valor da dureza dos materiais foi calculado através das medidas do comprimento das suas diagonais. Foram realizadas quatro leituras em cada amostra, obtendo-se uma média final para cada amostra.

### 3.8. PENEIRAMENTO DO REFORÇO

A amostra foi peneirada, através da série normal de peneira padronizada pela ABNT de acordo com a NBR – 7217 <sup>[46]</sup>; de modo que as partículas foram separadas no tamanho 325 mesh (44µm). O peneiramento ocorreu manualmente por se tratar de um pó muito fino.

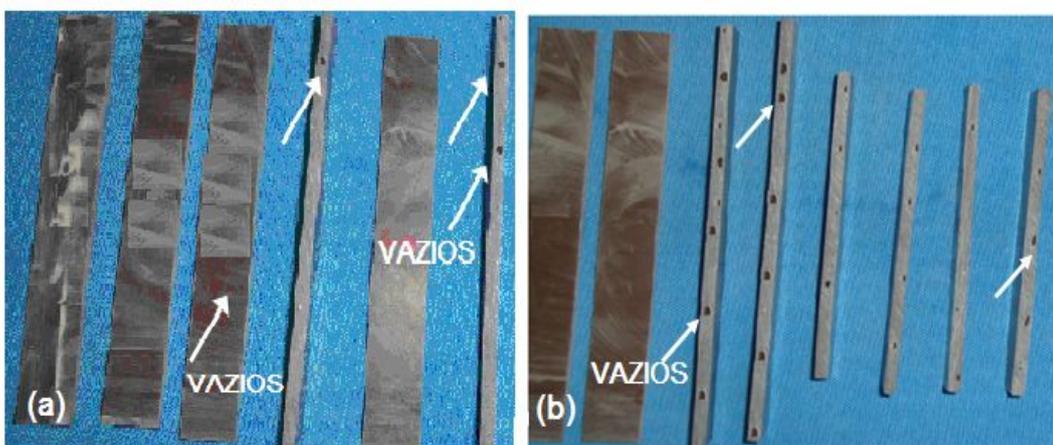
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

- 1) Confeção das placas;
- 2) Ensaio de tração;
- 3) Ensaio de flexão;
- 4) Ensaio Microdureza Vickers.

### 4.1. CONFECÇÃO DAS PLACAS

Ensaio preliminares mostraram a necessidade de se deixar a massa de 50 e 60% descansar por 1 hora, para a confecção das respectivas placas, devido à grande presença de bolhas nos compósitos. Mesmo com o procedimento de descansar a massa não foi possível eliminar totalmente as bolhas presentes nos corpos, conforme mostra a Figura 4.1. 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.



**Figura 4.1:** Corpos de provas para ensaios. (a) 50% em massa (b) 60% em massa  
(Detalhe dos microvazios no interior dos corpos de prova.)

Foi observada uma maior presença de vazios no interior dos corpos-de-prova, já na superfície praticamente não existe, figura 4.1. Isto ocorreu devido à grande concentração de partículas, que fez com que as bolhas existentes na mistura não se deslocassem até a superfície. Este fato foi observado após o corte das placas para a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios.

A placa confeccionada com 60% de caulim apresentou uma superfície mais áspera e observou-se certa dificuldade no escoamento da mistura no molde, devido ao maior percentual de caulim na mistura. Por se tratar de partículas muito pequenas o caulim também aumentou a viscosidade da resina, dificultando assim a retirada de bolhas de ar no compósito. A partir deste percentual observou-se que fica praticamente inviável tal mistura.

## 4.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração 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 tração ( $\sigma_U$ ) e deformação até a ruptura ( $\epsilon_{m\acute{a}x}$ ). Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração com os valores médios e os respectivos desvios padrão calculados de acordo com a norma ASTM D 3039 estão mostrados na Tabela 4.1. Os mesmos resultados estão apresentados graficamente nas Figuras 4.2 a 4.3.

Nos compósitos particulados de matriz polimérica o comportamento mecânico do material depende de fatores como a estrutura do monômero, a flexibilidade das cadeias, o peso molecular, a quantidade de ligações cruzadas, a cristalinidade, a orientação das cadeias, temperatura de uso e características das cargas como a forma e o tamanho das partículas, e a adesão superficial, etc <sup>[25]</sup>. A introdução de particulados inorgânicos rígidos em matrizes poliméricas é muito comumente acompanhada de uma redução na resistência mecânica do polímero, levando à produção de compósitos mecanicamente mais pobres que o polímero puro.

