

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DO COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA:
UM ESTUDO COMPARATIVO**

GUTEMBERGUE DA SILVA ARRUDA

**Campina Grande - PB
Março de 1994.**

GUTEMBERGUE DA SILVA ARRUDA

**DESENVOLVIMENTO DO COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA:
UM ESTUDO COMPARATIVO**

**Dissertação apresentada ao
Curso de Mestrado em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento
às exigências de obtenção
do grau de Mestre.**

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Projeto de Produto Mecânico

**Dra. LAURA HECKER DE CARVALHO
D.Sc. MARCO ANTONIO DOS SANTOS
Orientadores**

**Campina Grande - PB
Março de 1994.**



A475d Arruda, Gutembergue da Silva.
Desenvolvimento do compósito poliéster/juta : um estudo comparativo / Gutembergue da Silva Arruda. - Campina Grande, 1994.
74 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1994.
"Orientação : Profa. Dra. Laura Hecker de Carvalho, Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos".
Referências.

1. Compósitos à Base de Poliéster. 2. Juta - Compósito à Base de Poliéster. 3. Juta. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Carvalho, Laura Hecker de. II. Santos, Marco Antonio dos. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 678.7(043)

DESENVOLVIMENTO DO COMPOSITO POLIÉSTER/JUTA:
UM ESTUDO COMPARATIVO

GUTEMBERGUE DA SILVA ARRUDA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 16, 03, 94
.....



Dra. LAURA HECKER DE CARVALHO

Orientadora



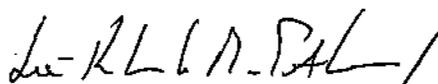
D.Sc. MARCO ANTONIO DOS SANTOS

Orientador



Dr. THEOPHILO M. MACIEL

Membro



Dr. JOSÉ ROBERTO MORAIS D'ALMEIDA

Membro

Campina Grande - PB

Março de 1994.

DEDICATÓRIA

A meus tios

**Lourival Bandeira Xavier
Carmen de Arruda Xavier**

A minha mãe

Vilma da Silva Arruda

A meus irmãos

**Valdenoura, Valdelourdes,
Sônia, Aglair e Stefson**

Dedico este Trabalho.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela sua bondade, justiça e sabedoria e por permitir, durante a realização deste curso, que fossem superadas todas as adversidades com as quais deparamos.

A FUCAPI, Instituição financiadora deste trabalho de pesquisa, e, em especial à Dra. Isa Assef dos Santos, pelo apoio em todos os momentos.

Aos professores Dra. Laura Hecker de Carvalho e D.Sc. Marco Antonio dos Santos, pela valiosa orientação, estímulo, simpatia e amizade recebidos durante a preparação desta dissertação.

Ao Coordenador do Curso de Pós-graduação Professor Dr. Natanael Victor de Oliveira e a Marcia Quirino pelo incentivo e apoio.

A UFPB/CCT/CPGEM/DEAG por tornar possível a realização deste curso.

Aos professores e funcionários do Depto de Engenharia Mecânica, pelo apoio e atenção.

A Filomena Geruza Santana, pela amizade e apoio constante e irrestrito em todos os momentos.

Ao amigo e colaborador Jean Carlos de Brito Manguiera, pelas horas dedicadas a confecção dos corpos de prova e ensaios, sem os quais esse trabalho não seria realizado.

Aos amigos Engo. João Nery Rodrigues Filho e Profa. Janseléia Picanço de Farias pelo apoio, atenção e amizade, em todos os momentos.

Aos amigos Jaqueline, Neilor, Cesarino, Claudio, Benedito e João Ricardo pelo apoio e amizade.

A minha irmã Valdelourdes Arruda Medeiro e a meus tios Lourival Bandeira Xavier e Carmen de Arruda Xavier, que tornaram possível minha graduação.

Aos queridos primos Lourineide, Anita, Archelau, Carlos Eduardo, Aroldo, Silvia, Marlene e Margareth.

Por tudo,

Muito Obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos a base de poliéster utilizando juta como reforço.

Foram investigados os efeitos de diferentes formas de tratamentos do reforço nas propriedades mecânicas estáticas destes compósitos. Os resultados indicam que tratamentos a base de hipoclorito de sódio, em geral, causaram um empobrecimento nas propriedades dos compósitos, o que foi atribuído a uma possível degradação da fibra. O tratamento com agente de acoplamento silano não foi eficiente, o que pode ser atribuído a uma incompatibilidade entre fibra/agente silano ou a não reação do silano com os grupos hidroxila do reforço celulósico.

ABSTRACT

In the present work a polyester based composite with juta reinforcement was developed.

The effects of different methods of reinforcement treatment on the composites' statical mechanical properties were investigated.

The results showed that sodium hypochlorite treatment, in general, caused a decrease on the composites' properties, possibly due to fiber degradation. Silane coupling wasn't efficient, which could be attributed to an incompatibility between fiber/silane agent or the nonreaction of the silane with hydroxyl groups of the celulosic reinforcement.

RELAÇÃO DE ANEXOS

- Anexo 1 - Memória de cálculos das frações volumétricas do reforço.
- Anexo 2 - Curvas representativas de tração e flexão originais de alguns corpos de prova, com cálculo do módulo de elasticidade em GPa.

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1 - Interação de um líquido com um substrato através do molhamento.....	12
Figura 2 - Representação do uso de agente de acoplagem em compósitos.....	12
Figura 3 - Tipos de fase. a)Esférica, c)Plaquetas, c)Fibrosas.....	14
Figura 4 - Grupos reativos na forma de duplas ligações: ácido maleico, anídrico maleico e o anidrido ftálico.....	16
Figura 5 - Reação de esterificação com liberação de água.....	17
Figura 6 - Reação de polimerização de resina insaturada iniciando com o monômero estireno.....	17
Figura 7 - Estruturas tridimensionais duroplásticas.....	18
Figura 8 - Temperatura máxima alcançada variando para cada tipo de resina numa reação exotérmica.....	18
Figura 9 - Tempos de cura da resina para o acelerador de cobalto e para o acelerador DMA.....	19
Figura 10- Transformações exotérmicas.....	24
Figura 11- Aplicação a pistola.....	27
Figura 12- Moldagem sob pressão.....	28
Figura 13- Injeção central, sucção periférica.....	29
Figura 14- Injeção unilateral, sucção unilateral.....	29
Figura 15- Injeção periférica, sucção central.....	29

Figura 16- Moldagem por prensagem.....	30
Figura 17- Moldagem por bobinagem.....	30
Figura 18- Moldagem por centrifugação.....	31
Figura 19- Molde dos corpos de provas, em PVC-ASTM D-638.....	40
Figura 20- Molde das placas do compósito, em PVC.....	44
Figura 21- a) Pincelamento da resina; b) Colocação do reforço; c)Pincelamento de resina adicional e fechamento do molde; d)Colocação do peso de 50N, impondo ao molde uma pressão de moldagem de 4.167 Pa.....	45
Figura 22- Disco de corte.....	46
Figura 23- Lâmpadas do compósito.....	46
Figura 24- Esmerilamento das lâminas.....	46
Figura 25- Corpos de prova sem acabamento.....	47
Figura 26- Torno de bancada.....	47
Figura 27- Corpos de prova acabados.....	47
Figura 28- Máquina Universal de ensaio.....	48
Figura 29- Defeitos nas bordas dos corpos de prova.....	51
Figura 30- Módulo de elasticidade em tração do compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço/tratamento usado.....	64
Figura 31- Tensão de fratura do compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço/ tratamento usado.....	65

Figura 32- Módulo de elasticidade em flexão do Compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço/tratamento usado.....6

Figura 33- Resistência à flexão do compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço/tratamento usado.....6

|

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1-	Características e propriedades da juta	15
Tabela 2-	Fator de desmoldagem em função dos aditivos: (Catalizadores e aceleradores).....	26
Tabela 3-	Estudos econômicos e comparativos das fibras.....	36
Tabela 4-	Identificação das placas do compósito Poliéster/ Juta : Características principais	52
Tabela 5-	Módulo de elasticidade em tração, resistência à tração na fratura e elongação de fratura do compósito Poliéster/Juta versus tipos de reforços/tratamento usado.....	56
Tabela 6-	Propriedades mecânicas específicas do compósito Poliéster/Juta versus tipo de reforço/tratamento usado.....	61
Tabela 7-	Propriedades mecânicas em flexão do compósito Poliéster/Juta versus tipo de reforço / tratamento usado	62
Tabela 8-	Estudos econômicos e comparativo dos compósitos.....	63

SUMÁRIO

RESUMO

I. INTRODUÇÃO	1
II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
II.1 - HISTÓRICO	4
II.2 - DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIA	5
II.3 - TIPOS DE COMPÓSITOS	7
II.4 - CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DOS COMPÓSITOS	9
II.5 - PROPRIEDADES DA INTERFACE	9
II.6 - VARIÁVEIS ESTRUTURAIS E DE COMPOSIÇÃO	13
II.7 - A JUTA (Simbologia ABNT : CJ)	14
II.8 - A RESINA POLIÉSTER	15
II.8.1 - A RESINA POLIÉSTER INSATURADA	16
II.8.2 - TIPOS DE RESINAS E SUAS RESISTÊNCIAS QUÍMICAS E FÍSICAS.	19
II.9 - CATALIZADORES	21
II.10 - CURA DA RESINA POLIÉSTER	22
II.11 - SEGURANÇA E MANUSEIO DE PERÓXIDOS ORGÂNICOS	23
II.12 - POLIMERIZAÇÃO	23
II.13 - DESMOLDANTE	25
II.14 - MÉTODOS DE MOLDAGEM DE RESINAS TERMOFIXAS REFORÇADAS COM FIBRAS	26
II.14.1 - MOLDAGEM MANUAL	26
II.14.2 - APLICAÇÃO A PISTOLA	27
II.14.3 - MOLDAGEM A VÁCUO	27
II.14.4 - MOLDAGEM SOB PRESSÃO	28
II.14.5 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO A VÁCUO	28
II.14.6 - MOLDAGEM POR PRENSAGEM	30
II.14.7 - MOLDAGEM POR BOBINAGEM (filament winding)	30
II.14.8 - MOLDAGEM POR CENTRIFUGAÇÃO	31
II.14.9 - MOLDAGEM CONTÍNUA	31
II.14.10 - CONSTRUÇÃO MISTA	31

IV. MATERIAIS E MÉTODOS	37
IV.1 - MATERIAIS	37
IV.2 - MÉTODOS	39
IV.2.1 - CORPO DE PROVA REFORÇADO COM AS FIBRAS DE JUTA	39
IV.2.2 - LAMINADOS DE POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	40
V - RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
V.1 - COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS E DESENVOLVIMENTO	49
V.2 - COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA - PROPRIEDADES MECÂNICAS.	53
V.2.1 - REFORÇO NÃO TRATADO - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO.	53
V.2.2 - REFORÇO TRATADO - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO	57
CONCLUSÕES	68
SUGESTÕES	70
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	71
ANEXOS	74

I. INTRODUÇÃO

A necessidade de alimentação, moradia, vestimentas, veículos de transportes, armas, etc., fez com que o Ser Humano recorresse aos mais diferentes tipos de materiais ao longo de sua existência. Inicialmente foram utilizados os materiais disponíveis até então como: ossos, madeira, pedra, barro etc.

O processo de seleção de materiais para determinadas aplicações envolve um compromisso entre as propriedades desejadas e as características específicas dos materiais disponíveis. À medida que as aplicações tornam-se mais sofisticadas, fica progressivamente mais difícil um único material satisfazer a todas as expectativas. Este dilema tem obrigado o Homem a utilizar sua criatividade e inteligência para desenvolver novas tecnologias e novos materiais. Entre as soluções encontradas destacam-se além das modificações térmicas e/ou químicas para obtenção de materiais sintéticos, o desenvolvimento de materiais híbridos (ou conjugados) onde combina-se materiais com propriedades distintas para produzir outro com as propriedades específicas desejadas.

A conjugação dos materiais, em sua maior parte, teve como meta aplicações estruturais. Neste contexto a resistência mecânica tornou-se um dos principais requisitos para a utilização dos materiais conjugados, HAGE (1).

Os materiais conjugados, que são formados pela incorporação de um reforço em uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica, vêm tendo emprego crescente nos mais diversos campos de aplicação industrial, D'ALMEIDA (2). O Homem vem utilizando estes materiais há séculos. Assim, destacam-se a incorporação de palha na fabricação de tijolos, MILES e BRISTON (3); feixes de papiro em betume na fabricação de barcos, RICHARDSON (4); o desenvolvimento do concreto armado, de polímeros reforçados com tecido de fibra de vidro, DEANIN (5), e fibras de alto desempenho como as de carbono (1950), boro (1965), aramida (1971) e fibras híbridas (1980). Um exemplo mais atual é o caso da Honda, do Japão, que desenvolveu ligas de alumínio fundido pré-moldadas e reforçadas com partículas cerâmicas. Com a utilização do pré-moldado de cerâmica nas regiões dos furos dos cilindros do bloco do motor de liga de alumínio do PRELUDE Si 1991, a Honda eliminou a necessidade de camisas de ferro fundido, aumentando a capacidade do motor. Outro exemplo, é o processo do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - Brasil, capaz de reduzir em dez vezes o custo da liga metálica, através de um compósito de alumínio (matriz) /carbetto de silício (carga), utilizado em pedais de bicicleta e em cilindros, conjugando também, leveza e alta resistência, BARREIRA (6).

Evoluções tecnológicas viabilizaram o emprego de plásticos reforçados em lugar de peças metálicas. Em muitos casos, esta solução não só é a melhor, mas a única possível levando-se em conta fatores como custo, durabilidade, desempenho e leveza.

A utilização de plásticos reforçados no lugar de peças metálicas reduz de maneira significativa os investimentos em equipamentos e instalações, além de poderem ser empregados em processos de alta produtividade, possibilitando sua participação, também, na indústria automobilística.

Comparado com o aço em processos de alta produtividade, pode-se concluir que a utilização do plástico reforçado traz reduções no investimento e no tempo da ordem de 75%, pelo menor custo de produção de componentes, menor custo de montagem e menor custo de entrada no mercado, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

A redução do custo de montagem advém da possibilidade de moldar geometrias complexas em uma única operação, o que, além da redução do ferramental necessário, traz vantagens de menor número de peças por componentes.

Pode-se ilustrar tais afirmativas com o seguinte exemplo prático: na produção de uma porta de automóvel em aço, seriam necessárias 21 partes incluindo as nervuras. A mesma reprojetada para plástico reforçado, seria composta de apenas 8 partes, o que acarreta uma redução de 64% no número de partes e, conseqüentemente a mesma redução de ferramentas necessárias, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

A economia de energia também é um fator relevante, uma vez que para a produção de um mesmo peso de componente em plástico reforçado, a energia consumida é apenas 10% da necessária se o material utilizado for o aço, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Quanto às aplicações do plástico reforçado, pode-se afirmar que ele participa de todos os campos do desenvolvimento tecnológico e industrial. Ele está presente na construção civil, pela sua resistência aos efeitos das condições ambientais adversas, pela facilidade de moldar geometrias complexas dando maior liberdade e criatividade ao arquiteto; na indústria química, com a possibilidade de formular o plástico reforçado com boa resistência química e excelente desempenho estrutural em tubulações, tanques e reservatórios resistentes à corrosão, durabilidade, resistência mecânica e baixo custo de instalação; indústria automobilística, onde projetos avançados já falam inclusive do automóvel totalmente feito de plástico; em eletrodomésticos; na indústria aeronáutica - hoje é impossível acompanhar o desenvolvimento da indústria aeronáutica moderna sem o domínio da tecnologia do plástico reforçado; e em outros segmentos também de

grande participação: indústria eletroeletrônica, naval, bélica, agrícola e em um sem número de outros segmentos, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Graças à grande abrangência das propriedades do plástico reforçado, pode-se afirmar que: "para cada projeto sempre existirá uma formulação do plástico reforçado, compatibilizando um bom desempenho com um custo adequado", CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Um dos problemas encontrados na utilização de plásticos reforçados por fibras de alto desempenho (carbono, kevlar, vidro, boro) é o alto custo do material final. Além disto, as propriedades destes materiais são seguidamente sub-utilizadas. Neste sentido, esforços têm sido feitos no que se refere ao uso de fibras naturais (fontes abundantes e renováveis de matéria-prima e de baixo custo) como elemento de reforço em plásticos, D'ALMEIDA (2).

As fibras naturais devido às suas boas características de resistência e módulo têm despertado grande interesse de pesquisadores no mundo inteiro. Algumas delas como a juta, que aparece como um material promissor pela sua abundância e baixo custo, tem mais alta resistência e módulo que os plásticos, por isso é que se pensou usá-la em uma área de atuação adicional, SHAH e LAKKAD (8).

No presente trabalho, a escolha da juta como material de reforço do compósito, deve-se ao fato de sua abundância na região norte do país. Tendo em vista tal fato, procura-se aqui verificar a viabilidade técnica e econômica desta fibra natural como reforço dos materiais poliméricos. Alternativamente, comungando com a necessidade de desenvolvimento de uma tecnologia regional, visando o aproveitamento da mão-de-obra local e abrindo novas alternativas de produto sem perder de vista a relação custo/aplicação industrial, gerando receita para a região.

II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1 - HISTÓRICO

O emprego dos materiais plásticos reforçados com outros materiais não é recente. As chapas conhecidas pelo nome comercial de fórmica vêm sendo empregadas desde o início do século e se enquadram, a rigor, nessa categoria, BLASS (9).

A evolução da tecnologia viabilizou o emprego dos plásticos reforçados (compósitos) em processos de alta produtividade, conservando as vantagens econômicas e possibilitando sua participação nos diversos campos industriais .

O grande número de materiais que podem ser usados como matriz ou reforço torna os compósitos extremamente atraentes do ponto de vista do projeto, já que permitem a obtenção de propriedades não disponíveis nos materiais convencionais, mediante uma combinação adequada da matriz com o seu reforço. Há algumas décadas tem sido dada grande importância aos compósitos de matriz polimérica, e isso se deve à facilidade de se trabalhar com plásticos, sem perder de vista as propriedades que esses materiais oferecem. No entanto, não é menor a importância que se tem dado aos elementos de reforço. Muitas pesquisas envolvendo fibras sintéticas e naturais estão sendo desenvolvidas com o objetivo de se encontrar o reforço mais adequado, com viabilidade econômica.

Em se tratando de reforço, a grande revolução se deu com o desenvolvimento da fibra de vidro, provavelmente por acaso, durante a manipulação de uma massa de vidro derretida, RESANA (10).

A primeira referência às fibras de vidro foi feita por René de Reumir, em 1713, em uma conferência perante a Academia Parisiense de Ciências. Em 1893, Edward Drummond Libbey montou uma pequena unidade para a produção de fibras de vidro, às quais misturou fios de seda para produzir diversos artigos, inclusive vestidos e gravatas. Já em 1914, várias patentes da obtenção das fibras de vidro eram depositadas, principalmente na Europa; o objetivo era a melhoria do processo de fiação da mesma. Em 1931, a Owens - Illinois Glass Co. iniciou uma pesquisa sobre os processos industriais de produção de fibra de vidro, no qual foi seguida em 1935 pela Corning Glass Works. Em 1938 as duas empresas conjugaram seus esforços, fundando a Owens Corning Fiberglass Corporation, a qual desde então, foi pioneira em praticamente todas

as inovações e melhorias tecnológicas no desenvolvimento dos processos de fabricação dos produtos finais do campo das fibras de vidro, RESANA (10).

Contudo, foi somente a partir de 1940, e principalmente em função das necessidades da 2ª. Grande Guerra, que começou a utilização da fibra de vidro como elemento de reforço de peças moldadas em resinas poliéster. Foram produzidas carcaças de proteção para as antenas de radares em veículos militares (caça e bombardeiros), devido às suas excelentes características mecânicas, elétricas e químicas.

Foi o uso das fibras de vidro que dominou amplamente as primeiras décadas do desenvolvimento dos materiais compostos. Nas décadas recentes surgiram outras fibras apresentando perspectivas de substituir com vantagem as fibras de vidro, entre elas destacam-se as fibras de grafite, carbono, kevlar, boro e asbesto, BLASS (9). Dessas, a grande sensação é o kevlar, uma fibra aramídica (semelhante ao nylon). O sucesso do kevlar se explica por contar com propriedades como rigidez mecânica, resistência à tração, à flexão e à ruptura, características que lhe permitem variada gama de aplicações, como na fabricação de coletes à prova de bala. Além disso, pode ser aliado à fibra de carbono - outra vedete dos novos materiais - ganhando em flexibilidade, resistência mecânica e térmica. O alto custo porém impede uma maior disseminação do kevlar: alguns tipos de kevlar chegam a custar até US\$ 200 o quilo, BORGES NETTO (11).

As fibras de carbono, kevlar, boro e outras, são fibras de alto desempenho, de custo bastante elevado e por essa razão sua utilização deve restringir-se a projetos especiais em aplicações aeroespaciais, por exemplo, onde seu alto custo é justificado.