**Tabela 4.1:** Propriedades mecânicas dos compósitos obtidas em ensaio de tração

Carga	E (GPa)		$\sigma_U$ (MPa)		$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Sem carga	2,13	0,08	23,70	3,57	1,27	0,33
Caulim 10%	2,75	0,81	14,80	2,28	1,94	0,31
Caulim 20%	2,77	1,16	19,00	0,71	2,18	0,15
Caulim 30%	4,06	1,21	20,20	4,09	1,75	0,35
Caulim 40%	5,22	0,78	15,60	2,30	1,30	0,19
Caulim 50%	6,61	0,32	16,80	2,28	1,15	0,13
Caulim 60%	6,09	0,40	5,00	1,87	0,32	0,12

A incorporação de partículas rígidas numa matriz dúctil geralmente aumenta o módulo de elasticidade. Este fenômeno foi confirmado em todos os compósitos estudados. Observou-se que houve um melhor comportamento dos compósitos, comparativamente ao da resina pura. Na Figura 4.2 percebe-se que, o aumento no percentual de caulim ocasionou um aumento nos valores do módulo, obtendo-se o maior valor para o compósito com adição de 50% em massa (6,62 GPa). Neste caso, observa-se nitidamente que há aumento desta propriedade até um patamar. A partir deste ponto, percebe-se um pequeno decréscimo, quando se chega a um reforço de 60% em massa. Explica-se a queda do módulo uma maior formação de vazios presentes nestes corpos. Este decréscimo vem comprovar também a existência de um volume crítico de caulim que atuam como reforço. Para minimizar este efeito, pode-se tentar reduzir a quantidade de bolhas no interior dos corpos, objetivando melhorar a transferência de tensão na região interfacial caulim-matriz.

Ao contrário do módulo, onde os valores aumentaram com o aumento no percentual de caulim, a deformação diminuiu com o aumento no percentual em massa (Figura 4.2). Apesar do caulim ser uma carga de reforço, esta redução de deformação na ruptura com o aumento do percentual de carga influenciou de forma negativa a resistência a tração, que não aumentou com o aumento da fração de massa (Figura 4.3).

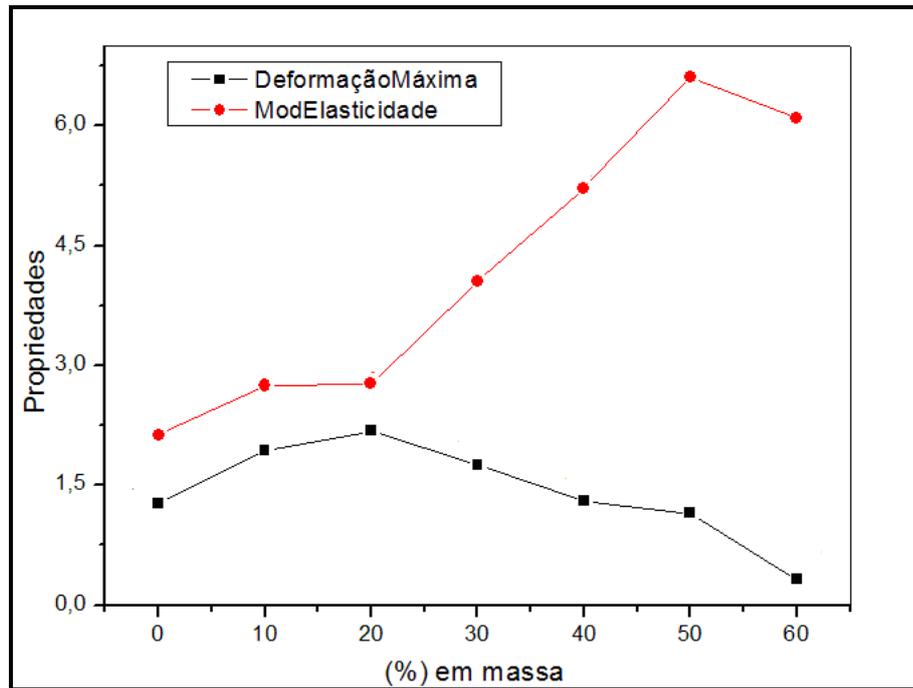


Figura 4.2: Gráficos Propriedades x (% em massa) para o ensaio de tração.

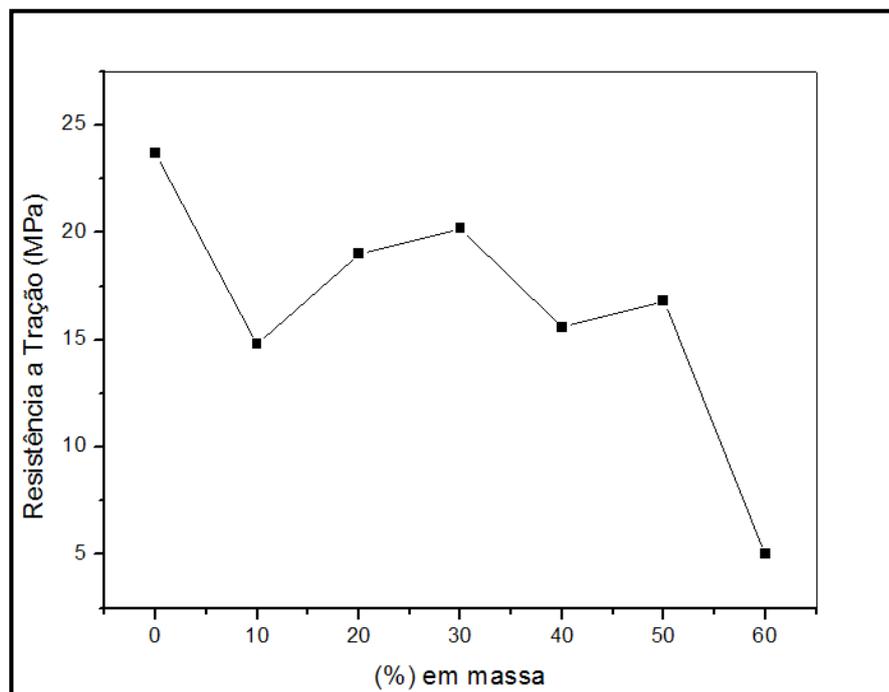


Figura 4.3: Gráfico resistência x (% em massa) para o ensaio de tração.

Em relação à resistência à tração, pode-se dizer que esta propriedade depende da forma das partículas e da adesão interfacial. Se o material compósito apresentar uma boa interface matriz–reforço, a resistência à tração do material aumenta com o conteúdo de reforço. Contudo, se o contato ou a união interfacial entre ambos for frágil, a resistência à tração pode ser inclusive inferior à da matriz sem reforço [44].

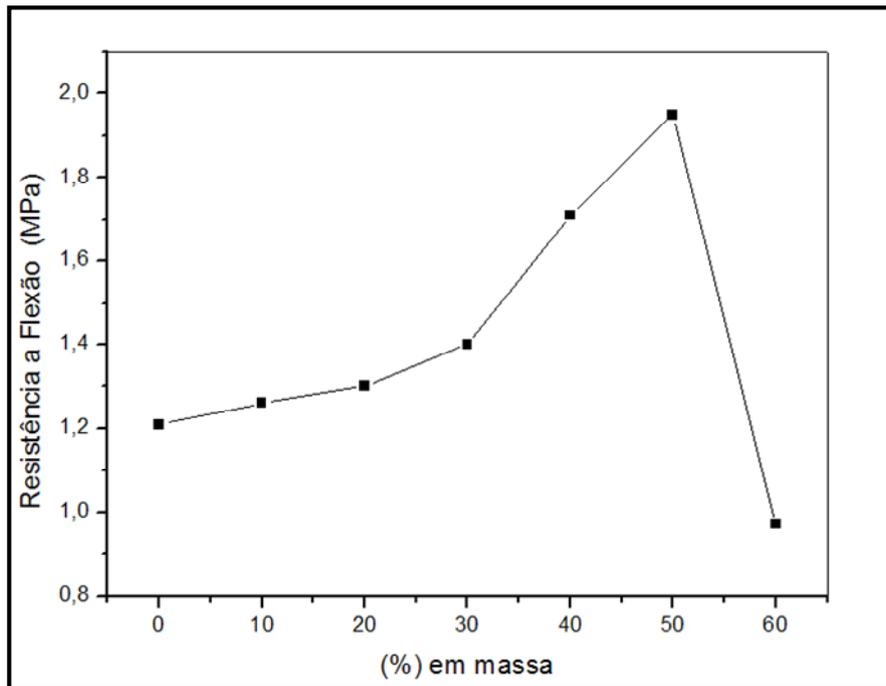
Os resultados dos testes mecânicos mostraram que, os compósitos obtiveram valores inferiores de resistência a tração quando comparados a matriz pura (23,70 MPa), evidenciando que a adição de caulim não produziu resultados significativos em relação à capacidade de reforço. Observa-se que com a adição de caulim na matriz polimérica a forma da curva se altera (Figura 4.3).