II.2 - DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIA

Como ocorre com a maioria dos termos técnico-científicos, suas origens são baseadas na língua inglesa. O mesmo ocorreu com o termo ("**COMPOSITE MATERIALS**"), que foi usado para definir a conjugação de materiais para alcançar propriedades desejadas no produto final. No Brasil, inicialmente, a melhor tradução para o termo ("**COMPOSITE MATERIALS**"), dentro dos padrões ortográficos da língua portuguesa, foi MATERIAIS CONJUGADOS, pois não existia a palavra compósito. O termo materiais compostos parecia ser o mais adequado para a tradução "ao pé da letra" inglês/português. Entretanto, a abrangência do termo composto impediu sua utilização. Material composto não necessariamente significa material conjugado com outro material, pois pode corresponder a uma composição do material com outras substâncias que não tenham como objetivo conjugar propriedades.

Muitas vezes o enriquecimento dos dicionários de língua portuguesa, publicados no Brasil, se deu através do aportuguesamento de palavras originárias de idiomas estrangeiros. Este fato tem sido observado principalmente no âmbito dos termos técnicos. Assim, como não poderia fugir à tradição, o termo ("COMPOSITE") foi aportuguesado para **COMPÓSITO**, através da edição no **NOVO DICIONARIO AURELIO**, editado em 1975, com o seguinte significado:

"Compósito. (do latim *Compositu*)

Adj. Composto, mesclado, heterogêneo".

Portanto, o aparecimento do termo **MATERIAL COMPÓSITO** como a tradução fiel de ("**COMPOSITE MATERIALS**") facilitou e ampliou a terminologia neste campo técnico-científico. Nos dias atuais, o termo material compósito tem sido usado como sinônimo de material conjugado e vice-versa.

Não menos complicada é a definição de ("**COMPOSITE MATERIALS**") a nível mundial, pois nos últimos anos tem sido alvo de muita controvérsia. De uma maneira geral, os materiais compósitos são definidos como materiais gerados pela combinação racional de duas ou mais substâncias discretas, de tal maneira que a presença de uma substância afeta o ambiente do conjunto e, portanto, afeta o comportamento da outra substância.

A grande polêmica da definição apresentada, está em torno da dimensão estrutural da substância discreta. Se a substância discreta estiver a um nível atômico, por exemplo, as ligas metálicas, poderiam ser consideradas material compósito. Entretanto, isto não é correto dentro do escopo apresentado até aqui. A mesma observação é válida para um material com diferentes fases em sua estrutura, assim como cementsita e ferrita em aços comuns. Estes materiais também não são considerados compósitos. Portanto, o nível dimensional das substâncias discretas em materiais compósitos é classificado como macroestrutural, ou seja, dimensões muito maiores do que o nível microscópico ou microestrutural.

Uma definição mais específica do material compósito pode ser a seguinte:

"Um material compósito se constitui num sistema de materiais pela mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes diferindo em forma e/ou composição química e que sejam essencialmente insolúveis entre si", HAGE Jr. (1).

II.3 -TIPOS DE COMPÓSITOS

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes e com a geometria ou forma das fases presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma de fibras (longas ou curtas), de laminados, de partículas, podem ser incorporados proporcionando diferentes estruturas ao compósito.

Os materiais têm sido convencionalmente classificados de acordo com sua natureza química e física em: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os materiais cerâmicos têm como características principais a elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade. Fibras de vidro, fibras de cerâmica e mica são alguns dos componentes de materiais compósitos fabricados a partir das cerâmicas. Os principais exemplos são: fibras de carbono, fibras de grafite, carbetto de silício, nitreto de boro e nitreto de titânio. Esta classe de cerâmica destaca-se pela sua elevada resistência mecânica a elevadas temperaturas.

Os materiais metálicos apresentam como características gerais a excelente ductilidade e excelente condutividade térmica e elétrica. Os átomos estão unidos em sua estrutura através de ligações metálicas, caracterizadas pela presença de elétrons livres. A combinação de diferentes elementos metálicos e não metálicos favorece a fabricação de ligas metálicas dentro de uma ampla faixa de propriedades desejadas. Metais como o tungstênio e ligas de alumínio e titânio são os principais exemplos de aplicações em compósitos. A grande limitação do uso de metais em compósitos é sua densidade elevada.

Os materiais poliméricos destacam-se pela sua baixa densidade e fácil conformação, além de elevada resistividade elétrica. Sua estrutura é constituída de macromoléculas formadas a partir de ligações covalentes e coesas entre si por fracas interações intermoleculares. Esta última característica estrutural limita o uso dos polímeros, comparando-se com outros tipos de materiais. Na maioria das aplicações em forma de compósitos, os polímeros atuam como matriz aglomerante do reforço. Assim, as resinas termofixas como o poliéster insaturado e epoxi servem como matriz para materiais reforçados com fibras de vidro e fibras de carbono. Uma exceção é a fibra de kevlar que embora polimérica, é utilizada como reforço em matrizes poliméricas.

Os materiais compósitos geralmente são constituídos pela combinação de materiais: cerâmicos e poliméricos; cerâmicos e metálicos; poliméricos e metálicos; e cerâmicos, metálicos e poliméricos. As possíveis combinações na estrutura dos compósitos dependem das propriedades desejadas. A conjugação de materiais cerâmicos

e metálicos tem sido utilizada, por exemplo, na fabricação de ("CERMETS"), onde a maleabilidade da matriz metálica pode ser combinada com a dureza de pós-cerâmicos. Estes compósitos são fabricados pelo processo de metalurgia do pó e são geralmente utilizados como ferramentas de corte. Matrizes metálicas podem ser reforçadas com materiais cerâmicos como ("WHISKERS") de carbeto de silício (SiC). Nesse caso, a tenacidade da matriz pode ser conjugada com a elevada dureza e rigidez dos monocristais de SiC. Esta combinação confere o dobro do módulo de elasticidade e da resistência mecânica comparado com os materiais monolíticos tradicionais.

O uso dos materiais poliméricos em compósitos se deve quase que estritamente em função de sua leveza e sua fácil conformação. Assim, resinas poliméricas são usadas para aglomerar e estruturar compósitos constituídos de fibras e filamentos de alta resistência mecânica. As fibras podem ser fabricadas a partir de materiais cerâmicos como o vidro e a grafita ou de materiais metálicos como o aço, o tungstênio revestido com boro, etc. A combinação de materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos em um material compósito tem como exemplo a fabricação de pneus de carro com filamentos de aço. Neste tipo de pneumático, a borracha é o componente polimérico; o negro-de-fumo (carbono em pó) é o componente cerâmico e o filamento de aço é o componente metálico. A elasticidade da borracha é combinada com o aumento da resistência à abrasão promovido pelo negro-de-fumo, e a estrutura do pneu é reforçada mecanicamente com o arranjo ordenado dos filamentos de aço.

O componente reforçante dos compósitos pode estar na forma particulada, na forma de laminados ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforço em compósitos avançados envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do compósito, através das facilidades têxteis que as fibras podem ser submetidas, como: tecidos, não-tecidos (nonwoven), mechas (roving), fios etc. A maior parte dos compósitos apresenta uma matriz contínua que aglomera o reforço fibroso. Entretanto, recentemente, a combinação de reforços fibrosos pode ser conseguida sem uma matriz contínua. Neste caso, as peças são estruturadas pura e simplesmente com a combinação têxtil de dois ou mais reforços fibrosos, HAGE Jr.(1).

II.4 - CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DOS COMPÓSITOS

A combinação de propriedades físicas, mecânicas e químicas dos componentes de um compósito para proporcionar as características desejadas ao produto final deve ser realizada conhecendo-se muito bem as propriedades de cada componente. Muitas vezes as características são até mesmo opostas, como no caso dos materiais metálicos e materiais poliméricos, onde o primeiro é bom condutor elétrico e de calor, enquanto o segundo é isolante. O aspecto de condutividade é imensamente amplo entre os diversos tipos de materiais.

Uma outra propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estruturação dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica. Uma discrepância muito acentuada entre os componentes do compósito dificulta o fenômeno de adesão destes componentes, pois a dilatação ou a contração diferencial favorece a separação das fases na região interfacial. Quanto mais fraca for a interação atômica ou molecular na estrutura do material maior será o coeficiente de expansão térmica, HAGE Jr.(1) .

II.5 - PROPRIEDADES DA INTERFACE

Um dos parâmetros mais importantes em materiais compósitos com uma ou mais fases contínuas é a interface entre o reforço e a matriz. A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. A região interfacial é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início de falha, comprometendo o desempenho do compósito. Portanto, além das propriedades individuais de cada componente do compósito, a interface deve ser a mais adequada possível para otimizar a combinação das propriedades envolvidas, HAGE Jr. (1).

A maior dificuldade no processo de compatibilização entre os componentes do compósito na região interfacial é combinar as diferentes características químicas destes. Por exemplo, as propriedades específicas de materiais orgânicos como os polímeros dificilmente são por si compatíveis com as propriedades específicas de materiais inorgânicos como as cerâmicas. Em razão das diferentes naturezas das ligações químicas envolvidas e da diferença entre os coeficientes de expansão térmica, a adesividade na interface torna-se um parâmetro bastante complexo no desenvolvimento de compósitos. A preocupação com a interface fez com que a tecnologia de fabricação de materiais compósitos desenvolvesse processos e/ou produtos para facilitar a acoplagem dos componentes na região interfacial. Os produtos para melhorar a propriedade de adesão na interface são chamados de agentes de acoplagem ou de acoplamento. Estes agentes

compatibilizam química e fisicamente os componentes, pois apresentam características bi ou polifuncionais e amenizam as diferenças entre os coeficientes de expansão térmica dos constituintes. A estrutura química do agente de acoplamento possui características de ambos os componentes, HAGE Jr. (1).

Apesar da região interfacial ser a mais vulnerável à ocorrência de falhas sob solitação mecânica, teoricamente sua resistência deveria ser intermediária entre o componente mais resistente e o menos resistente do compósito, HAGE Jr. (1).

Existem três possibilidades de ocorrer a falha durante a solitação mecânica, ou seja, a ruptura de ligações: entre os átomos do componente A-A; entre os átomos do componente B-B; e entre os átomos do componente A e do componente B na interface (A-B). Se um dos átomos for observado na região interfacial será notado que existem, tridimensionalmente, sete tipos possíveis de contato onde poderá ocorrer a ruptura, ou seja, três tipos A-A, três tipos B-B, correspondentes às três dimensões em cada componente, e um tipo A-B na interface. Portanto, o número total de possibilidades é 07 (sete) e, estatisticamente, a probabilidade de ocorrer a ruptura em um dos contatos A-A e B-B é 1/7. Por conseguinte, a probabilidade de que a ruptura ocorra nos contatos A-A e B-B é 3/7, respectivamente. Estas probabilidades são calculadas levando em consideração somente 2 átomos. Se for considerado um número total de n átomos, ter-se-á a seguinte probabilidade para a ruptura na interface:

$$\left(\frac{1}{7}\right)^{n-1}$$

onde n é o número de átomos na região interfacial.

Esta análise simplista da possibilidade de falha na interface tem como hipótese, que a facilidade de ruptura dos contatos é a mesma para todos os tipos. Na realidade, a força interatômica ou intermolecular no reforço é, geralmente, muito superior às forças na matriz. Se existe um bom contato entre a matriz e o reforço, a força de atração entre as moléculas na interface deveria ser pelo menos intermediária à dos dois componentes. A interação entre os componentes na região interfacial depende na prática de dois fatores: o grau de contato (molhabilidade) das superfícies na interface e, das forças coesivas (adesividade) nesta região. Estes fatores são interdependentes pois, se não houver suficiente área de contato entre os componentes será difícil assegurar boa adesividade entre as fases. A molhabilidade de uma superfície pela outra depende por sua vez da energia superficial destas e da área superficial de contato. Geralmente, a

A Figura 1 ilustra o efeito de molhamento de uma gota líquida, representando a matriz durante a incorporação sobre a superfície de um substrato, representando um determinado reforço. O ângulo θ tenderá a zero à medida que o líquido aumentar o seu grau de molhabilidade sobre o substrato. Assim, quando o ângulo θ se igualar a zero ocorrerá molhamento perfeito. Na realidade, o ângulo de molhamento θ é resultante das diferenças entre as tensões ou energias superficiais líquido-sólido (σ_{sl}), líquido-vapor(ar) (σ_{lv}) e sólido vapor(ar) (σ_{sv}). A Equação 1 correlaciona o ângulo de contato, θ , com as respectivas tensões superficiais:

$$\sigma_{lv} \cos \theta = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad (1)$$

Estes parâmetros de molhamento por sua vez, podem ser correlacionados com a energia de adesão através do trabalho de adesão (w):

$$w = \sigma_{sv} + \sigma_{lv} - \sigma_{sl} = \sigma_{lv} (1 + \cos \theta) \quad (2)$$

Através da Equação 2, pode-se afirmar que o trabalho de adesão sólido-líquido, ou seja, entre o reforço e a matriz, iguala ou supera o trabalho de coesão do líquido quando o ângulo de contato θ for igual a zero. O líquido molha a superfície sólida quando as forças de atração líquido-sólido se igualam ou superam as forças de atração líquido-líquido.

A influência da fase sólida sobre o ângulo de molhamento pode ser representada por três fatores: a tensão superficial σ_{sv} , a rugosidade da superfície e a temperatura de molhamento. A rugosidade afeta a molhabilidade através da seguinte equação:

$$\frac{\cos \theta}{r} = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} \quad (3)$$

onde r é o fator de rugosidade.

onde r é o fator de rugosidade.

Através da Equação 3, pode-se concluir que a rugosidade diminui ainda mais a molhabilidade de um sólido por um líquido.

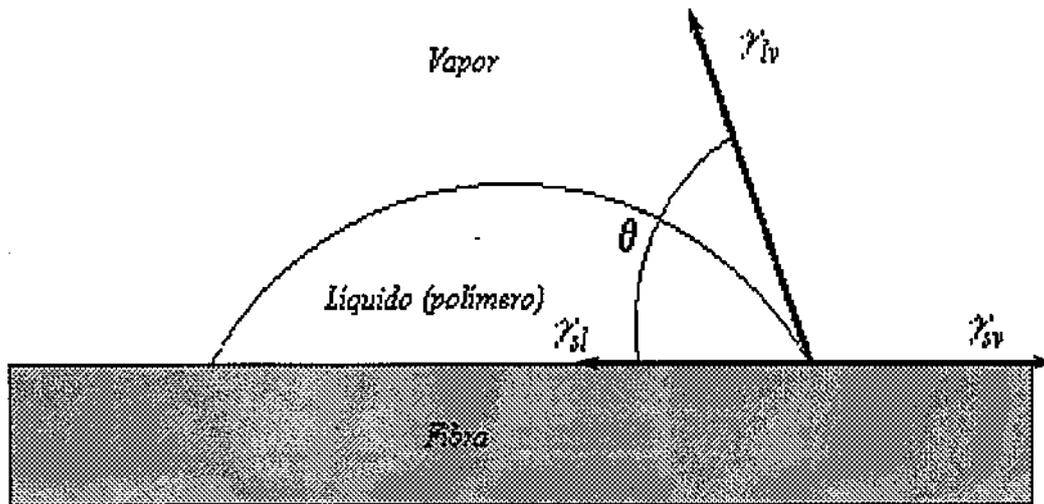
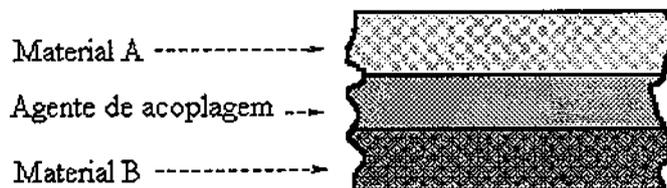


Figura 1 - Interação de um líquido com um substrato através do molhamento.

Com relação à temperatura, quase todos os líquidos têm sua tensão superficial decrescida (σ_{lv}) quando a temperatura é aumentada. Logo, maior será a interação entre o sólido e o líquido. A tensão superficial do sólido, σ_{sv} , depende das forças interatômicas ou intermoleculares na superfície. Estas forças podem ser modificadas através de tratamentos superficiais como, por exemplo: oxidação, recobrimento, reação química, etc. Estes tratamentos alteram o valor de σ_{sv} proporcionando diferentes características de molhamento. A utilização de agentes de acoplamento favorece o aumento da molhabilidade e, principalmente, de adesividade, como mostra a Figura 2.



Agente de acoplamento utilizado para agregar os materiais A, B incompatíveis.

Figura 2 - Representação do uso de agente de acoplamento em compósitos.

As forças entre as superfícies na interface podem ser de origem eletrostática ou covalente, quando houver reação química. Para as forças eletrostáticas a distância entre as superfícies de contato é fundamental. Existe uma distância ótima entre os átomos das superfícies em que a força de atração é máxima e a energia de contato atinge seu estado de máxima estabilidade. Se considerar a distância de dois átomos a distância ótima está entre 1 e 5 Å. Se suas superfícies forem perfeitamente lisas, a aproximação destas poderá proporcionar distâncias na faixa indicada para a adesão perfeita. Entretanto, a rugosidade natural das superfícies inviabiliza a possibilidade de que toda área superficial, de ambas superfícies, estejam intimamente em contato, HAGE Jr. (1)

II.6 - VARIÁVEIS ESTRUTURAIS E DE COMPOSIÇÃO

As propriedades dos materiais compósitos são influenciadas pelas variáveis que definem a disposição de uma fase em relação à outra, e por aquelas que dependem da composição de cada fase. Ao primeiro tipo de variável dá-se o nome de variável estrutural e, ao segundo, o de variável de composição.

Vários parâmetros fazem parte da variável estrutural, dentre eles: fases contínuas e fases dispersas; estado da matéria das fases; forma, tamanho e distribuição de tamanho; concentração e homogeneidade; orientação e topologia das fases dispersas. O material compósito pode ser constituído de uma ou mais fases contínuas, e uma ou mais fases dispersas. A fase contínua é definida como aquela que preenche todo o espaço da estrutura do compósito sem sofrer descontinuidade. A fase dispersa por sua vez está envolvida pela fase contínua e apresenta-se como descontinuidade dentro da estrutura do compósito. A Figura 3 ilustra cada tipo de fase. Existindo a fase dispersa, a forma como se apresenta é muito importante, ou seja: fibrosa ou particulada. O tamanho das fibras ou das partículas e, principalmente, a distribuição do tamanho afetam diretamente as propriedades mecânicas dos compósitos. Certamente, a propriedade final do compósito é proporcional à concentração das fases presentes. Por outro lado, a reprodutibilidade das propriedades depende da homogeneidade com a qual as fases se encontram distribuídas pela estrutura do compósito. A orientação da fase dispersa e a topologia que ela proporciona ao compósito afeta diretamente a isotropia das propriedades ao longo da estrutura, HAGE Jr. (1).

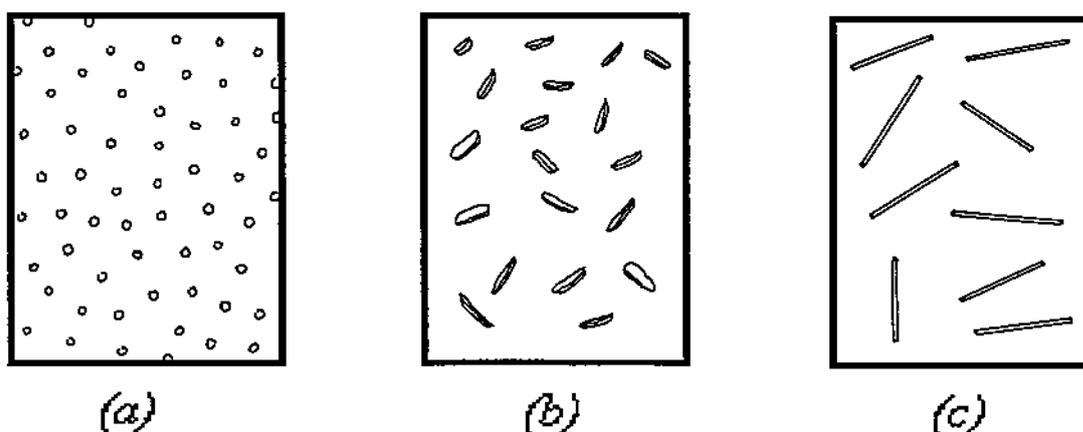


Figura 3 - Tipos de fase. a) Esférica; b) Plaquetas; c) Fibrosas.

II.7 - A JUTA (Simbologia ABNT : CJ)

As fibras de juta são extraídas das hastes da juta. O tipo *Corchorus capsularis* é cultivado em zonas de inundação e o *Corchorus olitorius* em zonas mais altas. É uma planta das regiões tropicais, onde a média climática anualmente mantém a umidade relativa alta, com temperaturas constantes entre 20 e 25°C, ERHARDT e colaboradores (12).