#### 4.3. ENSAIOS DE FLEXÃO

No ensaio de flexão as propriedades de interesse são a resistência à flexão e o módulo de elasticidade em flexão. Os resultados obtidos os valores médios e os respectivos desvios padrão calculados de acordo com a norma ASTM D 790 estão mostrados na Tabela 4.2. Os mesmos resultados estão apresentados graficamente nas Figuras 4.4 a 4.5.

**Tabela 4.2:** Resistência à flexão e módulo de flexão (E) do compósito obtido por ensaios de flexão em 3 pontos.

Carga	E (MPa)		$\sigma_U$ (MPa)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Sem carga	36,84	4,73	1,21	0,18
Caulim 10%	80,29	6,28	1,26	0,19
Caulim 20%	84,03	13,56	1,30	0,27
Caulim 30%	85,68	8,37	1,40	0,33
Caulim 40%	149,90	47,44	1,71	0,48
Caulim 50%	157,70	12,65	1,95	0,28
Caulim 60%	155,90	61,77	0,97	0,34

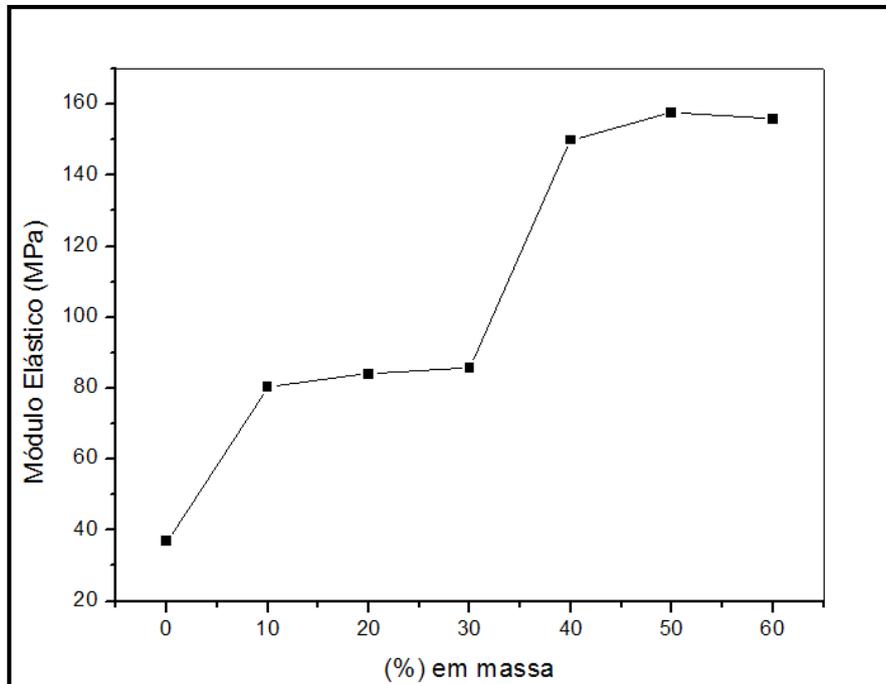


**Figura 4.4:** Gráfico Resistência a Flexão x (% em massa).

No caso da resistência a flexão, observou-se que houve um aumento dessa propriedade com a adição da carga, (Figura 4.4) em relação à resina pura. O compósito reforçado com 60% em massa de caulim teve uma redução no limite de resistência, chegando a 0,97 MPa, sendo um valor aproximado da resina pura (1,21MPa). Os microvazios presentes nas placas podem agir como concentradores de tensões reduzindo as propriedades mecânicas dos compósitos <sup>[24]</sup>. 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 <sup>[9]</sup>. Entretanto, as partículas também podem atuar como agentes nucleadores de trincas e assim contribuir para a redução da resistência mecânica dos compósitos <sup>[23]</sup>.

Observou-se também que os valores de módulo dos compósitos, aumentaram com o aumento no percentual adicionado, chegando a 80,29 MPa para o percentual de 10% e 155,90 MPa para percentual de 50%. Se comparados com os valores da resina pura, o aumento no módulo chegou a 117,94% para os compósitos com 10% em massa de caulim e 323,18% para os compósitos com 50% (Figura 4.5). Os compósitos confeccionados com 60% apresentaram uma redução

no modulo. Este resultado já era esperado, uma vez que este compósito com este percentual apresentou maior quantidade de vazios.



**Figura 4.5:** Gráfico Módulo Elasticidade a Flexão x (%) em massa.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos de flexão permitem sugerir que a adição de caulim na forma de um particulado fino altera a rigidez dos materiais em relação ao polímero puro, mas não reduzem a resistência mecânica. Assim sendo, a incorporação de caulim a polímeros, ao mesmo tempo em que não deteriora as propriedades do polímero-base, se mostra interessante pelo baixo custo.

#### 4.4. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

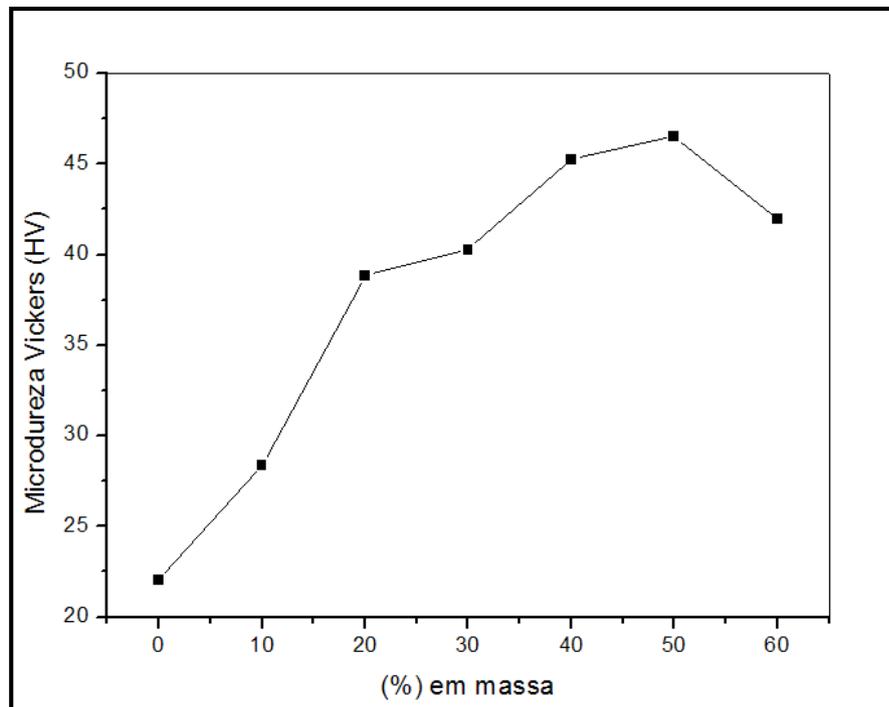
Por definição, dureza é a capacidade de um material resistir à penetração por ponta dura, sendo diretamente proporcional à resistência mecânica e à resistência ao desgaste de um material. A Tabela 4.3 mostra a média e o desvio padrão dos parâmetros obtidos para as diagonais das indentações das amostras em consideração. Na análise de microdureza foi utilizado uma carga de 500 gf sob um

tempo de aplicação de 10 segundos. Os mesmos resultados estão apresentados graficamente na Figura 4.6.

**Tabela 4.3:** Resultados do Ensaio microdureza Vickers

Compósitos	Microdureza Vickers (HV)	Desv. Padrão	Carga aplicada em gf
Sem carga	22,02	0,82	500
Sem carga	28,35	5,33	500
Caulim 20%	38,85	7,47	500
Caulim 30%	40,27	11,31	500
Caulim 40%	45,25	4,20	500
Caulim 50%	46,52	2,64	500
Caulim 60%	41,97	9,43	500

De uma forma geral, observa-se que a dureza tem uma relação direta com a quantidade de caulim adicionada à matriz, ou seja, quanto maior a quantidade de caulim, maior a dureza até o limite de 50% em caulim (46,52 HV), acima de 60% em caulim, verificou-se uma pequena diminuição na resistência mecânica, conforme mostra a Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Valores de Microdureza Vickers (HV).