A estrutura do caule da juta é semelhante ao do linho. As fibras são fortemente lignificadas e esta particularidade reduz a resistência das fibras quando elas estão sob a ação da luz, calor e umidade. As fibras são obtidas colocando-se os caules em água corrente ou de fraca correnteza. Ficam assim expostas à maceração em água fria. A separação das fibras é feita em estado de molhado, nos tanques de maceração. O lenho é batido com macetes e quebrado em pedaços curtos, depois em movimento circular é expelido do feixe da fibra, ERHARDT e colaboradores (12).

De acordo com BARKAKATY (13) as fibras de celulose como sisal, juta e palmeira, contêm 50 a 78% de celulose, 10 a 24% de hemicelulose e pectinas, 8 a 13% de lignina, com baixas percentagens de ceras e resíduos minerais. A seguir serão apresentadas, na Tabela 1, algumas características e propriedades da juta (CJ).

Tabela 1 - Características e propriedades da juta

Comprimento da fibra	Fibra técnica 1,2 a 3,0 m.
Diâmetro da fibra	Aproximadamente 25 micros.
Densidade	1,5 g/cm ³ .
Higroscopicidade	Muito alta até 35% do peso seco. Em clima normal, a fibra absorve 12,5 a 14% de umidade. Tolerância combinada de umidade 17,00%.
Comportamento com ácidos e lixívia	Muito sensível a ácidos. Lixívia não prejudicam.
Cor	Em geral cinza para marrom-avermelhado.
Superfície da fibra	Lisa.
Teste de combustão	Arde como outras fibras vegetais.

II.8 - A RESINA POLIÉSTER

A resina poliéster insaturada pertence aos sintéticos termoestáveis e é geralmente fornecida na forma de líquido xaroposo. São endurecidas ou curadas por meio de polimerização, durante a qual se processa uma ligação molecular tridimensional. O endurecimento ou cura consiste na reação química com simultânea moldagem da peça, que pode ser iniciada de várias maneiras ou por vários meios. Da reação química do processo resulta um material com estrutura molecular tridimensional, insolúvel e infusível, tomando, assim, o processo irreversível.

II.8.1 - A RESINA POLIÉSTER INSATURADA

Ésteres são compostos orgânicos resultantes da reação de um ácido mineral ou orgânico com um álcool. Para obtenção de plásticos ou compostos de pesos moleculares mais elevados, as substâncias monofuncionais são inadequadas, e o emprego de matéria-prima com características polifuncionais, é imprescindível. No caso da resina poliéster insaturada, emprega-se matéria-prima que contenha antes e após a reação química de sua fabricação, grupos reativos na forma de dupla ligação na cadeia carbônica, HOECHST DO BRASIL (14).

As substâncias mais empregadas como componentes ácidos da reação são o ácido maleico, o anidrido maleico e o anidrido ftálico, este último isento de duplas ligações polimerizáveis e, como segundo componente, álcoois bifuncionais (glicóis). Figura 4, HOECHST DO BRASIL (14).

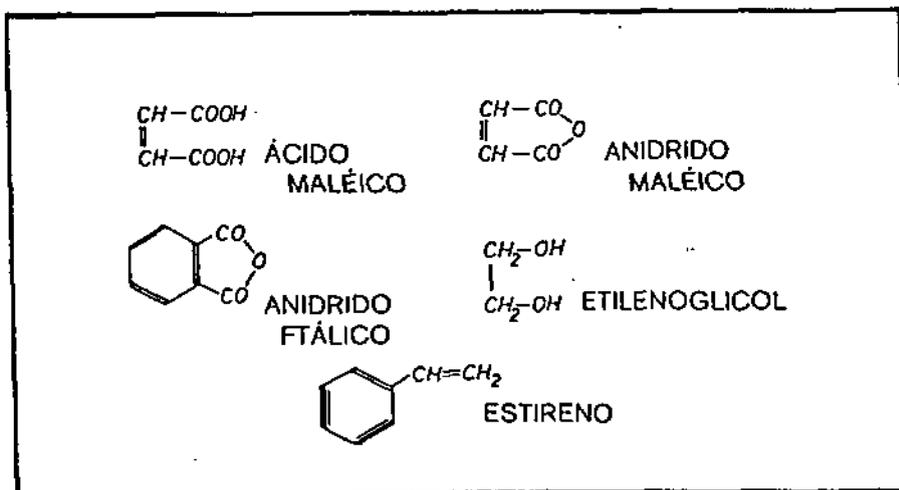


Figura 4 - Grupos reativos na forma de duplas ligações: ácido maleico, anidrido maleico e o anidrido ftálico.

As resinas poliéster insaturadas derivam da reação de esterificação entre os ácidos saturados e não saturados e os álcoois bifuncionais com liberação de água, Figura 5. As resinas poliéster rígidas insaturadas assim obtidas possuem consistência semi-sólida, termoplástica e são normalmente diluídas em solventes contendo grupos reativos. Desta forma, obtêm-se resinas fusíveis, adaptadas às várias exigências do consumidor. O diluente mais empregado é o monômero estireno, HOECHST DO BRASIL (14).

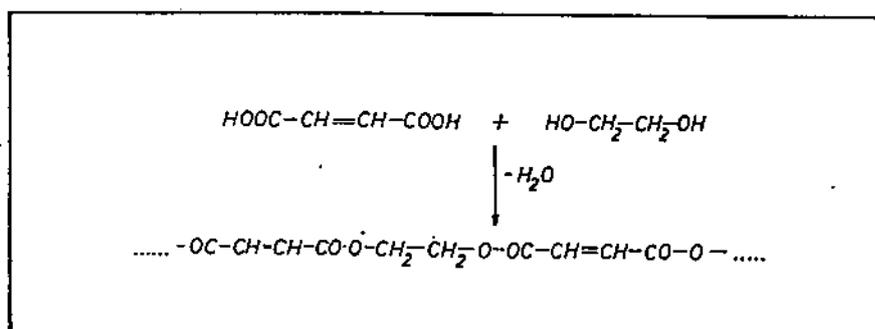


Figura 5 - Reação de esterificação com liberação de água.

O endurecimento ou cura da resina insaturada é realizado mediante uma polimerização do monômero de estireno. Esta reação química é iniciada por radicais contidos nos agentes de reação ou catalizador. Esses catalizadores, porém, exigem uma ativação mediante aplicação de calor ou por meio de aceleradores devidamente formulados. A polimerização efetua-se por meio de uma sequência de reações em cadeia onde monômeros de estireno são adicionados uns aos outros, formando cadeias de poliestireno, Figura 6. Os radicais primários e os macroradicais podem atacar a ligação dupla (insaturada) das cadeias de poliéster e uní-las ao poliestireno por reações de terminação ou transferência de cadeia, HOECHST DO BRASIL (14).

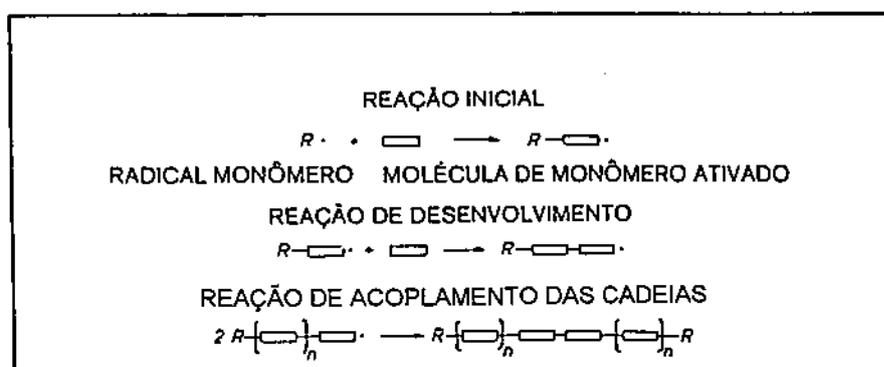


Figura 6 - Reação de polimerização da resina insaturada iniciando com o monômero estireno.

Deste modo, formam-se estruturas tridimensionais duroplásticas, ou seja, infusíveis e insolúveis, em que "pontes" de poliestireno unem cadeias de poliéster, Figura

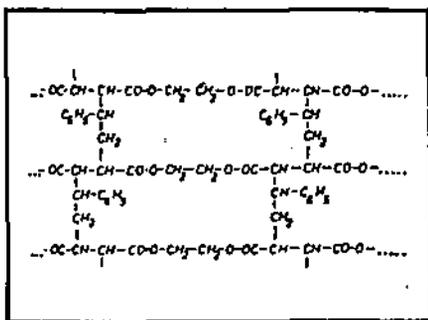


Figura 7 - Estruturas tridimensionais duroplásticas.

Nesta reação de polimerização há elevação da temperatura do sistema, demonstrando que se trata de uma reação exotérmica. A temperatura máxima alcançada varia de resina para resina, Figura 8, HOECHST DO BRASIL (14).

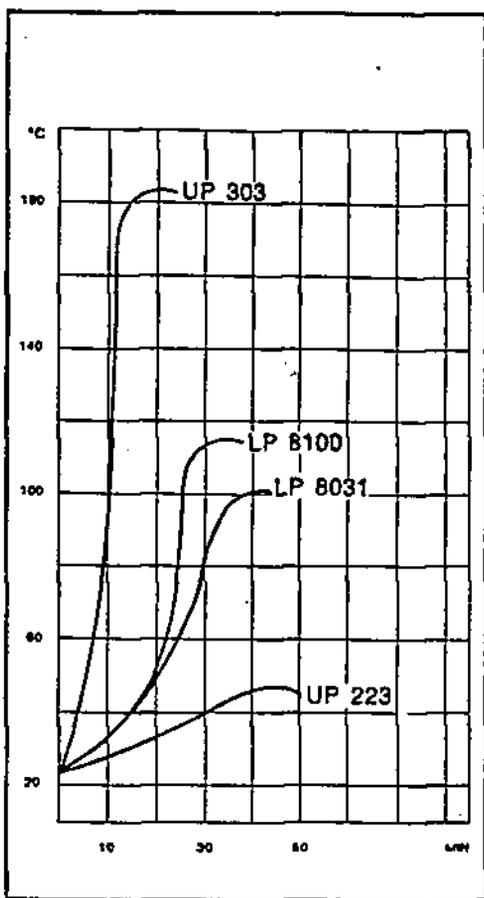


Figura 08 - Temperatura máxima alcançada variando para cada tipo de resina numa reação exotérmica.

Antes, porém, de alcançar este ponto (pico exotérmico), a resina passa por um processo de gelatinização. Os tempos de gelatinização e os tempos de cura ou

endurecimento podem variar de acordo com a escolha da resina, o tipo e dosagem de catalisador e acelerador e, também, com a temperatura, Figura 9, HOECHST DO BRASIL (14).

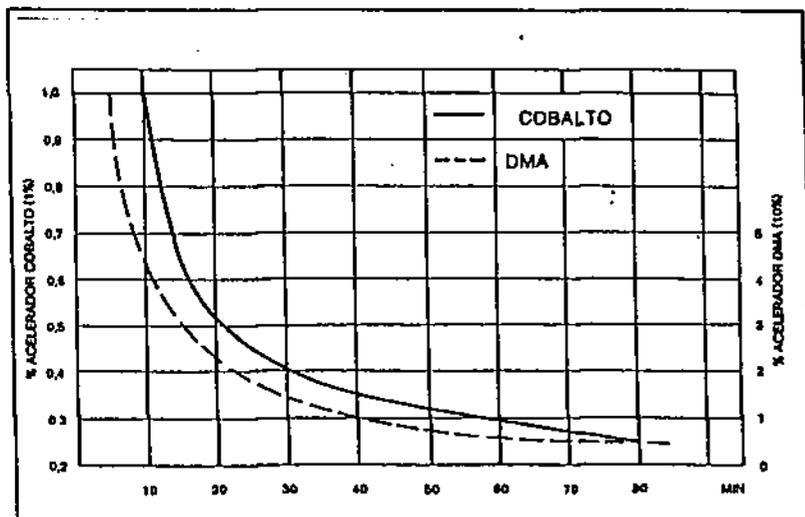


Figura 9 - Tempos de cura da resina para o acelerador de cobalto e para o acelerador DMA.

II.8.2 - TIPOS DE RESINAS E SUAS RESISTÊNCIAS QUÍMICAS E FÍSICAS.

POLIÉSTER ORTOFTÁLICO

É obtido a partir do propileno glicol e anidrido ftálico/maleico. Possui propriedades mecânicas e químicas inferiores às demais resinas, por possuir cadeia curta, baixo peso molecular, e por apresentar hidroxilas e carbonilas suscetíveis à hidrólise.

Apresenta cadeia curta, pois no momento da esterificação os radicais ácidos do ácido ortoftálico interferem entre si em razão da proximidade, provocando a formação de cadeia molecular curta.

O índice de acidez de uma resina está diretamente ligado também à sua resistência química, pois a resina ortoftálica, sendo uma resina produzida a partir de um ácido, dificilmente será obtida com um baixo índice de acidez, e para diminuí-lo é usado o artifício de se adicionar um excesso de glicol durante a esterificação. Este fato, porém, diminui a resistência química da resina, devido ao glicol ser muito suscetível à hidrólise.

As resinas ortoftálicas não têm boa resistência química nem em meio ácido e nem em meio alcalino. São muito suscetíveis ao calor e à radiação. Não apresentam boa resistência aos solventes aromáticos e halogenados.

Comparadas às resinas isoftálicas, são mais rígidas, têm maior tempo de gel (gel time), menor resistência à água e menor resistência mecânica, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

POLIÉSTER ISOFTÁLICO

Os poliésteres isoftálicos são obtidos da mesma forma que os ortoftálicos, porém, o ácido ortoftálico é aqui substituído pelo isoftálico, o qual tem radicais ácidos mais distantes entre si, não havendo interferência mútua durante a formação da cadeia do poliéster. Desta forma, são obtidos polímeros de maior cadeia e, conseqüentemente, maior peso molecular que os ortoftálicos, o que lhes confere maior resistência química e mecânica, sem a necessidade de ser adicionado um excesso de glicol.

As moléculas de cadeia mais longa proporcionam à estrutura maior resistência ao impacto, maior módulo de elasticidade e alongação.

As resinas isoftálicas, não tendo o excesso de glicol livre como as ortoftálicas, possuem maior resistência à água, sendo assim indicadas para piscinas, barcos, gelcoats, sanitários etc.

O propileno glicol pode ser substituído pelo neo-pentil glicol, que conferirá à resina alta resistência à água, inclusive quente, e às manchas.

Comparada à ortoftálica, a isoftálica tem maior resistência mecânica, maior resistência à água e aos solventes orgânicos, e possui menor rigidez e menor "gel-time", CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

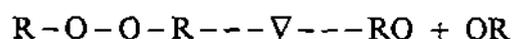
POLIÉSTER BISFENÓLICO

É formado pela reação do óxido de propileno com o bisfenol A, o que resulta no Bisfenol A Propoxilado. Posteriormente, este irá reagir com o ácido insaturado resultando na resina bisfenólica. Apresentam elevada resistência química a agentes quimicamente agressivos (sobretudo meios ácidos) e à hidrólise, devido ao pequeno número de ligações ésteres (pontos suscetíveis do ataque hidrolítico). Os grupos aromáticos em maior densidade protegem a cadeia no que se refere ao ataque pela água.

Possuem baixo teor de hidroxilas, baixa densidade de insaturações, alto peso molecular e temperatura de termodistorção mais elevada, além de maior rigidez. Tudo isso em função da estrutura molecular, o que faz com que tenha elevada resistência físico-química, boa resistência à oxidação e ao ataque por radiações U.V., CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

II.9 - CATALIZADORES

Peróxidos orgânicos (R - O - O - R') decompõem-se produzindo radicais livres pela dissociação da ligação oxigênio - oxigênio.



Quando formados em uma resina de poliéster, estes radicais livres iniciam a reação de cura.

Algumas vezes, o termo catalisador é usado para descrever um peróxido orgânico. Tradicionalmente, catalisadores são substâncias que não são consumidas quando promovem uma reação química.

No caso dos peróxidos orgânicos, as moléculas se decompõem durante a reação de cura. Portanto, o termo **Iniciador** é mais aplicado ao uso dos peróxidos orgânicos ao invés de **Catalisador**.

Peróxidos orgânicos podem dissociar-se através de processos físicos (calor) ou químicos (promotores), CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Processos Físicos

Calor - Todos os peróxidos são instáveis termicamente, portanto, quanto maior a temperatura, mais rápida será a sua decomposição. O grau de decomposição de um peróxido orgânico é medido normalmente pelo critério de meia-vida ($t_{1/2}$), definida como o tempo no qual metade de uma dada quantidade de peróxido orgânico decompõe-se a uma temperatura específica. Por conveniência, comparações de estabilidade de peróxidos são comumente listadas para temperaturas nas quais eles têm sua $t_{1/2}$ no período de 10 horas. Entretanto, gráficos com $t_{1/2}$ variando de 1 minuto, 1 hora e 10 horas, são

construídos a fim de se determinar o peróxido orgânico correto para a temperatura do processo.

Quanto maior a temperatura correspondente ao $t_{1/2}$, maior a estabilidade do peróxido orgânico, e, conseqüentemente, menor a sua taxa de decomposição, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Processo Químico

Promotores - Alguns peróxidos orgânicos podem decompor-se à temperatura ambiente através de algumas substâncias químicas conhecidas como promotores, aceleradores ou ativadores. Os promotores mais utilizados para esta finalidade são os sais metálicos, tais como Naftenato de Cobalto ou Octoato de Cobalto, que atuam em conjunto com os peróxidos Metil-Etil Cetona (MEKP). No caso dos peróxidos de Benzoíla, são empregados em conjunto as aminas terciárias aromáticas, com DMA-Dimetil Anilina ou DEA- Dietil Anilina, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

II.10 - CURA DA RESINA POLIÉSTER

Chama-se CURA a transformação da resina termoplástica linear que se encontra no estado líquido para o sólido de estrutura molecular tridimensional.

As resinas poliéster podem ser curadas a frio (temperatura ambiente) ou à quente (temperatura elevada).

Cura à temperatura ambiente - Certos peróxidos são utilizados à temperatura ambiente, particularmente na cura da resina poliéster insaturada. Estes peróxidos são dissociados através do uso de promotores ou aceleradores, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

As quantidades de promotores usados nas resinas são muito pequenas e, além do cobalto, muitos outros sais metálicos podem ser empregados em conjunto, como os sais de cobre, potássio, vanádio, manganês etc. Essa complexidade de promotores em combinações variadas altera as propriedades de cura e cosmética da resina, tais como o controle de exotermia, tempo de gel, cura, etc. A seleção de um sistema de cura é dependente de uma série de fatores a serem considerados, ou seja: laminação requerida, tempo de gel, processo, tipo de atividade da resina, espessura da peça, temperatura da

área de processo e tipos e quantidades de carga e aditivos, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Normalmente, são usadas concentrações de peróxido variando de 0,5 a 2% do peso da resina. No caso de promotores, esta concentração poderá variar de 0,05 a 0,3%. Altas concentrações de promotores podem adversamente afetar a cura final da resina. É importante frisar, que os peróxidos orgânicos não podem ser misturados diretamente com os promotores. Nestas condições, poderão resultar em violenta decomposição, explosão e fogo, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

II.11 - SEGURANÇA E MANUSEIO DE PERÓXIDOS ORGÂNICOS

Peróxidos orgânicos não apresentam maiores problemas quando armazenados, se manuseados dentro dos padrões recomendados. Temperatura e contaminação são dois aspectos fundamentais no manuseio e estocagem dos peróxidos, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

Temperatura - Para qualquer peróxido, em sua embalagem original é recomendada a temperatura na qual o produto deve ser armazenado. Estocar o produto em temperaturas acima da recomendada pode gerar decomposição com evaporação e, evidentemente, consequências imprevisíveis.

Contaminações - A estabilidade do peróxido orgânico é reduzida pela contaminação com bases, ácidos fortes, compostos sulfúricos, aminas, agentes de redução de qualquer espécie. Contaminação de peróxido orgânico com metais e suas ligas tais como cobre, latão, aço, carbono, etc., poeira proveniente do lixamento de partes em plásticos reforçados e sujeiras, podem provocar uma violenta decomposição, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

II.12 - POLIMERIZAÇÃO

Para entender melhor a polimerização de uma resina, é conveniente conhecer algumas transformações que ocorrem nesse período, ou seja:

1. Tempo de Gel - é o tempo transcorrido, após a mistura da resina poliéster com catalisador (com ou sem acelerador), e o início do endurecimento da resina, quando a mesma atinge um estado gelatinoso, ALBA (15).

2. Gelatinização - é um período intermediário entre o começo e o fim da polimerização, isto é, o período intermediário em que a resina poliéster insaturada passa do estado líquido para o sólido, ALBA (15).

3. Tempo de Cura - é o período em que, após a mistura da resina com o catalisador (com ou sem acelerador), a mesma fica totalmente polimerizada. É o tempo de polimerização ou de cura.