Nota se que houve um aumento significativo em relação à resina pura. Porém, elevadas durezas implicam em boa resistência ao risco e desgaste, entretanto acarretam maior dificuldade de usinagem. Materiais que apresentam menores valores de dureza seriam mais indicados para aplicações biomédicas.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou os efeitos da adição de caulim nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster, comparando-os com as propriedades da resina pura. Os resultados demonstram que em relação aos ensaios mecânicos de tração todos os percentuais de carga de caulim utilizadas na confecção dos compósitos provocaram uma diminuição do limite de resistência e um aumento significativo na rigidez do material. Ao contrário do módulo elástico, onde os valores aumentaram com o aumento no percentual de caulim, a deformação diminuiu com o aumento no percentual.

Em relação aos ensaios mecânicos de flexão e de Microdureza, observou-se um significativo aumento das propriedades com a adição da carga.

Acima de 50% em massa, verificou-se uma pequena diminuição na resistência mecânica devido à grande presença de bolhas e mostrando que há existência de um volume crítico de caulim que atuam como reforço no compósito. De modo geral o percentual de 50% de carga apresentou um melhor desempenho do compósito.

Em relação ao processo de confecção das placas de compósitos: o descanso da massa foi necessário, pois a presença de bolhas no interior dos compósitos foi muito grande sem este processo. A interface assume um importante papel nas propriedades mecânicas do compósito, de modo que uma boa adesão resulta em boas propriedades mecânicas. Caso não haja boa adesão interfacial, surgirão vazios nessa região, provocando fragilização do compósito.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Realizar um estudo nas propriedades mecânicas e microestrutural do compósito poliéster/caulim, através da análise de diferentes granulometrias;
- Desenvolver compósitos híbridos, isto é, compósitos reforçados simultaneamente com caulim e outro material cerâmico ou ainda reforço vegetal;
- Análise da contração de polimerização após adição de caulim na matriz polimérica.

## REFERÊNCIAS

- [1] LUZ, A. B., 1998, Estudos de Reoxidação e Redução de Ferro contido em Caulins, Dissertação de Doutorado em Engenharia Mineral, Tese de D. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, Brasil.
- [2] KATZ, H. S.; Milewski, J. V.; Handbook of Fillers for Plastics, Van Nostrand Reinhold: New York, 1987, p. 29.
- [3] ASTROM, T. B. Manufacturing of Polymer Composites 1st Ed. Chapman & Hall, London, 1997.
- [4] PASSOS, P. R. A. Destinação sustentável de cascas de coco (cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas. 2005, 169p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [5] BUDINSKI, K, G.: Engineering Materials: properties and selection. Prentice Hall International., 5ed, 1996. 653p. New Jersey.
- [6] RABELLO, M. Aditivação de Polímeros, Ed. Artliber, SP, 2000.
- [7] PUKANSZKY, B. Particulate filled Polypropylene: structure and properties. In. Polypropylene: Structure, Blends and Composites, Vol 3: Composites. Edited by J. Karger-Kocsis, Germany, 392 p. 1994
- [8] SILVA, L. A. Caracterização Tecnológica e Beneficiamento de Caulins da Região de Pantano Grande – RS, Dissertação (mestrado) – UFRGS, Escola de Engenharia, PPGEM, RS, 2000.
- [9] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução; LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 5ª Edição, RJ, 2002.
- [10] CHAWLA, K. K., “Composite Materials: Science and Engineering”, 1st Ed. New York, Springer-Verlag, 1987.
- [11] MENDONÇA, P.T.R. Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise. Barueri, SP: Manole, 2005.
- [12] FERRANTE, M. Seleção de materiais. 2ª ed. 2002. Ed. Edufscar

- [13] MANO, E. B. Polímeros como Materiais de Engenharia. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] DANIEL, I. M., ISHAI, O., Engineering mechanics of composite materials. New York, USA: Oxford University Press, 1994.
- [17] ZHU, W. H. Utilisation of banana fibre in composite materials. Dissertation (Master Thesis). Victoria University of Technology, Melbourne, 1993.
- [18] CHAWLA, K.K, Composite Materials – Science and Engineering, 2nd Ed., Springer, 1998.
- [19] ORÉFICE, R. L., HENCH, L. e BRENNAN, A. B., 2001, “Effect of Particle Morphology on the Mechanical and Thermo-Mechanical Behavior of Polymer Composites”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, v. XXIII, n.1, p.1-8.
- [20] HOLLAWAY, L. (1993). Polymer composites for civil and structural engineering. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Wester Cleddens Road, Bishopbriggs, Glasgow G64 2 NZ.
- [21] <[www.azom.com/details.asp](http://www.azom.com/details.asp)> Acesso em:18 de maio 2010.
- [22] SOUSA, J.A.; HAGE, JR.E. (2005). Compósitos Termoplásticos. Engenharia de Materiais – DEMa, UFSCar, São Carlos - SP.
- [23] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1999. 247p.