4. Exotermia Máxima ou Pico Exotérmico - é a temperatura máxima que atinge uma determinada quantidade de resina catalisada quando da sua polimerização, Figura 10, ALBA (15).

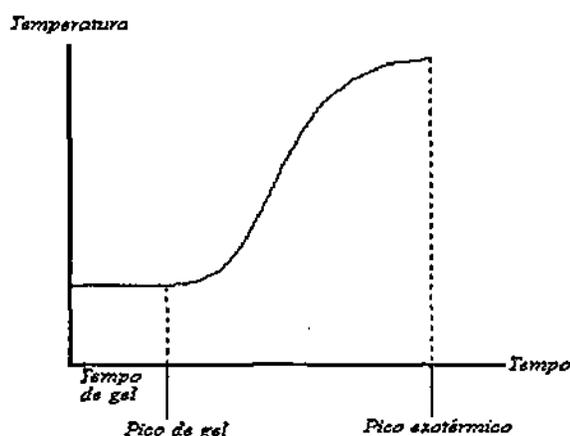


Figura 10 - Transformações exotérmicas.

Para medir o pico exotérmico, basta inserir na amostra um termômetro lubrificado (com vaselina) quando a resina atingir o tempo de gel, e fazer o acompanhamento do aumento da temperatura, até se estabilizar e começar a decrescer. Esta temperatura máxima é o pico exotérmico. Uma resina com alto pico exotérmico é uma resina muito reativa, com muitas insaturações e pode causar problemas de rachaduras ou trincas, ou então é uma resina na qual foi adicionado alto teor de acelerador e catalisador, CARVALHO FILHO e colaboradores (7).

O tempo de gel varia com: tipo e quantidade de catalisador; com tipo e quantidade de acelerador; com a reatividade da resina, cargas adicionadas na formulação, corantes e temperatura de cura.

O pico exotérmico depende do tipo de resina, da quantidade e tipo de monômero, do tipo e quantidade de acelerador e catalisador, e da temperatura de cura, ALBA (15).

II.13 - DESMOLDANTE

O poliéster tem tendência a aderir às superfícies, mesmo bem lisas, e por isso, o uso de desmoldantes é obrigatório, a fim de facilitar a separação da peça do molde e evitar sua aderência ao mesmo. Os desmoldantes podem ser divididos em 4 classes:

- a) Ceras
- b) Poli (álcool vinílico)
- c) Silicones
- d) Hidrocarbonetos fluorados

Na cura à temperatura ambiente, as ceras (sólidas ou líquidas) são usadas como base desmoldante e vedação do molde. Uma película fina de poli (álcool vinílico) dissolvido em água, sobreposta à camada de cera, completa o elemento desmoldante. Na cura térmica, este sistema cera-poli (álcool vinílico) torna-se impraticável, por não resistir as elevadas temperaturas do processo. Neste caso, são usadas pastas de silicone e hidrocarbonetos fluorados. Especial atenção deve ser observada na aplicação destes desmoldantes, a fim de evitar a penetração dos mesmos no material de reforço, fazendo assim, valer sua propriedade anti-aderente na liga da própria resina com o reforço, HOECHST DO BRASIL (14). O fator de desmoldagem (quociente entre o tempo de desmoldagem e o tempo de gelatinização) é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Fator de desmoldagem em função dos aditivos (catalisadores e aceleradores).

	Tempo de Gelatinização	Tempo de Desmoldagem	Fator de Desmoldagem	
Aceleradores				
Dimetil-p-toluidina	2 min	6 min	3	2 % de Peróxido de Benzoila em combinação com 2 % dos aceleradores da tabela
Dimentilanilina	9 min	35 min	4	
Dietilanilina	45 min	90 min	2	
Catalizadores				
Peróxido de Metilacetona	7 min	120 min	17	0,5 % Acelerador de Cobalto em combinação com 2% de Peróxido da tabela
Peróxido de Metil-isobutilcetona	75 min	300 min	4	
Peróxido de Acetilacetona	10 min	50 min	5	
Peróxido de Ciclohexanona	30 min	240 min	8	

II.14 - MÉTODOS DE MOLDAGEM DE RESINAS TERMOFIXAS REFORÇADAS COM FIBRAS

Plásticos reforçados com fibras são fabricados de diversas maneiras. Partindo da moldagem por contato, estritamente manual (Hand Lay-up), vemos a tendência da mecanização da fabricação de plásticos reforçados em ritmo crescente. Vários fatores como economia em função do número de peças, resistência e aparência (acabamento) determinam a escolha de um dos métodos de fabricação descritos a seguir.

II.14.1 - MOLDAGEM MANUAL

Método empregado em diversos setores da fabricação de peças de poliéster reforçado com fibras, e que deu início a moldagem de plásticos reforçados. É principalmente empregado na fabricação de peças únicas, em pequenas séries e em peças volumosas com grandes áreas. Este método é especialmente empregado por empresas de pequeno porte e em artesanatos, pois prescinde de investimentos vultosos quanto a

maquinaria, equipamentos e moldes dispendiosos e complicados. Neste método, camadas de fibras são colocadas à mão contra a superfície do molde, e bem impregnadas com resina poliéster por meio de rolo, escova, etc. Por motivo de aparência e acabamento da superfície, aplica-se ao molde, previamente, uma camada superficial (gel coat). Esta camada é aplicada a pincel ou a pistola.

II.14.2 - APLICAÇÃO A PISTOLA

A aplicação à pistola representa um método intermediário entre a mecanização e o processo estritamente manual. A pistola aplica a resina e, simultaneamente, a fibra é cortada e levada no jato da resina. Os cordões de roving de fibra, cortados em comprimentos de 3×10^{-3} a 5×10^{-3} m em equipamento adequado, são levados pelo jato de ar de um compressor e depositados simultaneamente com a resina da pistola sobre a superfície do molde. A compactação da camada de resina/reforço assim aplicada e a extração de bolhas de ar são efetuadas manualmente. Os equipamentos bicomponentes até hoje usados, estão sendo superados pelos modernos equipamentos monocomponentes já no mercado.

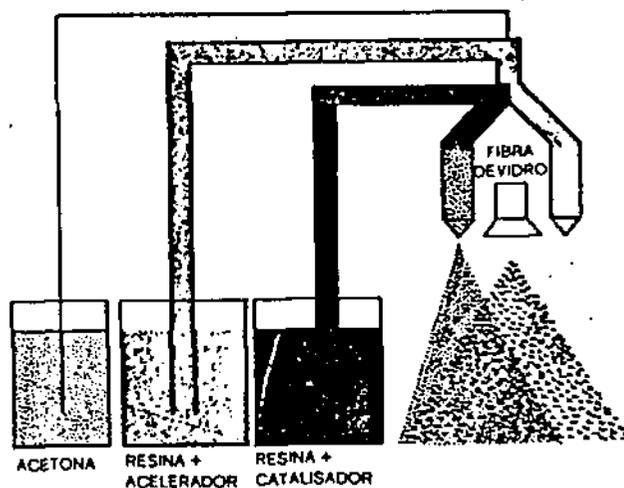


Figura 11 - Aplicação à pistola.

II.14.3 - MOLDAGEM A VÁCUO

O processo de moldagem a vácuo é usado quando se requer peças de acabamento liso de ambos os lados da superfície e em séries relativamente pequenas. O acabamento liso de ambos os lados da peça moldada exige moldes macho e fêmea. Por motivos de economia, e dependendo do caso, usa-se somente um molde rígido, geralmente a fêmea, e o acabamento interno é dado por um diafragma de borracha ou elastômero equivalente, geralmente em forma de folha de polietileno. Aplica-se o reforço impregnado com resina à superfície do molde. Após a vedação do mesmo com

diafragma, aplica-se o vácuo, assim, distribuindo a resina uniformemente e retirando o excesso e as bolhas de ar simultaneamente.

II.14.4 - MOLDAGEM SOB PRESSÃO

Este método é empregado na fabricação de peças com acabamento perfeito em pequenas e médias quantidades. Da mesma forma que a moldagem a vácuo, este método exige moldes seccionados e fechados. O reforço é introduzido no molde antes do seu fechamento, após o qual a resina catalisada é injetada sob pressão. A característica principal deste método consiste na possibilidade de execução de peças de formas geométricas complicadas. As faces, tanto internas como externas da peça moldada sob pressão, apresentam acabamento perfeito sob todos os pontos de vista, Figura 12.

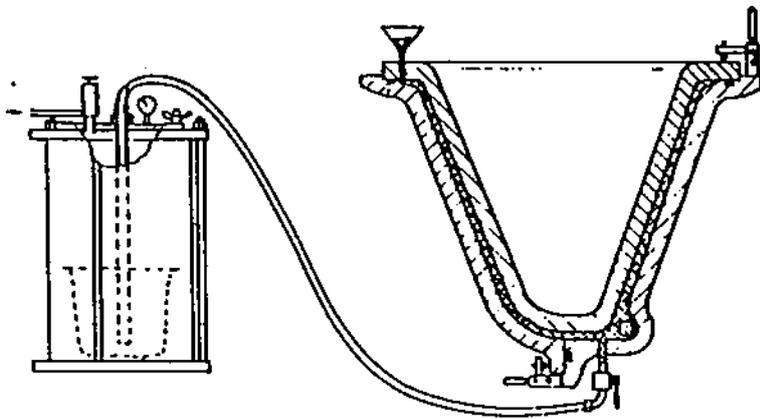


Figura 12 - Moldagem sob pressão.

II.14.5 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO A VÁCUO

Este método de moldagem resultou de uma combinação da moldagem sob pressão (injeção) e a moldagem a vácuo, permitindo produzir peças com acabamentos lisos por ambos os lados, reduzindo ao mínimo o problema de bolhas e falhas de impregnação. Serve para produzir peças em séries pequenas e médias, praticamente de qualquer tamanho e geometria complexa, porém de espessura de parede não muito grossa e relativamente homogênea. Como na moldagem sob pressão, exige moldes seccionados bipartidos e com fechamento perfeito, provido de um canal onde pode ser aplicado o vácuo ou entrada da resina injetada de forma homogênea. Na maioria dos casos, é conveniente construir o molde fêmea com uma estrutura rígida e o molde macho com uma certa flexibilidade. Desta forma, consegue-se que o molde trabalhe, isto é, que

estufe levemente durante a etapa de injeção (pressão) da resina e se comprima quando é aplicado o vácuo. Isto força a resina catalisada, ainda líquida, a impregnar todo o reforço previamente colocado no molde e atingir todos os extremos, mesmo que isto implique longos percursos de fluxo da resina. A própria pressão hidrostática da resina, em vasilhame a 1 - 2m acima do molde, é suficiente para realizar a injeção. Nas Figuras 13, 14 e 15, são esquematizados três exemplos de moldagem por injeção a vácuo.

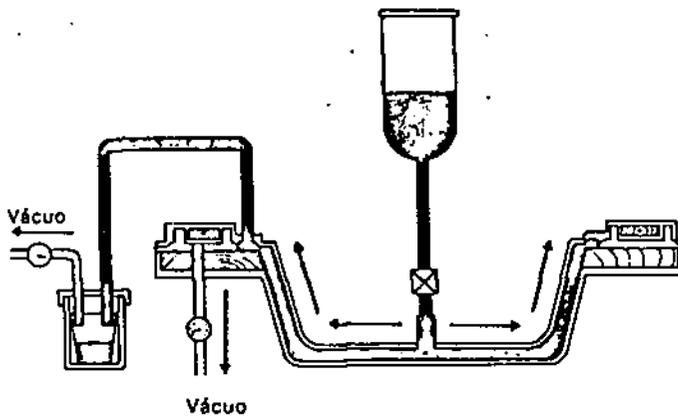


Figura 13 - Injeção, sucção periférica

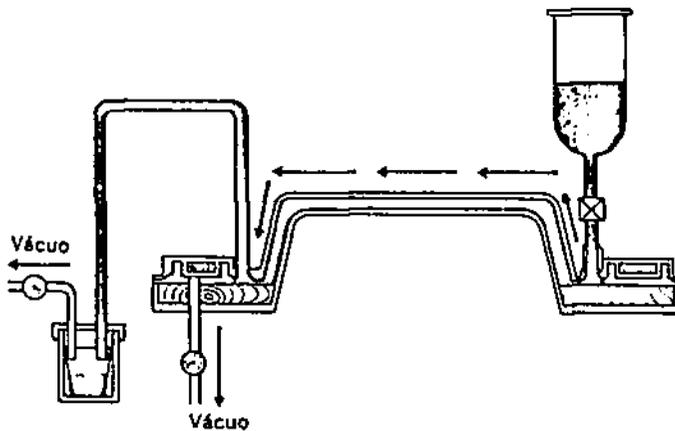


Figura 14 - Injeção unilateral, sucção unilateral

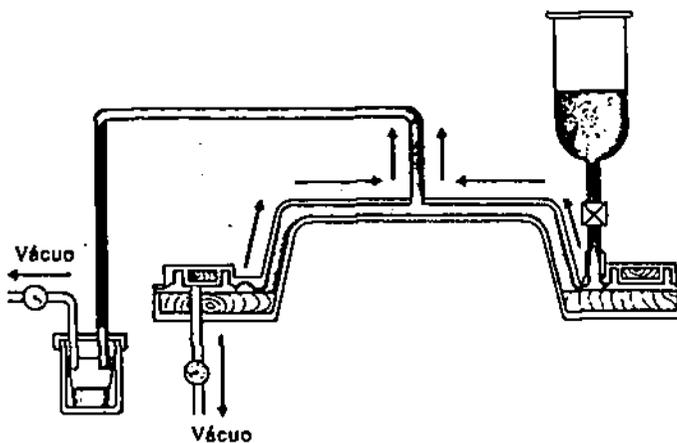


Figura 15 - Injeção periférica, sucção central

II.14.6 - MOLDAGEM POR PRENSAGEM

Massas de poliéster para prensagem exigem para seu uso, prensas hidráulicas ou mecânicas. Os moldes devem ser seccionados, no mínimo bipartidos, e podem ser de poliéster reforçado no caso de prensagem a frio. Enquanto a prensagem a frio é empregada na fabricação de peças seriadas de quantidade média, a prensagem a quente é empregada em séries elevadas. Neste caso, porém, as exigências feitas aos moldes e ao equipamento são elevadas e, conseqüentemente, o investimento é de vulto. Na prensagem a quente trabalha-se a úmido ou com reforços pré-impregnados de poliéster (massas para prensagem e pré-pregs).

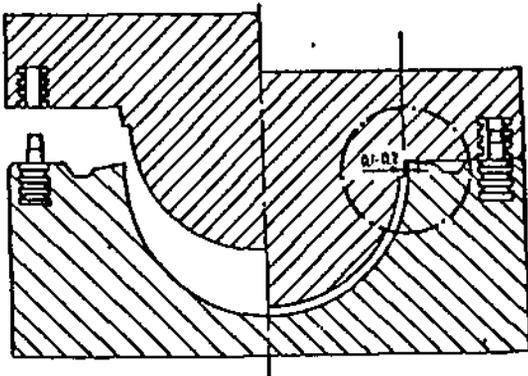


Figura 16 - Moldagem por prensagem.

II.14.7 - MOLDAGEM POR BOBINAGEM (filament winding)

Este método é excepcionalmente racional na fabricação de peças cilíndricas como tubos e recipientes cilíndricos e substituí, quase por completo, a fabricação manual neste setor. O material de reforço, em forma de cordões ou fitas de fibra, após passar por tanques de impregnação e o subseqüente espremedor do excesso, é enrolado sobre mandril apropriado, e curado. Equipamento especial permite adaptar a forma de enrolar o material de reforço às exigências de máxima resistência de cada caso particular.

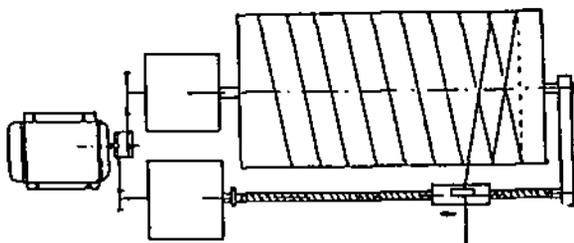


Figura 17 - Moldagem por bobinagem.

II.14.8 - MOLDAGEM POR CENTRIFUGAÇÃO

Este método emprega a força centrífuga para impregnar de poliéster o material de reforço previamente colocado nos moldes.

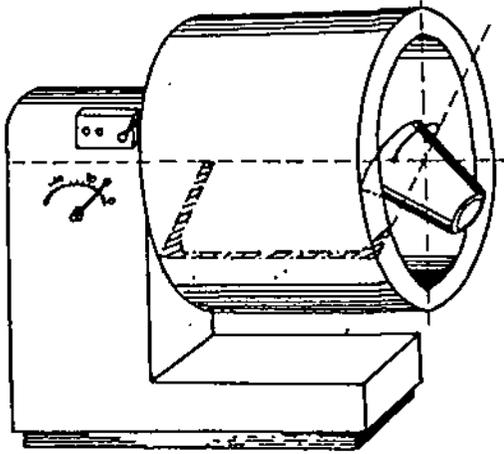


Figura 18 - Moldagem por centrifugação.

II.14.9 - MOLDAGEM CONTÍNUA

A moldagem contínua é empregada na fabricação de laminados e perfilados. Exemplo: caniços para pesca, antenas, corrugados, chapas onduladas e planas, placas etc.

II.14.10 - CONSTRUÇÃO MISTA

A inferior rigidez dos laminados de poliéster reforçado em relação aos materiais convencionais, por exemplo, metais, exige considerações especiais para obtenção de relação favorável entre a máxima resistência e o peso mínimo. A incorporação de reforços suplementares no desenho de peças bem como o embutimento de reforços especiais na mesma representam meios de aumento da resistência e rigidez. Outro meio de aumentar a resistência dos laminados é dada pela fabricação dos mesmos em sanduiche. Aqui, o núcleo de poliéster reforçado em diversas formas estruturais, encontra-se entre os revestimentos na forma de sanduiches. Por meio de desenho adequado, da escolha conveniente do material empregado e do método de moldagem usado conseguem-se peças de elevadíssima resistência em relação ao seu peso. Sua resistência à flexão, à abrasão, à torção e ao impacto aliado ao peso limitado torna essas peças capazes de competir favoravelmente com as fabricadas a partir de materiais convencionais.

O núcleo destes sanduiches é geralmente formado por perfilados de formas diversas e materiais leves de origem natural ou sintética. Os materiais mais empregados

são: a balsa, placas de material fibroso, espuma de PVC, de poliuretano e poliestireno. A baixa condutividade térmica dos últimos materiais mencionados torna-os especialmente adequados como isoladores térmicos.

A estrutura do laminado e as condições de construção determinam a sequência na aplicação da manta e do tecido de fibra no mesmo, HOECHST DO BRASIL (14).

III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

Devido à elevada relação entre resistência mecânica e peso, excelente elasticidade, estabilidade dimensional, excelente resistência à corrosão, baixo custo e propriedades térmicas atrativas dentre outras propriedades, é que as fibras de vidro se apresentam como um dos principais elementos de reforço das resinas poliéster, seguidas pelas fibras de carbono e de boro. As fibras de carbono e boro são proibitivamente caras e seu uso é justificado somente em aplicações aeroespaciais, em função de suas excelentes características.

Existem situações, no entanto, nas quais o emprego de fibras como carbono, vidro, boro, aramida e outras, resulta em uma sub-utilização de todo seu potencial e, assim sendo, podem ser substituídas por fibras com propriedades mecânicas inferiores, como juta, sisal, etc., D'ALMEIDA (2).

Neste contexto, a juta parece ser um material promissor porque é relativamente barato, tem resistência mecânica e módulo mais elevados que os plásticos e, mais importante, com sua aplicação somente em sacarias está constantemente ameaçada por sintéticos. Portanto, a utilização da juta em outras aplicações seria bastante benéfica e importante economicamente, SHAH e LAKKAD (8). Outro fator importante a considerar é a baixa densidade da juta ($1,5 \text{ g/cm}^3$) em relação à da fibra de vidro ($2,50 \text{ g/cm}^3$), o que possibilita para algumas aplicações aumentar o percentual em peso do reforço, atingindo, assim, melhores propriedades como resistência e módulo específicos. Neste caso, seria possível substituir com vantagens as fibras de vidro, já que o custo da juta é bastante inferior.

O estudo das fibras naturais como alternativa para substituir as fibras sintéticas, atualmente utilizadas como reforço da resina poliéster, é uma preocupação de muitos pesquisadores. Alguns deles têm estudado as fibras de sisal, juta, algodão, côco, banana e outras, e atestado a possibilidade de utilização de algumas destas fibras como reforço em compósitos.

BHATTACHARYA e colaboradores (16) desenvolveram compósitos usando fibras de juta numa resina fenólica. Eles estudaram os efeitos das variáveis de processamento nas propriedades mecânicas dos compósitos.

CHAWLA (17), apresentou estudos relacionados com as propriedades de compósitos unidirecionais de fibras de sisal em matriz de poliéster.

CHAWLA E BASTOS (18), estudaram as propriedades de laminados unidirecionais de Poliéster/Juta. Eles verificaram um aumento linear nas propriedades de tração dos laminados com o aumento da fração de volume da juta.

CHAWLA e colaboradores (19) e SHAH E LAKKAD (8), estudaram os compósitos híbridos de fibra de vidro e juta em matriz de resina poliéster, e notaram que uma pequena adição de fibra de vidro aumenta a resistência a tração do compósito. Eles afirmam que a juta pode ser usada também como enchimento nos compósitos de fibra de vidro. Em todos esses estudos os laminados unidirecionais foram empregados. Contudo, quando os compósitos unidirecionais de laminados de fibra de vidro foram expostos a umidades acima de 75% RH em uma câmara de umidade, foi observado um severo empenamento dos laminados. Para vencer esse empenamento foram feitos compósitos híbridos com fibras de juta unidirecionais no centro e fibras de vidro nas partes mais externas, (estrutura sandwich), em uma matriz de poliéster;

CHAWLA (20), estudou as propriedades mecânicas da resina poliéster insaturada com fibras de sisal e juta, bem como considerações sobre custos baseados em comparações relativas entre fibras de vidro e sisal, ou de juta. CHAWLA (20) concluiu que o custo de produtos da resina poliéster reforçada com fibras naturais é 1,5 vezes mais barato do que a reforçada por fibras de vidro.

SATYANARAYANA e colaboradores (21), estudaram o potencial das fibras naturais para aplicações não convencionais. As fibras naturais como algodão, juta e sisal têm atraído a atenção de cientistas para aplicações em artigos de consumo com baixo custo, em habitações e na construção civil.

Contudo, em todos os estudos envolvendo as fibras naturais, a maior limitação parece ser o alto consumo de resina;

SRIDHAR e colaboradores (22), afirmaram que as fibras de juta são porosas e que essa porosidade eleva bastante o consumo de resina. Para reduzir esse alto consumo desenvolveram em laboratório um método que utiliza a lignina como revestimento do fio de juta. O processo tinha início com o molhamento completo do fio em uma solução a 5% (em peso) de lignina em acetona e secagem ao ar. Novamente, o fio seco era passado através de uma solução de etilenodiamina em acetona e, então, finalmente seco em um forno a 80°C e apto para fazer os compósitos. Então, o fio de juta era enrolado em uma moldura retangular para formar um número desejado de camadas. O enrolamento podia ser unidirecional e bidirecional. No caso de laminados bidirecionais, o centro consistia de duas camadas na direção 90°, colocadas entre duas outras (estr. sandwich) na direção 0°. Foram usados fios de juta não tratados e fios revestidos com lignina. O consumo de

resina com o método de revestimento do fio com lignina foi reduzido, aproximadamente, em 43%. Quanto às propriedades mecânicas, os resultados dos testes indicaram (no caso dos compósitos unidirecionais) que a resistência à tração é três vezes a resistência à tração da resina poliéster sem reforço. Os testes indicaram também que a lignina que cobre a fibra de juta não afeta significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos. As propriedades de flexão e impacto dos compósitos unidirecionais e bidirecionais também não são afetadas pela camada de lignina da fibra, SRIDHAR e colaboradores (22).

SRIDHAR e colaboradores (22), concluíram que os reforços unidirecional e bidirecional da resina poliéster com fios de juta aumentam a resistência à tração da resina em 3 vezes e 1,5 vezes, respectivamente, e que o módulo de Young não é alto o bastante para que eles possam ser usados em aplicações estruturais, a não ser com adição de fibra de vidro de forma bastante balanceada.

Num estudo bastante original CHAWLA e colaboradores (23), observaram as características microestruturais, a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras de carbono, kevlar- 29, sisal e vidro, e seus conjugados, em diferentes frações volumétricas com resina poliéster como matriz. Estudaram a fibra de sisal como elemento de reforço e compararam seu desempenho com outras fibras, tais como vidro, carbono e kevlar-29. Num estudo comparativo das fibras, eles concluíram que as fibras de carbono e sisal têm estrutura fibrilar, enquanto as fibras de vidro e kevlar-29 têm superfícies bem lisas. A fibra de sisal consiste em várias fibrilas de seção reta hexagonal e com bastante porosidade dentro e entre as fibrilas. A fibra de sisal pode ser comparável à fibra de vidro quando se considera as propriedades específicas, valor da propriedade dividido pelo valor da densidade. Como essas fibras possuem densidades bem diferentes, 2,50 g/cm³ para o vidro e 0,81 g/cm³ para o sisal, o módulo e a resistência específica do sisal resultam ser a metade dos valores do vidro.

Segundo CHAWLA e colaboradores (23), um estudo econômico de qualquer material estrutural deve considerar o preço para obter uma determinada propriedade. Assim, convém definir parâmetros (α e β) que contenham o preço/kg, X , a massa específica, ρ , módulo de elasticidade, E , ou tensão de ruptura, σ .

$$\alpha = \frac{X\rho}{\sigma}$$

$$\beta = \frac{X\rho}{E}$$

Note-se que o aumento do valor do parâmetro α , ou β , indica maiores preços para se obter a propriedade desejada. Com esses parâmetros monta-se a Tabela 3, considerando-se os preços de março de 1994.

Pelo critério da resistência à tração, a ordem de preferência para a escolha das fibras será: sisal, vidro, kevlar e carbono, que é a mesma ordem quando se adota o critério da rigidez.

Tabela 3 - Estudo econômico e comparativo das fibras.

Fibras	X (CR\$/Kg)	$\rho \times 10^3$ (g/m ³)	σ (MPa)	$\alpha \times 10^{-2}$	E (GPa)	$\beta \times 10^{-2}$
Carbono	486.000,00	1,60	1353	586,00	183,67	4,23
Kevlar-29	45.172,00	1,44	2800	23,20	63,00	1,03
Sisal	802,60	0,81	700	0,93	45,50	0,01
Vidro	5.135,00	2,54	350	3,70	75,00	0,17

CHAWLA e colaboradores (23), concluíram que o estudo das propriedades mecânicas das fibras como recebidas, quanto ao módulo de elasticidade e tensão de ruptura, confirmou os valores encontrados na literatura. Baseados nas propriedades específicas e preços, a fibra de sisal parece ser uma candidata muito promissora para o reforçamento de resinas.

Os quatro tipos de fibras (carbono, kevlar, sisal e vidro) realmente melhoraram as propriedades mecânicas da matriz de poliéster. De um modo geral, o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura dos conjugados aumentaram com a fração volumétrica das fibras. Um tratamento superficial da fibra de sisal poderá melhorar a adesão com o poliéster. Convém ressaltar que as demais fibras sofrem um tratamento superficial, dado pelos fabricantes, visando melhorar a adesão com a resina.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

IV.1 - MATERIAIS

A) **MATRIZ** - Foi utilizada como matriz uma resina poliéster insaturada do tipo ortoftálica pré-acelerada, fabricada por Produtos Químicos Elekeiroz S.A. sob o código UC 3620, apresentando as seguintes propriedades:

Aparência (visual)	Líquido âmbar fosco
Viscosidade Brookfield, 20°C, cps	300 - 400
Peso específico a 20°C, g/cm ³	1,10
Índice de acidez, mg KOH/g	25 + 5
Índice de tixotropia	1,20
Tempo de Gel, segundos (1)	900 a 1200

(1) a 25°C, com 1% de peróxido de MEK.

Principais características:

- Cura uniforme e rápida;
- Pequena contração durante a polimerização;
- Excelentes qualidades mecânicas finais;
- Boa resistência aos agentes atmosféricos.

No processo de cura da resina foram utilizados como catalisador e acelerador, respectivamente, o peróxido de 2-butanona e octoato de cobalto a 6% de metal, nas seguintes proporções:

Resina Poliéster	100g.
Peróxido de 2- butanona	1% em peso.
Octoato de cobalto	0,05% em peso.

Para essa formulação foram obtidos:

T(°C)	Tempo de Gel (s)	Tempo de cura (s)
25	900 - 1200	7200

B) **REFORÇO** - Foram utilizados como reforço tecidos e cordões de juta. Os tecidos eram formados pelo entrelaçamento a 90° de fios com diâmetro variando de $1,5 \times 10^{-3}$ a $2,5 \times 10^{-3}$ m. Foram utilizados dois tipos de tecidos, classificados como P. Teórico 340 G.(codificado malha estreita - ME) e P. Teórico 190 G (codificado malha larga - ML).

Os cordões empregados classificados como Fio 10/4 (codificado cordão grosso - CG) e Fio 10/2 (codificado cordão fino - CF), foram obtidos a partir dos mesmos fios utilizados na confecção dos tecidos e, agrupados e torcidos para formar os cordões com diâmetros de $2,5 \times 10^{-3}$ a $3,0 \times 10^{-3}$ m (CG) e $1,5 \times 10^{-3}$ a $2,0 \times 10^{-3}$ m, respectivamente.

Utilizou-se também, fibras de juta brutas onde unicamente o lenho foi extraído.

Outros Materiais:

Estireno	20% para diminuir a viscosidade do poliéster;
Óleo de Silicone	como desmoldante;
Agente de acoplamento: Silano A1100	como agente de acoplamento, na proporção de 2% em peso (em relação ao peso do reforço);
Metanol	para tratamento do reforço juntamente com o silano.
Disco de Corte	para cortar as placas; especificação: Arotec/rpm máx 6600/AA2/P30-45RC;
Lixa para massa	para dar o acabamento dos corpos de prova. Marca 3M/ Modelo 230 U/Nº 120.

IV.2 - MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado o método de moldagem manual (Hand Lay-up). O método de Hand Lay-up é um dos métodos mais populares empregados no processamento de resinas poliéster reforçadas por fibras. É um método barato, prático e versátil que permite a confecção de peças de geometrias simples e de média complexidade em tempo curto e com gastos de ferramental muito reduzidos. Por todas essas razões, é que o método de Hand Lay-up foi o escolhido para a fabricação dos compósitos de Poliéster/Juta desenvolvido nesse trabalho.

IV.2.1 - CORPO DE PROVA REFORÇADO COM AS FIBRAS DE JUTA

A haste de juta batida foi penteada, cortada e pesada. As fibras paralelas umas às outras foram dispostas, posteriormente, no molde de forma unidirecional. O molde consiste de uma chapa de PVC de 0,2 x 0,2 m disposta entre duas chapas de vidro. Na chapa de PVC foram vazados os moldes dos corpos de prova de acordo com os padrões ASTM D-638, conforme mostra a Figura 19.

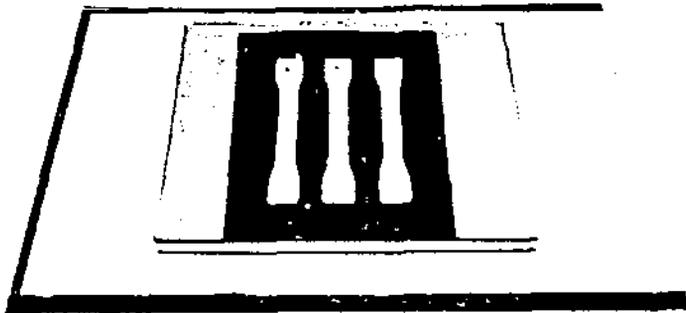


Figura 19 - Molde dos corpos de prova , em PVC - ASTM D-638.

A resina catalisada consistiu de: poliéster, peróxido de 2 - Butanona, solução de octoato de cobalto, em peso, na razão de 100 : 1% : 0,05%. A resina catalisada foi pincelada no molde e as fibras de juta foram colocadas no molde úmido. O ar foi expulso por um trabalho de pincelamento. O poliéster assim moldado, foi deixado a curar sob uma pressão de moldagem constante de 4167 Pa a 25°C e 55 a 60% de umidade relativa, por 24 horas, conforme mostra a Figura 21 d.

Outros corpos de prova foram reforçados com fibras de juta lavadas com água sanitária e, após secos, foram submetidos aos mesmos procedimentos utilizados para as fibras não tratadas anteriormente. Como desmoldante, utilizou-se o silicone.

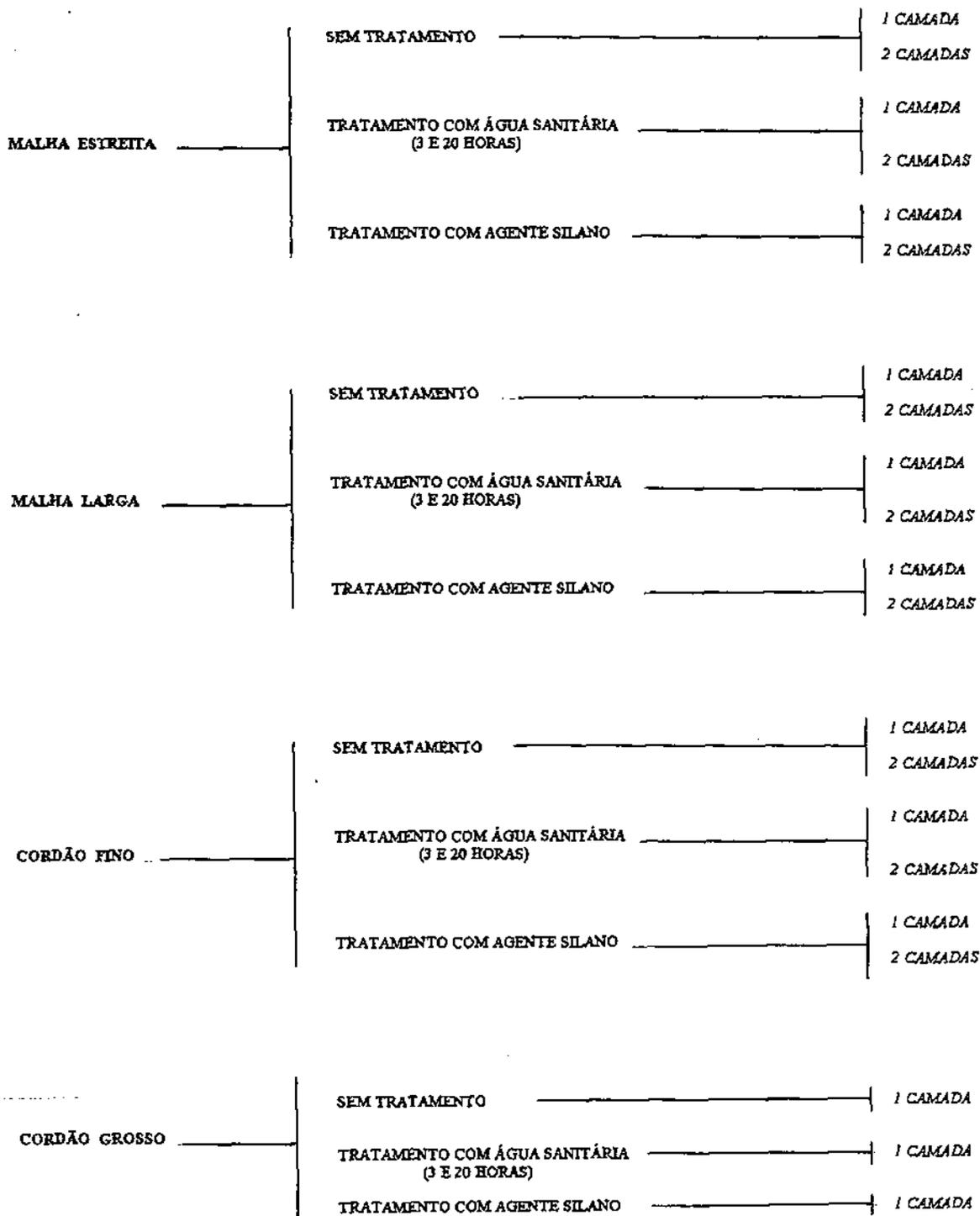
Os corpos de prova, após curados, foram submetidos a um trabalho de acabamento (retirada de rebarbas, lixamento etc.) e analisados quanto às especificações técnicas de aparência e dimensões, de acordo com os procedimentos de padronização ASTM D- 638. Por não se apresentarem de acordo com as especificações requeridas, por apresentarem defeitos como, por exemplo, grande número de vazios, falhas superficiais (tipo rechupes e bolhas), e pela dificuldade de se conseguir uma distribuição das fibras que se adequasse às especificações, os corpos de prova obtidos por esse método não foram submetidos a nenhum tipo de teste.

IV.2.2 - LAMINADOS DE POLIÉSTER/TECIDO DE JUTA PARA CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram confeccionadas placas de laminados de poliéster reforçado com mantas de tecido e de fios de juta. Os reforços consistiram de malha larga (1 e 2 camadas), malha estreita (1 e 2 camadas), mantas de cordão fino (1 e 2 camadas) e cordão grosso (1 camada). Os reforços foram utilizados de quatro maneira: a) sem tratamento, b) tratados

com água sanitária a 20% por 3 horas, c) tratados com água sanitária a 20% por 20 horas e d) tratados com o agente de acoplamento (silano) conforme o esquema.

ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DO REFORÇO



A Tabela 4, que será apresentada no Capítulo V, apresenta o reforço utilizado com codificação. Pode-se identificá-los, seguindo a orientação descrita a seguir:

M - malha

E - estreita

L - larga

Os números 3 e 20 antes dos parênteses indicam o tratamento com hipoclorito de sódio por 3h e por 20 h.

Si - indica que o reforço foi tratado com agente de acoplamento silano.

CF - cordão fino

CG - cordão grosso

O número que aparece entre parênteses se refere ao número de camadas do reforço.

T - tração

O número que acompanha a letra T identifica o corpo de prova selecionado para apresentar os valores das propriedades, uma vez que os valores tabelados para as propriedades mecânicas são valores medianos.

Exemplos:

- a) ME(1) - malha estreita, 1 camada, sem tratamento.
- b) MEL3(1) - malha estreita, 1 camada, lavado com hipoclorito de sódio por 3 horas.
- c) MLSi(2) - malha larga, 2 camadas, tratado com agente silano.
- d) CFL20(2) - cordão fino, 2 camadas, lavado com hipoclorito de sódio por 20 horas.
- e) CG(1) - cordão grosso, 1 camada, sem tratamento.

IV.2.2.1 - REFORÇOS DE TECIDOS DE JUTA

Os tecidos foram cortados nas dimensões 0,12 x 0,17 m utilizadas segundo três classes, quais sejam:

a) TECIDOS SEM TRATAMENTO

Os tecidos foram cortados como recebidos da fábrica e pesados.

b) TECIDOS TRATADOS COM ÁGUA SANITÁRIA

Os tecidos foram submersos em hipoclorito de sódio (água sanitária) a 20% por 3 horas e por 20 horas, e postos a secar por 24 horas nas condições do ambiente, ou seja, 25°C e umidade relativa de 55 a 60%. Em seguida, foram cortados e pesados.

c) TECIDOS TRATADOS COM AGENTE SILANO

Os tecidos foram tratados com uma solução de silano (20% em peso) em metanol e água na proporção de 9:1, por 24 horas, deixados a secar a 25°C e umidade relativa de 55 a 60% e, em seguida, foram cortados e pesados.

IV.2.2.2 - TECIDOS DE FIOS DE JUTA

Os fios foram tecidos em uma tábua de 0,30 x 0,25 x 10⁻³ m com duas fileiras de pregos distantes uma da outra de 0,17 m. Cada fileira era composta de pregos distando entre si de 3 x 10⁻³ m. O tecido resultante apresentou fios dispostos unidirecionalmente. Os fios, assim dispostos, foram presos com fita adesiva, que foi retirada no momento em que tais tecidos foram dispostos no molde. Os tecidos foram retirados do molde e pesados.

IV.2.2.3 - PREPARAÇÃO DO MOLDE

Os moldes consistem de placas de PVC (de 3 x 10⁻³ a 4 x 10⁻³ m espessura), vazadas, dispostos entre duas placas de vidro como mostra a Figura 20. Desmoldante de silicone foi utilizado ao longo de todas as superfícies de contato.

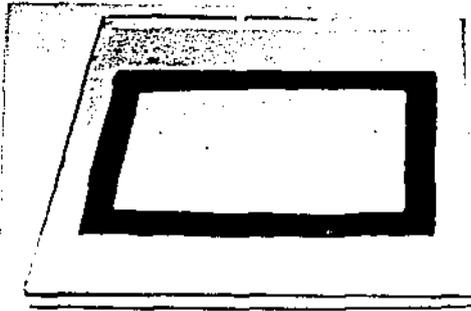


Figura 20 - Molde das placas do compósito, em PVC.

IV.2.2.4 - PREPARAÇÃO DA RESINA

A resina de poliéster foi catalisada com peróxido de 2 - butanona e solução de octoato de cobalto, na razão 1% e 0,05%, em relação à resina, respectivamente. Foram adicionados à resina de poliéster 20% de estireno, com o objetivo de diminuir a viscosidade do poliéster, facilitando, dessa forma, a eliminação dos gases, geradores de vazios, e para facilitar sua absorção pelo reforço.