- [24] GREGORY et al, "Physical properties and repair bond strength of direct and indirect composites resins". JPD, v.68, n.3, pp 406-411, Set. 1992.
- [25] BOTELHO, E. C. ; figiel, L. ; rezende, M.c. ;Lauke, B.. Mechaniccal behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites. In : Composites science and Technology 63, pp. 1843-1855, 2003.
- [26] GORNI, A. A. A evolução dos materiais poliméricos ao longo do tempo. Revista plástica industrial, 2003. Disponível em: <[http://www.gorni.eng.br/his t\\_pol.html](http://www.gorni.eng.br/his_t_pol.html)>. Acesso em: 20 de maio 2010.
- [27] MILES, D. C e BRISTON, J. H. Tecnologia dos polímeros. Editora da Universidade de São Paulo, p. 80- 81, 1975.
- [28] MUSEU DO PLÁSTICO. Resinas. Disponível em: <[http://www.san dretto.it /museumuseo/PORTOGHESE/bplast.html](http://www.san_dretto.it/museumuseo/PORTOGHESE/bplast.html)> Acesso em: 20 de maio. 2010.
- [29] MANO, E. B. Introdução a polímeros. Edigard Blucher, 2ª ed., São Paulo, 1986.
- [30] BARRA, B. Compósitos Poliméricos EMC 5706. Disponível em: <[http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5706/ORIGINAIS/COMP\\_SITOS.DOC](http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5706/ORIGINAIS/COMP_SITOS.DOC)>. Acesso em: 21 de maio. 2010.
- [31] KELLY, A.; ZWEBEN C. Comprehensive Composite Materials. Elsevier, Oxford, 1ª ed, vol. 1, cap. 6, 2002.
- [32] Cargas Minerais. Disponível em:<<http://www.comercialfiberglass.com.br>>. Acesso em: 21 de maio 2010.
- [33] 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, nº 5, p. 339- 348, 2004.
- [34] 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.

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

[36] 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: 23 de maio. 2010.

[37] 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.

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

[39] 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.

[40] < [WWW.DNPM.GOV.BR/ASSETS/GALERIADOCUMENTO/.../CAULIM.PDF](http://WWW.DNPM.GOV.BR/ASSETS/GALERIADOCUMENTO/.../CAULIM.PDF) > Acesso em: 21 de maio. 2010.

[41] < [WWW.K2SISTEMAS.COM.BR/ESTRATIGRAFIAQUIMICA/ARTIGOS/.../NOGUEIRA\\_GOMES.PDF](http://WWW.K2SISTEMAS.COM.BR/ESTRATIGRAFIAQUIMICA/ARTIGOS/.../NOGUEIRA_GOMES.PDF) >. Acesso em: 21 de maio. 2010.

[42] MÁRTIRES, R. A. C. (2006) Sumário Mineral Brasileiro 2006 – Caulim. DNPM/MME,p33-34.Pesquisa efetuada no endereço: [http://www.dnmpm.gov.br/mostra\\_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=1006](http://www.dnmpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=1006).

[43] ASTM-D3039/D3039M 13. Standard Test Method for Tensile Properties of Método padrão de teste para Propriedades de Tração de Polymer Matrix Composite Materials, Annual Polymer Matrix Composite Materials, anual B Book of ASTM Standards,ook de Normas ASTM, 1995. 1995.

[44] NAVAS, E. M.R. Materiales Compuestos de Matriz de Alumínio Reforzados com Carbuos. Opmización del Processo via Aleación Mecánica. Tesis Doctoral.

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Espanha, 1999

[45] American Society for Testing and Materials. (2003). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D790-03.

[46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ago. 1987.

[47] ASTM, Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics, C 1327-99, v.14, p.3.1999.