IV.2.2.5 - INCORPORAÇÃO DA RESINA AO REFORÇO

Colocou-se o molde sobre uma placa de vidro. A resina catalisada foi pincelada no molde, os tecidos de fios foram colocados no molde e resina adicional foi pincelada e o ar expulso por pressão de pincelamento. As camadas subseqüentes foram adicionadas na ordem acima descrita e a placa de vidro superior foi colocada gradativa e vagarosamente, iniciando-se este processo pela lateral esquerda do molde, provocando a expulsão do ar. Terminado o processo, o poliéster, assim reforçado, foi posto a curar sob uma pressão de moldagem de 4.167 Pa, conforme mostra a Figura 21.



21(a)



21(b)



21(c)



21(d)

Figura 21. a) Pincelamento da resina; b) Colocação do reforço; c) Pincelamento de resina adicional e fechamento do molde; d) Colocação do peso de 50 N, impondo ao molde uma pressão de moldagem de 4.167 Pa.

IV.2.2.6 - CURA DA RESINA

A cura da resina deu-se a temperatura ambiente sob a ação do catalisador e do acelerador. O tempo de cura foi de aproximadamente 7200 segundos, com a retirada da placa em tornode 18000 segundos.

IV.2.2.7 - DESMOLDAGEM

Após a cura da resina (matriz) a placa foi retirada do molde e analisada quanto aos aspectos gerais de especificação, isto é, espessura e defeitos (externos e internos).

IV.2.2.8 - CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA

As placas foram pesadas e medidas para a verificação exata da área e definição do teor de reforço. Sobre elas foram desenhados os moldelos dos corpos de prova, segundo o padrão ASTM D-638 método I. Em seguida foram cortadas, com o disco de corte, em lâminas de largura próximas às dimensionadas para os corpos de prova, conforme mostram as Figuras 22 e 23.

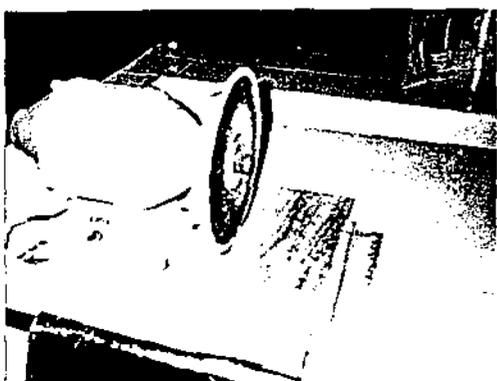


Figura 22 - Disco de corte.

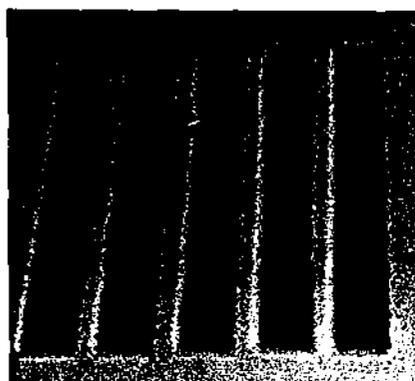


Figura 23 - Lâminas do compósito.

As lâminas foram esmeriladas seguindo os contornos dos desenhos dos corpos de prova, conforme mostra a Figura 24.

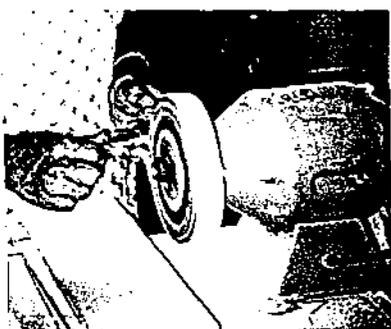


Figura 24 - Esmerilamento das lâminas.

Foram obtidos, dessa forma, os corpos de prova sem acabamento, Figura 25.

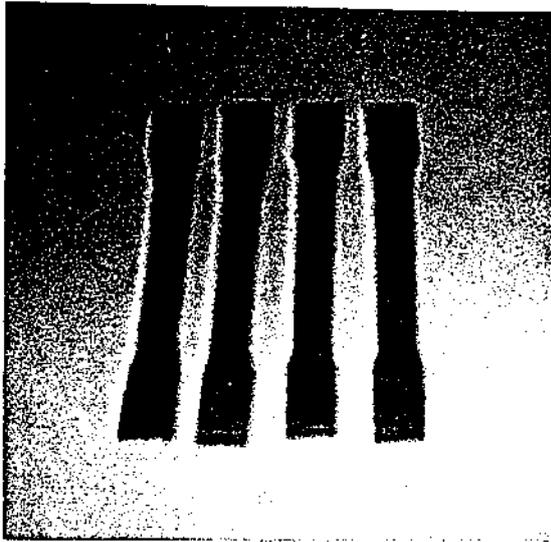


Figura 25 - Corpos de prova sem acabamento.

O acabamento final dos corpos de prova foi executado com a utilização de uma lima, torno de bancada e lixa, Figuras 26 e 27.

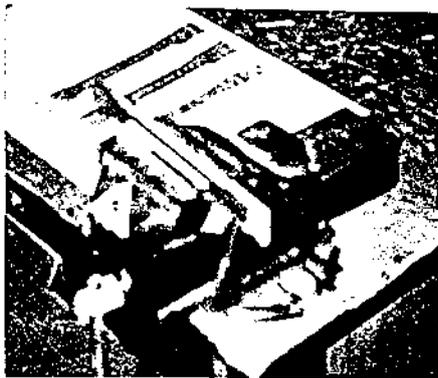


Figura 26 - Torno de bancada



Figura 27 - Corpos de prova acabados.

IV.2.2.9 - TESTE DE TRAÇÃO E FLEXÃO

As propriedades mecânicas de tração e flexão foram determinadas na máquina universal de ensaios TESTOMETRIC MICRO 350, fornecida pela KARL SCHRODER acoplada a um micro computador, e os testes realizados segundo as normas ASTM D-638 (tração) e ASTM D-790 M(flexão). A Figura 28 mostra a máquina universal de ensaios utilizada.

Foram testados, em tração, 5 corpos de prova com velocidade de teste de $8,3 \times 10^{-3}$ m/s (0,5 mm/min). Em flexão, 5 corpos de prova foram testados. A velocidade do teste de flexão foi de $2,83 \times 10^{-3}$ m/s (1,7 mm/min), e a razão $L/d = 16$ para 1. A deflexão líquida verificada, foi o resultado da deflexão do teste com $\text{span} = 64 \times 10^{-3}$ m (64 mm) menos a deflexão relativa à flexibilidade (Compliance) da máquina de teste (anexo 3), garras, etc.

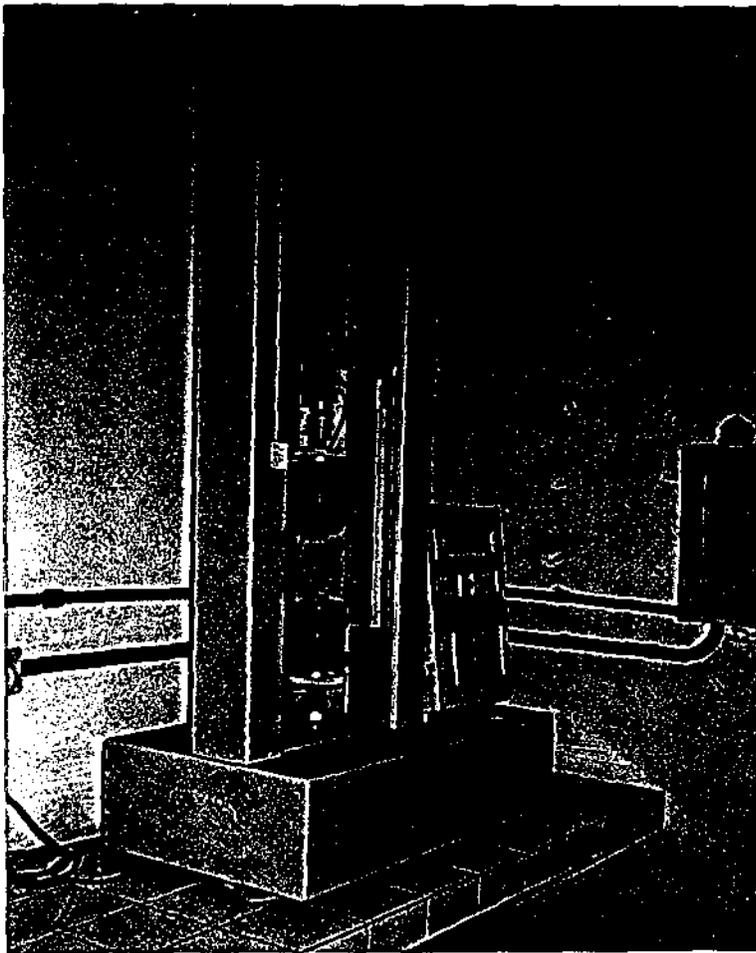


Figura 28 - Máquina Universal de ensaios Testometrics Micro 350.

V - RESULTADOS E DISCUSSÃO

V.1 - COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS E DESENVOLVIMENTO

Na primeira etapa deste trabalho foi estudada a adequação da juta ao compósito através de um teste de absorção da resina poliéster pela juta. Havia naquele momento, devido a semelhança física entre as fibras de sisal e de juta, o receio de se enfrentar as mesmas dificuldades apresentadas pelo sisal, isto é, suas fibras absorvem mal a resina de poliéster, dificultando a fabricação de laminados pelo processo de moldagem manual, RABELO (24). Felizmente, o que se constatou foi uma característica bastante favorável da juta quanto à penetração da resina entre as fibras (absorção) resultando em um molhamento eficiente.

Assim, passou-se a confeccionar placas do compósito Poliéster/Juta, além de corpos de prova normatizados, utilizando-se a fibra de juta bruta, isto é, apenas com a retirada do lenho, sem qualquer manufatura posterior. Nesta etapa, surgiram uma série de problemas que dificultaram a obtenção de corpos de prova que atendessem às especificações técnicas necessárias à análise do compósito desenvolvido.

A primeira dificuldade encontrada estava ligada à estrutura física da fibra bruta adquirida. Não se conseguiu a distribuição uniforme desta ao longo de toda a seção do corpo de prova, pois ao ser impregnada pela resina de poliéster, as fibras de juta, que haviam sido penteadas, cortadas e pesadas, acumulavam-se, ou nos cantos ou no centro dos corpos de prova, não oferecendo, desta forma, um parâmetro de comparação para a análise do compósito desenvolvido. Somando-se a isso, havia a dificuldade de se obter um fio contínuo, pois a estrutura da fibra, não uniforme e de diâmetro bastante reduzido, quebrava-se, impedindo a criação de um sistema de alinhamento das fibras dentro dos corpos de prova. Entendeu-se, então, que trabalhar com a juta tal como foi recebida, seria economicamente inviável, já que a sua utilização implicaria num trabalho prévio de estruturação da fibra, acarretando uma elevação de custo dos projetos.

Decidiu-se, então, utilizar a juta na forma de tecidos e de fios como a solução para atender aos objetivos deste trabalho. Isto, do ponto de vista econômico, é bastante interessante, pois elimina as dificuldades encontradas quanto à uniformidade dos corpos

de prova e, mais importante, pensando-se na produção de partes e peças de produtos em larga escala, encontra-se com facilidade a matéria-prima na forma exigida para utilização imediata.

Outras dificuldades serão descritas a seguir, com a indicação de suas possíveis causas e a solução para cada uma delas:

Grande número de vazios

- Possíveis causas:
- Tempo de aplicação da resina;
 - Viscosidade da resina;
- Soluções:
- Não aplicar a resina imediatamente após a sua mistura;
Esperar 300s para facilitar a saída dos gases;
 - Eliminar bolhas com o auxílio de um pincel (pressão);
 - Diminuir a viscosidade da resina adicionando 20% de estireno.

Grande número de vazios superficiais

- Possível causa:
- Quantidade excessiva de silicone (desmoldante).
- Solução:
- Aplicação de uma camada fina e uniforme de silicone.

Rechupes e falhas superficiais

- Possíveis causas:
- Falha na montagem do molde (possibilidade de vazamento pela parte inferior do molde);
 - Quantidade de resina insuficiente;
 - Pouca pressão sobre o molde cheio.
- Soluções:
- Aplicar uma demão de resina com pincel para vedar o contato das partes do molde;
 - Aumentar a quantidade de resina;
 - Aumentar a pressão sobre o molde.

Além disso, a utilização do molde mostrado na Figura 19, apresentou defeitos nas bordas dos corpos de prova, conforme mostra a Figura 29.

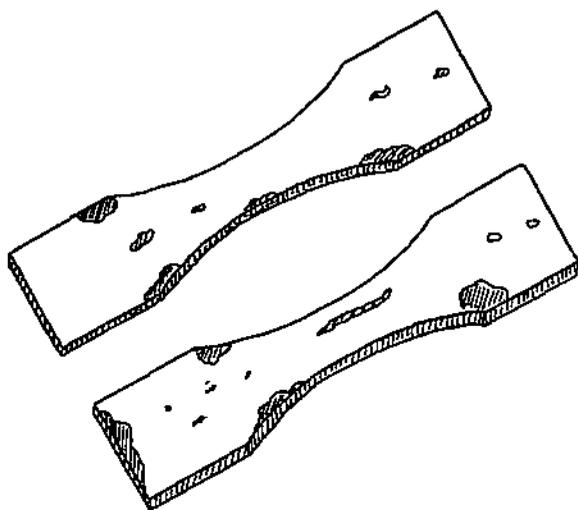


Figura 29 - Defeitos nas bordas dos corpos de prova.

Com a utilização do reforço na forma de tecidos e fios, ficou ainda mais difícil trabalhar com o molde supracitado. Assim, decidiu-se confeccionar placas do compósito poliéster/juta de onde foram retirados os corpos de prova. Com as placas, foi possível confeccionar corpos de prova sem a presença de defeitos externos e sem a presença de vazios que pudessem ser observados, a não ser com o auxílio de microscópio.

A Tabela 4 identifica as placas do compósito Poliéster/Juta, indicando suas características principais. Foram determinadas as densidades teórica e aparente da placa. A diferença entre estes valores era esperada e, em geral, situou-se em torno de 13%. Foram determinadas também as frações volumétricas do reforço, cuja memória de cálculos está apresentada no anexo 1.

Corpos de prova produzidos unicamente com a resina poliéster com 20% de estireno, foram testados em tração e apresentaram os valores 26,9 MPa para resistência à tração na ruptura, e 1,53 GPa para o Módulo de Elasticidade. Estes valores foram utilizados nos cálculos da resistência à tração teórica e Módulo de Elasticidade teórico utilizando a regra das misturas. Os valores de resistência à tração na ruptura (270,5 MPa) e Módulo de Elasticidade (21,1 GPa) da fibra de juta, foram retirados da bibliografia.

CODIGO DO REFORÇO	TIPO DE REFORÇO (JUTA)	Nº DE CAMADAS	DENSIDADE DA PLACA (KG/M³)*10-3	DENSIDADE TEORICA DA PLACA (KG/M³)*10-3	MASSA DO COMPOSITO	FR.VOL DO REFORÇO	FR.VOL.TEOR. DO REFORÇO	TRATAMENTO DO REFORÇO
ME (1)	Tecido Malha Estreita	1	1,169	1,311	76,3957	0,0475	0,0533	NENHUM
M.E.L3(1)	Tecido Malha Estreita	1	1,31	1,314	105,5416	0,0689	0,0691	LAV.AG.SANIT. 3h
M.E.L 20(1)	Tecido Malha Estreita	1	1,164	1,314	82,1	0,0622	0,0702	LAV.AG.SANIT.20h
M.E.Si(1)	Tecido Malha Estreita	1	1,172	1,314	94,8759	0,0603	0,0675	AGENTE SILANO
ME (2)	Tecido Malha Estreita	2	1,159	1,326	74,49	0,113	0,1292	NENHUM
M.E.L3h(2)	Tecido Malha Estreita	2	1,262	1,3205	80,2386	0,0979	0,1026	LAV.AG.SANIT. 3h
M.E.L 20h(2)	Tecido Malha Estreita	2	1,171	1,327	74,5017	0,1201	0,1361	LAV.AG.SANIT.20h
M.E.Si(2)	Tecido Malha Estreita	2	1,191	1,326	89,4431	0,1146	0,1275	AGENTE SILANO
ML (1)	Tecido Malha Larga	1	1,155	1,306	74,1241	0,0266	0,0301	NENHUM
ML3(1)	Tecido Malha Larga	1						LAV.AG.SANIT. 3h
ML 20(1)	Tecido Malha Larga	1	1,281	1,3055	103,2515	0,027	0,0275	LAV.AG.SANIT.20h
MLSi(1)	Tecido Malha Larga	1	1,194	1,305	78,39	0,0265	0,029	AGENTE SILANO
ML (2)	Tecido Malha Larga	2	1,202	1,309	83,8881	0,0446	0,0485	NENHUM
ML3(2)	Tecido Malha Larga	2	1,085	1,31	80,4683	0,0463	0,0497	LAV.AG.SANIT. 3h
ML20(2)	Tecido Malha Larga	2	1,186	1,313	90,9077	0,0576	0,0637	LAV.AG.SANIT.20h
MLSi(2)	Tecido Malha Larga	2	1,2681	1,3115	95,8686	0,0557	0,0576	AGENTE SILANO
CF (1)	Cordao Fino Fio 10/2	1	1,282	1,305	85,2356	0,0249	0,0254	NENHUM
C.F.L3(1)	Cordao Fino Fio 10/2	1	1,2963	1,3056	82,203	0,0281	0,0283	LAV.AG.SANIT. 3h
C.F.L20(1)	Cordao Fino Fio 10/2	1	1,169	1,305	88,215	0,0236	0,0264	LAV.AG.SANIT.20h
C.F.Si(1)	Cordao Fino Fio 10/2	1	0,929	1,306	72,1995	0,0253	0,0324	AGENTE SILANO
C.F (2)	Cordao Fino Fio 10/2	2	1,195	1,312	81,476	0,0527	0,0578	NENHUM
C.F.L3(2)	Cordao Fino Fio 10/2	2	1,225	1,308	91,0987	0,0368	0,0382	LAV.AG.SANIT. 3h
C.F.L20(2)	Cordao Fino Fio 10/2	2	1,272	1,308	102,5743	0,0401	0,0413	LAV.AG.SANIT.20h
C.F.Si(2)	Cordao Fino Fio 10/2	2	1,18	1,309	92,7417	0,0418	0,0464	AGENTE SILANO
C.G (1)	Cordao Grosso Fio 10/4	1	1,177	1,324	79,6684	0,1051	0,1182	NENHUM
C.G.L3(1)	Cordao Grosso Fio 10/4	1	1,149	1,321	88,2617	0,0902	0,1037	LAV.AG.SANIT. 3h
C.G.L 20(1)	Cordao Grosso Fio 10/4	1	1,209	1,319	99,2551	0,0662	0,0941	LAV.AG.SANIT.20h
C.G.Si(1)	Cordao Grosso Fio 10/4	1	1,222	1,318	101,2151	0,0856	0,0923	AGENTE SILANO

Tabela. 4 - Identificação das Placas do Compósito
Poliéster/Juta: Características Principais.

As densidades aparente e teórica, foram determinadas segundo as Equações 4a e 4b.

$$D = \frac{M_c}{V_c} \quad (4a)$$

onde:

D - densidade aparente do compósito.

M_c - massa do compósito

V_c - volume do compósito

$$D_t = \frac{M_c}{\frac{m_f}{d_f} + \frac{m_r}{d_r}} \quad (4b)$$

onde:

D_t - densidade teórica do compósito

M_c - massa do compósito

m_f - massa do reforço

m_r - massa da matriz

d_f - densidade do reforço

d_m - densidade da matriz

Os valores das densidades do reforço (juta) e da matriz (poliéster) são teóricos, e foram retirados da literatura e valem 1,5 e 1,3 g/cm³, respectivamente.

V.2 - COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA - PROPRIEDADES MECÂNICAS.

V.2.1 - REFORÇO NÃO TRATADO - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para as propriedades mecânicas do compósito Poliéster/Juta para todos os tipos de laminados produzidos. Os códigos

empregados para as amostras são os mesmos descritos anteriormente na Tabela 4. Uma vez que os valores tabelados para as propriedades mecânicas são valores medianos, resolveu-se também identificar o corpo de prova específico selecionado, daí a indicação T1, T2, T3, T4 ou T5, das amostras.

Curvas representativas de tração e flexão originais de alguns corpos de prova são apresentadas no anexo 2. Os valores reportados nestas tabelas referem-se aos valores medianos. É importante notar que num teste de tração, as fibras que efetivamente suportam o esforço são aquelas alinhadas na direção deste esforço. Assim sendo, decidiu-se calcular a fração volumétrica efetiva do reforço, baseando-se no número e comprimento dos fios longitudinais de cada amostra testada. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 5. Naturalmente que, neste caso, variações significativas (entre a fração volumétrica efetiva e a adicionada) ocorrem com o reforço na forma de malha.

Os resultados indicam que, com o aumento da fração volumétrica efetiva do reforço no compósito Poliéster/Juta, tanto o módulo de elasticidade (E) como a resistência mecânica (σ_r) aumentam. Às vezes, esta tendência não se faz muito nítida devido à pequena variação entre as frações volumétricas efetivas (corpos de prova ME(1)-T4, ME(2)-T3, ML(1)-T3 e ML(2)-T5) dos reforços nos corpos de prova. Nos corpos de prova do tipo CF(1)-T3, CF(2)-T2 e CG(1)-T4, o aumento das propriedades módulo de elasticidade e resistência à tração é mais nítido. Isto era esperado, conforme evidenciado nos cálculos efetuados para a determinação da resistência à tração e módulo de elasticidade teóricos. O mesmo tipo de comportamento foi verificado por CHAWLA E BASTOS (18), em estudos referentes às propriedades de laminados unidirecionais de Poliéster/Juta.

Para os corpos de prova do compósito Poliéster/Juta com reforço não tratado, a deformação na fratura (alongação de fratura) foi pouco afetada pela variação da fração volumétrica efetiva do reforço no compósito (a diferença percentual máxima encontrada entre os valores de deformação na fratura foi de mais ou menos 25%). Tanto a fibra quanto a matriz são bastante rígidas e apresentam baixa alongação na ruptura. Portanto, pequenas variações no teor de reforço pouco afetam esta propriedade.

A variação entre os valores teóricos do módulo de elasticidade e da resistência mecânica à tração e os valores determinados experimentalmente, em geral, não foi significativa. Para o módulo de elasticidade, a diferença percentual máxima verificada, foi de 17%. A máxima diferença verificada entre os valores de resistência mecânica teórica e experimental foi de 29%. Considerando que os valores teóricos do módulo de elasticidade e resistência à tração foram determinados pela regra das misturas, essa diferença não deve ser considerada excessiva, uma vez que as regras das misturas

pressupõem que a interface entre as fases é perfeita (livre de defeitos), com perfeita adesão e pressupõe também deformação proporcional dos componentes das fases. Tudo isso tende a superestimar as propriedades teóricas.

Os corpos de prova do compósito Poliéster/Juta produzidos com reforços do tipo CF(1)-T3, CF(2)-T2 e CG(1)-T4, apresentam valores de módulo de elasticidade e resistência mecânica experimentais superiores aos valores teóricos. As diferenças entre os valores experimentais e teóricos podem ser atribuídos tanto a pequenos erros de medidas, que são inevitáveis, como também estarem relacionados com as propriedades mecânicas individuais da fibra de juta (reforço) e da matriz (poliéster), e falta de homogeneidade dos tecidos que apresentam variações perceptíveis no diâmetro dos fios. Uma vez que as propriedades mecânicas das fibras não foram determinadas experimentalmente, os valores usados nos cálculos foram obtidos de referências bibliográficas e um valor médio para o diâmetro dos fios foi utilizado nos cálculos teóricos.

Os resultados obtidos neste trabalho, Tabela 5, apresentam o mesmo comportamento e, inclusive, com valores numéricos próximos aos obtidos por SRIDHAR e colaboradores (22) que estudaram o comportamento de compósitos unidirecionais de Poliéster/Juta.

AMOSTRA	C. PROVA	FR.VOL DO	Nº DE FIOS	FR.VOLEFETIVA	R.TRAÇÃO MEDIDA	R.TRAÇÃO	R.TRAÇÃO TEÓR	MÓD.YOUNG	MÓD.YOUNG	DEFORMAÇÃO
	SELECIONADO	REFORÇO	EFETIVOS	DO REFORÇO	NA RUPTURA	TEÓRICA MÁX	NA RUPTURA	MEDIDO	TEÓRICO	NA FRATURA
					(MPa)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(%)
ME.(1)	T4	0,0475	6	0,0317	32,122	41,4812	34,60627	2,0465	2,15278975	2,7824
M.E.L3(1)	T3	0,0689	5	0,02643	21,465	40,23748	33,325133	2,1668	2,049669025	1,795
M.E.L20(1)	T1	0,0922	5	0,02643	27,736	40,23748	33,325133	1,5296	2,049669025	2,9118
M.E.Si(1)	T1	0,0683	5	0,02643	27,579	40,23748	33,325133	1,8399	2,049669025	2,2943
M.E.(2)	T3	0,113	9	0,04758	29,385	45,22888	38,466698	2,1668	2,46352165	2,1863
M.E.L3h(2)	T1	0,0979	10	0,05287	38,205	46,47732	39,752697	2,7949	2,567033725	1,7304
M.E.L20h(2)	T1 + T2	0,1201	11	0,05287	24,818	46,47732	39,752697	1,6625	2,567033725	1,7265
M.E.Si(2)	T4	0,1146	9	0,04758	26,002	45,22888	38,466698	1,6664	2,46352165	1,9174
ML(1)	T3	0,0266	2	0,01057	24,182	36,48452	29,469567	1,634	1,739328475	1,8641
ML3(1)						34	26,9		1,5325	
ML20(1)	T2	0,027	3	0,01586	23,803	37,74296	30,755566	1,5789	1,84284055	1,8397
MLS(1)	T1	0,0265	3	0,01586	25,294	37,74296	30,755566	1,563	1,84284055	2,7519
ML(2)	T5	0,0446	4	0,0211	25,021	38,9796	32,02941	2,348	1,94537425	2,3154
ML3(2)	T4	0,0411	4	0,0211	33,398	38,9796	32,02941	2,4243	1,94537425	1,5217
ML20(2)	T2	0,0576	4	0,0211	22,473	38,9796	32,02941	1,1485	1,94537425	1,586
MLS(2)	T1	0,0557	3	0,02064	23,038	38,87104	31,917584	1,48	1,9363732	1,6525
CF.(1)	T3	0,0249	6	0,0317	46,664	41,4812	34,60627	2,3865	2,15278975	2,087
CF.L3(1)	T2	0,0281			25,285	34	26,9		1,5325	
CF.L20(1)	T2	0,0236	4	0,0211	39,2	38,9796	32,02941	1,1601	1,94537425	2,7928
CF.Si(1)	T4	0,023	5	0,0258	41,351	40,0888	33,17198	1,4495	2,0373415	3,1253
CF.(2)	T2	0,0527	10	0,05287	56,349	46,47732	39,752697	2,5809	2,567033725	2,1391
CF.L3(2)	T1 + T5	0,0368	7	0,037	48,555	42,732	35,8947	1,9099	2,2564975	2,252
CF.L20(2)	T1 + T2	0,0401	10	0,05287	37,662	46,47732	39,752697	1,8222	2,567033725	3,18
CF.Si(2)	T4	0,0418	8	0,04229	45,736	43,98044	37,180699	1,5788	2,36009575	2,9456
CG.(1)	T4	0,1051	45	0,08724	50,669	54,58864	48,108044	3,3788	3,2395687	2,0913
CG.L3(1)	T3	0,0902	4	0,0846	58,723	53,9656	47,46626	3,2263	3,1879105	2,1565
CG.L20(1)	T1	0,0862	4	0,0846	43,635	53,9656	47,46626	1,8222	3,1879105	2,6734
CG.Si(1)	T5	0,0956	4	0,0846	50,806	53,9656	47,46626	1,71	3,1879105	3,1722

Tabela.5 - Módulo de elasticidade em tração, resistência à tração na fratura e alongação de fratura do compósito poliéster /juta versus o tipo de reforço/tratamento usado.

V.2.2 - REFORÇO TRATADO - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO

V.2.2.1 - REFORÇO TRATADO COM HIPOCLORITO DE SÓDIO.

Serão discutidos aqui os efeitos dos tratamentos com hipoclorito de sódio (água sanitária) sobre os reforços (tecidos de juta) do compósito Poliéster/Juta. As propriedades mecânicas dos compósitos com reforços tratados por 3 horas e por 20 horas, são apresentadas na Tabela 5.

Ao observar o efeito do tratamento do reforço com solução de hipoclorito de sódio (água sanitária) na resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos, fica evidente que o tratamento por 3 horas teve efeito discreto enquanto que o tratamento mais prolongado (20 horas) causou um decréscimo significativo destas propriedades, principalmente no que se refere ao módulo de elasticidade.

Assim, para as fibras tratadas por 20 horas em solução de hipoclorito de sódio, observa-se reduções no módulo de elasticidade entre 20 e 45%, quando comparadas ao módulo de elasticidade do compósito Poliéster/Juta de reforço não tratado. É sabido que, materiais celulósicos sujeitos a tratamentos ácidos ou básicos sofrem degradação por hidrólise, causando uma redução acentuada de peso molecular, SHREVE e BRINK (25) e TEIXEIRA DE CARVALHO (26). Normalmente, quando o objetivo final é degradar materiais celulósicos, utiliza-se soluções ácidas ou básicas fortes e temperaturas e pressões elevadas, SHREVE e BRINK (25).

No cálculo teórico do módulo de elasticidade do compósito, o módulo de elasticidade da fibra (reforço) igual a 21,1 GPa, foi obtido através de pesquisa bibliográfica; já o poliéster foi testado em tração, e apresentou o valor do módulo igual a 1,53 GPa.

A diferença entre o módulo de elasticidade teórico e o experimental, é maior nos corpos de prova produzidos com a fibra (reforço) lavada durante 20 horas em hipoclorito de sódio, o que parece confirmar a hipótese de que a fibra tenha sido degradada, e/ou que a interface tenha sido enfraquecida.

As condições de tratamento utilizadas no presente trabalho foram bem mais amenas (ácido diluído, temperatura e pressão ambientes) e, portanto, era esperado um ataque leve da fibra favorecesse o agarramento mecânico na interface fibra/matriz provocando melhoria nas propriedades finais do compósito. Este aumento na resistência poderia ser discreto ou não a depender do grau de adesão e/ou degradação da fibra. Os

dados experimentais indicam que, efetivamente, o tratamento curto (3 horas) pouco afetou as propriedades mecânicas do compósito, enquanto que o longo (20 horas), causou redução significativa nestas propriedades. É provável que neste caso a fibra tenha sido bastante degradada, o que explicaria a queda nas propriedades finais do compósito. É também possível que o tratamento tenha afetado (enfraquecido) a interface fibra/matriz, provocando o mesmo efeito. Nenhuma destas duas hipóteses foi examinada experimentalmente.

V.2.2.2 - REFORÇO TRATADO COM AGENTE SILANO

Na tabela 5 pode-se observar as propriedades mecânicas do compósito Poliéster/juta produzido com reforço tratado com agente silano durante 24 horas.

O efeito do tratamento do reforço com agente silano, no módulo de elasticidade do compósito Poliéster/Juta foi semelhante ao observado para o compósito Poliéster/Juta, produzido com reforço tratado com hipoclorito de sódio durante 20 horas. Verificou-se uma queda no módulo de elasticidade do compósito entre 10 e 50 %. De certo modo, isto foi surpreendente já que se esperava que os grupos funcionais reagissem com os grupos OH da fibra celulósica (juta), favorecendo a formação de uma interface forte. Na realidade, pode-se ter várias explicações para os dados obtidos. Todas elas implicam na não reação ou má adesão fibra/matriz. Agentes de acoplamento tipo silano são largamente empregados em compósitos poliméricos à base de poliolefinas e poliamidas/cargas naturais, visando promover o desenvolvimento de uma interface forte.

O agente de acoplamento aqui empregado (Silano A-1100 produzido pela Union Carbide) é um silano organofuncional de terminação química, capaz de reagir com uma variedade de resinas termoplásticas, termofixas e elastoméricas. É possível que, sob as condições experimentais empregadas a reação não tenha ocorrido. Não há razão para que o agente de acoplamento pudesse causar a degradação do reforço. Assim sendo, a queda de propriedades é atribuída à não reação do agente com a fibra, e à formação de uma terceira fase no compósito. Fase esta gerada pelo agente de acoplamento que tem peso molecular baixo, é líquido e, portanto não apresenta resistência mecânica. Esta substância agiria, então, como um lubrificante, aumentando a elongação à ruptura e, portanto, reduzindo a tensão e pequeno efeito no módulo do compósito, BOLETIM DA UNION CARBIDE (27).

Na Tabela 5 observa-se que apesar do aumento da fração volumétrica efetiva do reforço no compósito Poliéster/Juta, amostras ML(1)-T3 e MLSi(1)-T1, o efeito do

tratamento com agente silano foi mais significativo (MLSi(1)-T1) provocando, ainda, um decréscimo em torno de 5% no módulo de elasticidade do compósito.

Do mesmo modo, observa-se, ao se utilizar a regra das misturas, que à medida que a fração volumétrica efetiva do reforço no compósito Poliéster/Juta aumenta, o efeito do tratamento com agente silano torna-se mais significativo sobre o módulo de elasticidade.

O efeito do tratamento do reforço (juta) com agente silano na resistência mecânica à tração na fratura do compósito Poliéster/Juta foi semelhante ao observado para o compósito Poliéster/Juta produzido com reforço tratado com hipoclorito de sódio por 20 horas. Entretanto, com o tratamento com agente silano, a queda na resistência mecânica foi menor (a diferença máxima verificada foi de mais ou menos 15%). Aqui, também, verifica-se que o acréscimo da fração volumétrica tende a provocar um efeito maior na resistência mecânica do compósito.

A elongação de fratura tende a ser maior no compósito Poliéster/Juta produzido com o reforço tratado com agente silano. Esta tendência é mais nítida nas amostras MLSi(1)-T1, MLSi(2)-T1, CFSi(1)-T4, CFSi(2)-T4 e CGSi(1), Tabela 5.

Estes resultados tendem a confirmar a hipótese de que o tratamento com agente silano, durante 24 horas, submetidos ao reforço (juta) usado na produção do compósito, tenha implicado na não reação ou má interface fibra/matriz, daí a queda das propriedades ligadas à rigidez do sistema.

Conclui-se este sub-item (V.2.2.2) com a Tabela 6, onde podem ser observados os valores específicos das propriedades de tração do compósito Poliéster/Juta desenvolvido versus o tipo de reforço e o tratamento usado (hipoclorito de sódio e/ou agente silano).

Nas Figuras 30 e 31 pode-se observar a variação do módulo de elasticidade em tração e a resistência à tração na ruptura, do compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço e o tratamento usado (hipoclorito de sódio e/ou agente silano), através da representação por diagrama de barras.

V.2.3 - COMPÓSITO POLIÉSTER/JUTA - PROPRIEDADES DE FLEXÃO

Na Tabela 7, pode-se observar as propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster/Juta desenvolvido. Foram determinados os valores específicos de resistência à flexão e o módulo de flexão (N.m/Kg), com o objetivo de se apresentar uma estimativa de custo entre os compósitos com reforço de tecido de fibra de vidro, sisal e juta. Na determinação destes valores específicos, usou-se, nos cálculos, as frações volumétricas efetivas do reforço.

Nas Figuras 32 e 33, pode-se observar através do diagrama de barras a variação do módulo de elasticidade em flexão do compósito Poliéster/Juta, versus tipo de reforço e tratamento usado no mesmo. Uma vez que os resultados obtidos estão bastante próximos uns dos outros, mesmo para tratamentos diferentes submetidos aos reforços, analisar-se-á os mesmos sem separá-los por sub-ítem.

A variação da fração volumétrica efetiva do reforço no compósito Poliéster/Juta produzido com reforço não tratado (ME(1)-F1, ME(2)-F2, ML(1)-F3, ML(2)-F1, CF(1)-F4, CF(2)-F2 e CG(1)-F2), pelos resultados obtidos não teve um efeito mensurável sobre o módulo de elasticidade em flexão e/ou sobre a resistência à flexão do compósito Poliéster/Juta produzidos, Tabela 7 e Figuras 32 e 33. Pode-se atribuir esse comportamento ao fato de que em ensaios de flexão, a tensão máxima ocorre nas camadas superficiais do corpo de prova, enfatizando deste modo as propriedades da superfície do compósito, sendo nulo o esforço na linha neutra.

Para corpos de prova finos (de pequena espessura) este efeito é ainda mais significativo e, portanto, a participação efetiva do reforço nas propriedades mecânicas de flexão tende a ser menor nos laminados finos. Por outro lado, quanto menor a concentração do reforço, menor o efeito desta concentração sobre as propriedades de flexão.

Pelos mesmos motivos, supõe-se que o efeito do tratamento com hipoclorito de sódio ou com o agente silano, submetido ao reforço, nas propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster/Juta foi pequeno. Em geral, a diferença entre as propriedades foi inferior a 10%.

Portanto, acredita-se que a resposta mais provável para os resultados obtidos, nos ensaios de flexão, seja a discutida acima.

AMOSTRA	C. PROVA	FR.VOL	FR.VOLEFETIVA	R.T.P./DENS.	R.T.T.M/DENS.T.	R.T.T.R/DENS.T.	M.Y./DENS.	M.Y.T./DENS.T.
	SELECIONADO	DO REFORÇO	DO REFORÇO	(KN ² M/Kg)	(KN ² M/Kg)	(KN ² M/Kg)	(MN ² M/Kg)	(MN ² M/Kg)
M.E.(1)	T4	0.0475	0.0317	27.478	31.641	26.397	1.749	1.642
M.E.L3(1)	T3	0.0689	0.02643	16.385	30.622	25.362	1.654	1.559
M.E.L20(1)	T1	0.0622	0.02643	23.828	30.622	25.361	1.314	1.559
M.E.Si(1)	T1	0.0603	0.02643	23.532	30.622	25.362	1.569	1.559
M.E.(2)	T3	0.113	0.04758	25.354	34.109	29.009	1.869	1.858
M.E.L3(2)	T1	0.0979	0.05207	30.274	35.197	30.104	2.215	1.944
M.E.L20(2)	T1 + T2	0.1201	0.05207	21.184	35.024	29.957	1.419	1.934
M.E.Si(2)	T4	0.1146	0.04758	21.832	34.109	29.009	1.399	1.858
M.L.(1)	T3	0.0266	0.01057	20.937	27.943	22.565	1.415	1.331
M.L3(1)								
M.L20(1)	T2	0.027	0.01586	18.582	28.91	23.558	1.233	1.412
M.LS(1)	T1	0.0265	0.01586	21.184	28.921	23.567	1.102	1.412
M.L.(2)	T5	0.0446	0.0211	20.816	29.778	24.468	2.203	1.486
M.L3(2)	T4	0.0411	0.0211	30.782	29.755	24.45	2.234	1.485
M.L20(2)	T2	0.0576	0.0211	18.949	29.687	24.394	0.968	1.482
M.LSi(2)	T1	0.0557	0.02064	18.167	29.638	24.337	0.874	1.476
C.F.(1)	T3	0.0249	0.0317	36.399	31.786	26.518	1.862	1.649
C.F.L3(1)								
C.F.L20(1)	T2	0.0236	0.0211	33.533	29.869	24.543	0.992	1.491
C.F.Si(1)	T4	0.023	0.0258	44.511	30.696	25.399	1.56	1.599
C.F.(2)	T2	0.0527	0.05287	47.154	35.425	30.299	2.159	1.956
C.F.L3(2)	T1 + T5	0.0368	0.037	39.637	32.669	27.442	1.559	1.725
C.F.L20(2)	T1 + T2	0.0401	0.05287	29.608	35.533	30.392	1.433	1.963
C.F.Si(2)	T4	0.0418	0.04229	38.759	33.598	28.404	1.338	1.803
C.G.(1)	T4	0.1051	0.08724	43.049	41.23	36.335	2.87	2.447
C.G.L3(1)	T3	0.0902	0.0846	51.108	40.852	35.932	2.808	2.413
C.G.L20(1)	T1	0.0862	0.0846	36.092	40.914	35.987	1.507	2.417
C.G.Si(1)	T5	0.0856	0.0846	41.576	40.945	36.014	1.22	2.419

Tabela. 6 - Propriedades mecânica específica do compósito poliéster/juta versus tipo de reforço/tratamento usado.

AMOSTRA	C.P. SELEC.	F. VOL REFORÇO	F.VOLEFET. DO REFORÇO	M.TAN.FLEX (GPa)	R. FLEX (MPa)	M.FLEX.ESPEC. (N ^o M/Kg)	R.FLEX.ESPEC. (N ^o M/Kg)
M.E.(1)	F2	0,067	0,0211	3,2181	65,515	0,00273	0,0566
M.E.L.20(1)	F3	0,0655	0,0211	2,5552	56,466	0,00222	0,0491
M.E.Si(1)	F2	0,051	0,0211	2,8484	60,66	0,00213	0,0454
M.E.(2)	F2	0,1174	0,05287	3,3388	60,763	0,00287	0,0522
M.E.L.20h(2)	F1	0,136	0,04229	2,9971	40,017	0,00263	0,0351
M.E.Si(2)	F5	0,1217	0,04758	2,9357	52,118	0,00249	0,0422
M.L.(1)	F3	0,0291	0,01057	3,1533	61,362	0,00266	0,0518
M.L.20(1)	F4	0,0266	0,00528	3,0946	68,048	0,00256	0,0563
M.L.Si(1)	FX	0,0286	0,01057	2,8321	47,944	0,00237	0,0402
M.L.(2)	F1	0,0511	0,02064	3,2293	45,067	0,00275	0,0383
M.L.20(2)	F4	0,0637	0,02064	3,1695	46,729	0,00275	0,0406
M.L.Si(2)	F5	0,0502	0,02643	2,9849	43,228	0,00248	0,0359
C.F.(1)	F4	0,0313	0,02643	3,6943	75,172	0,00297	0,0605
C.F.L.20(1)	F4	0,0262	0,01586	3,1889	65,885	0,00281	0,0589
C.F.Si(1)	F4	0,0234	0,0211	3,4531	63,646	0,00288	0,0532
C.F.(2)	F2	0,0529	0,04229	3,5785	61,117	0,00305	0,0522
C.F.L.20(2)	F2	0,0412	0,037	3,5577	68,958	0,00306	0,0593
C.F.Si(2)	F1	0,0435	0,04229	3,4649	66,148	0,00295	0,0563
C.G.(1)	F2	0,0923	0,06346	3,4719	67,264	0,00301	0,0582
C.G.L.20(1)	F4	0,094	0,06557	3,4839	69,519	0,00296	0,0591
C.G.Si(1)	F2	0,1093	0,06567	3,9206	73,17	0,00331	0,0617

Tabela. 7 - Propriedades mecânicas em flexão do composto poliéster/juta versus o tipo de reforço/tratamento usado.

A Tabela 8 apresenta um estudo econômico e comparativo dos compósitos de Poliéster reforçado com tecidos de fibra de vidro, sisal e juta. Neste estudo, considerou-se a fração volumétrica de 0,065. O tecido de juta considerado foi o de cordão grosso sem nenhum tratamento, e o valor de X inclui o preço da fibra mais o preço da resina, verificados em março de 1994.

Tabela 8 - Estudo econômico e comparativo dos compósitos.

COMPÓSITO: POLIÉSTER + FIBRA DE	X (CR\$/Kg)	$\rho \times 10^3$ (Kg/m ³)	σ (MPa)	$\alpha \times 10^{-2}$	E (GPa)	$\beta \times 10^{-2}$
VIDRO	7719,00	2,54	58,20	33,69	6,31	3,10
SISAL	3387,00	0,81	37,60	7,30	2,52	1,10
JUTA	4084,00	1,50	67,30	9,10	3,48	1,76

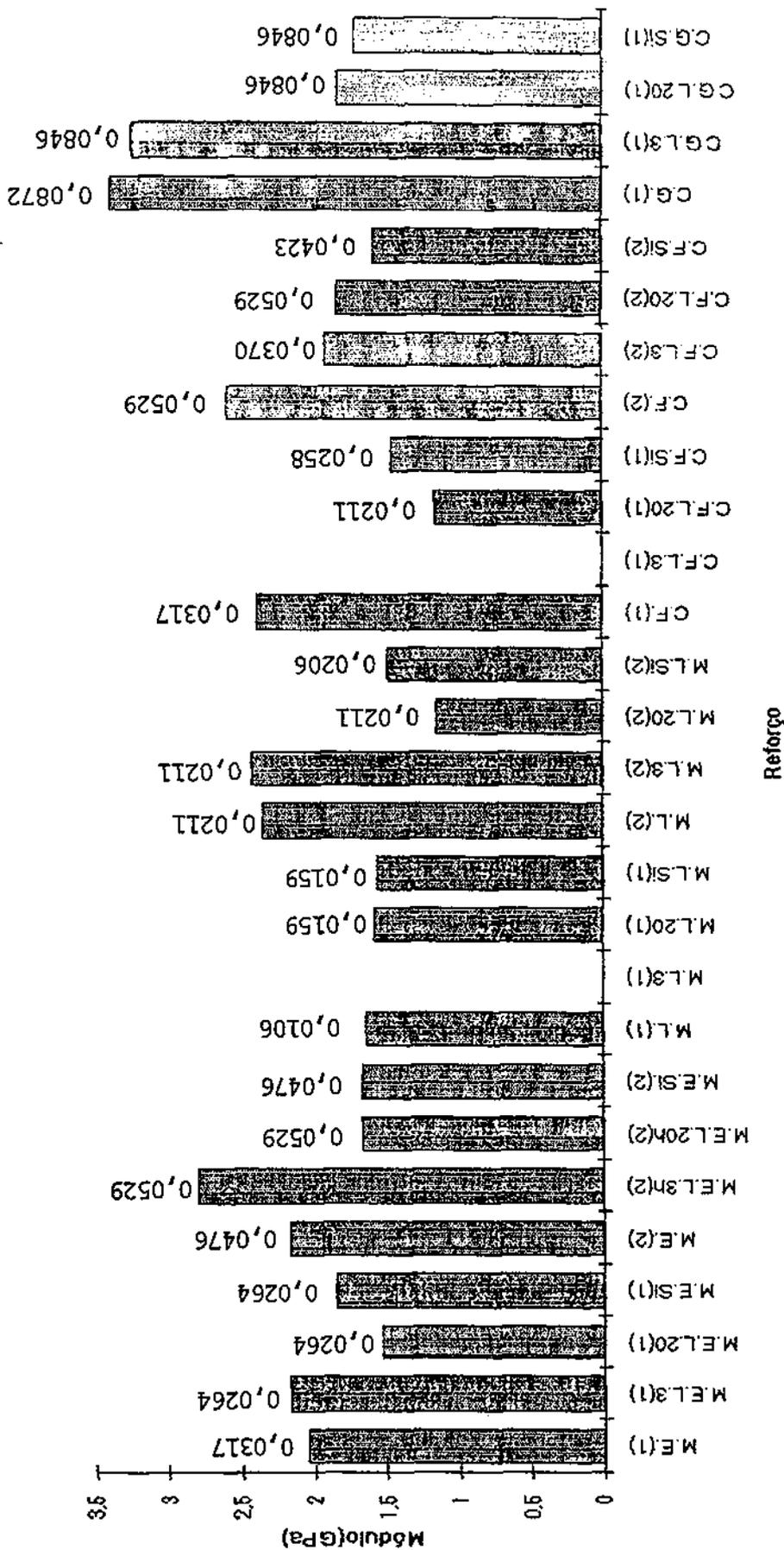


FIGURA 30 - Módulo de elasticidade em tração do composto Poliéster/Juta versus o tipo de reforço / tratamento usado. Os valores numéricos nas colunas são as frações volumétricas efetivas do reforço (Juta) no com. pósto.

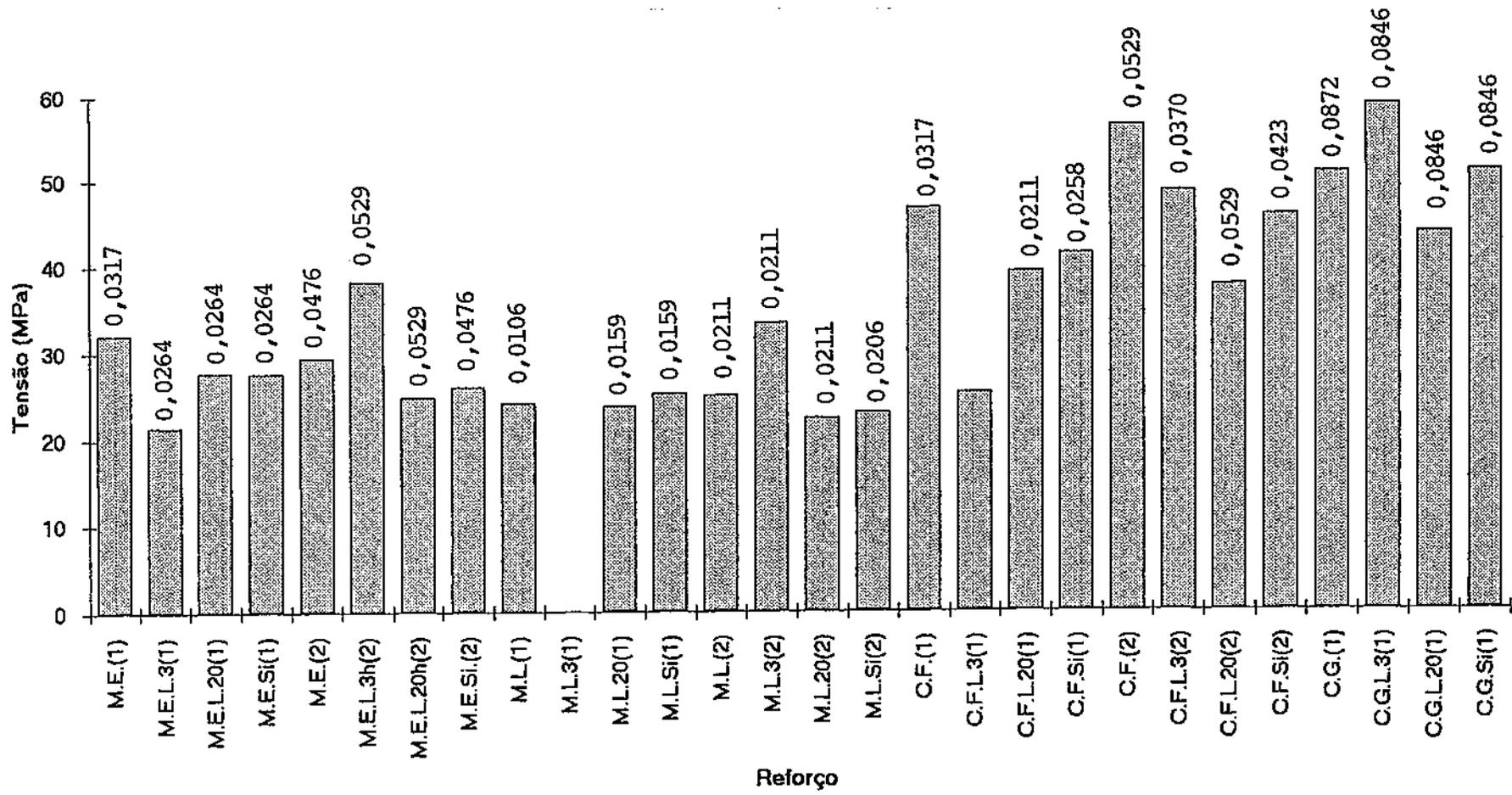


FIGURA 31 - Tensão de fratura (Resistência mecânica do compósito) do compósito Poliéster/Juta versus o tipo de reforço / tratamento usado. Os valores numéricos nas colunas são as frações volumétricas efetivas do reforço (Juta) no compósito.

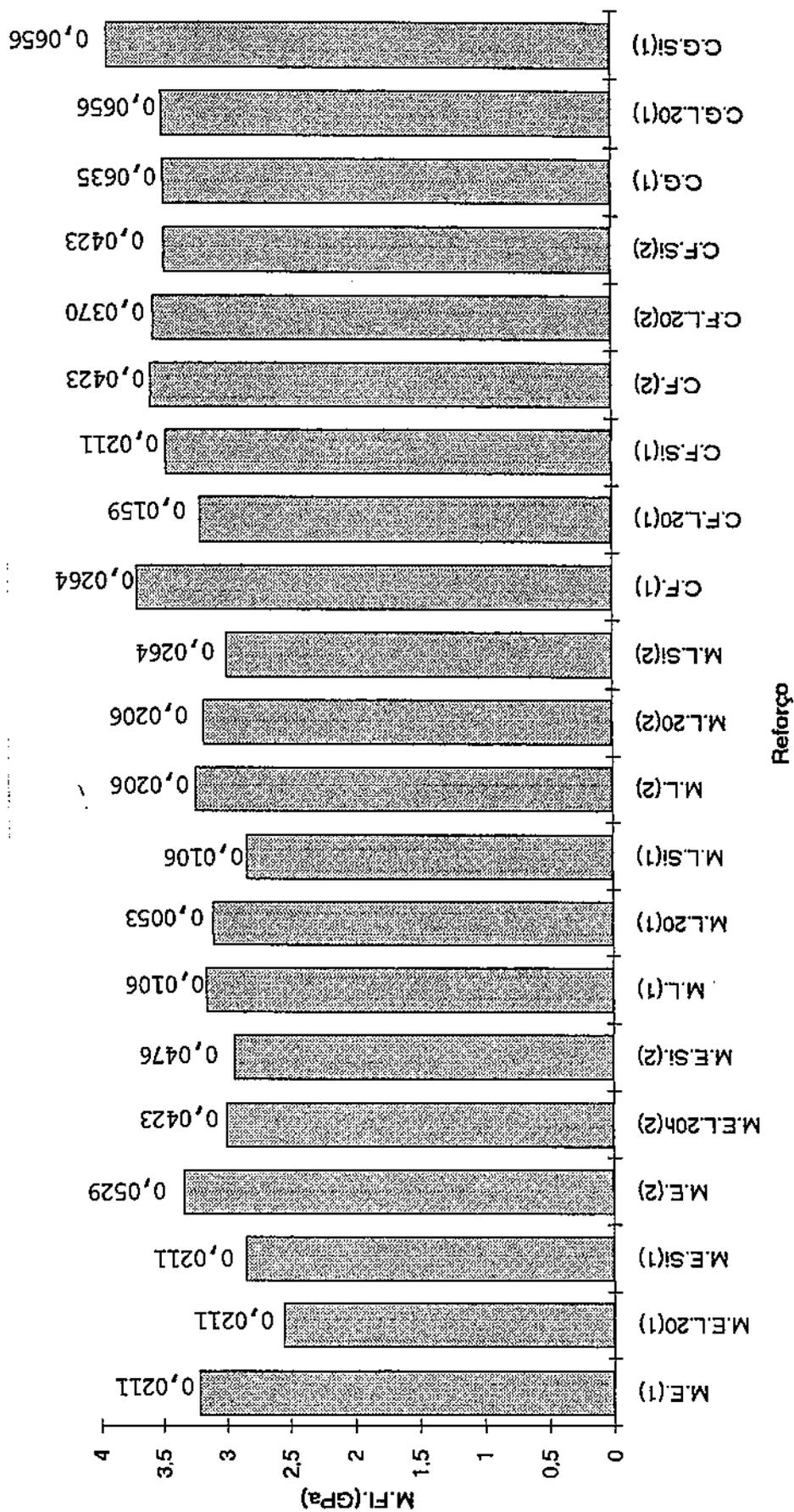


FIGURA 32 - Módulo de elasticidade em flexão do composto Poliéster/Juta versus o tipo de reforço / tratamento usado. Os valores numéricos nas colunas são as frações volumétricas efetivas do reforço (Juta) no composto.

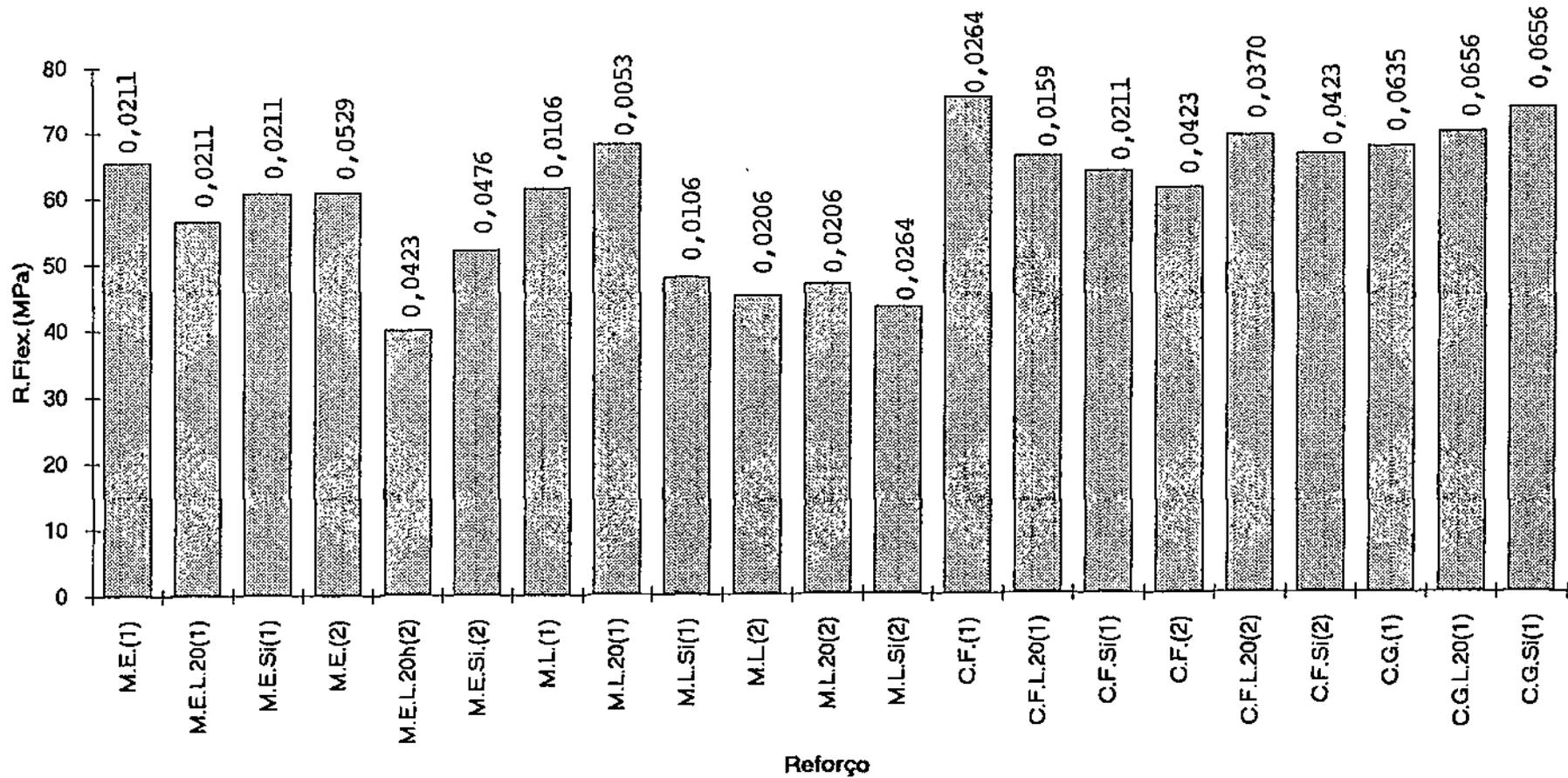


FIGURA 33 - Resistência à flexão do compósito Poliéster/Juta versus o tipo e reforço / tratamento usado. Os valores numéricos nas colunas são as frações volumétricas efetivas do reforço (Juta) no compósito.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidas placas de compósito Poliéster/Juta com reforços (juta) do tipo malha e fio sujeitos a diferentes tratamentos superficiais.

Placas de compósito Poliéster/Juta produzidas com o reforço no estado bruto e tratadas, foram elaboradas: 1º - reforço sem tratamento (estado bruto), 2º - reforço tratado com hipoclorito de sódio (água sanitária) por 3 horas e 20 horas e, 3º - reforço tratado com o agente silano durante 24 horas. Com exceção do reforço na forma de fio grosso, investigou-se também o efeito da incorporação de 1 e 2 camadas de reforço nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Ficou evidenciado que :

1. O tratamento do reforço com hipoclorito de sódio por 3 horas tem um efeito pequeno sobre as propriedades mecânicas do compósito, enquanto que o mesmo tratamento por 20 horas, causou um empobrecimento destas propriedades, principalmente no que se refere à rigidez dos compósitos.

2. As propriedades de tração (módulo de elasticidade e resistência mecânica à fratura) do compósito produzido com o reforço no estado bruto, aumentam com o acréscimo da fração volumétrica do reforço.

3. Os compósitos produzidos com os reforços tratados com hipoclorito de sódio durante 20 horas e agente silano durante 24 horas, apresentaram um comportamento contrário em relação ao módulo de elasticidade, isto é, um acréscimo da fração volumétrica do reforço causou uma diminuição desta propriedade.

4. As propriedades mecânicas de flexão foram pouco afetadas pela variação da fração volumétrica do reforço.

5. Os tratamentos usados nos reforços tiveram um efeito modesto nas propriedades mecânicas de flexão.

Os resultados obtidos indicam que a juta pode ser empregada como reforço em matrizes termofixas à base de poliéster, principalmente em aplicações onde as propriedades obtidas em compósitos de poliéster/fibra de vidro estejam sendo sub-utilizadas.

Para casos onde a espessura do artefato não sejam um critério excludente, compósitos de Poliéster/Juta podem ser utilizados com vantagem já que as propriedades mecânicas aumentaram proporcionalmete com o teor de reforço.

Se utilizarmos como critério fatores econômicos e o peso do artefato final para uma mesma resistência mecânica, a utilização da juta é vantajosa.

SUGESTÕES

1. Testar as propriedades das fibras antes e depois dos tratamentos.
2. Testar as características de adesão e interface por MEV, etc.
3. Testar outros tratamentos superficiais da fibra (exemplo, bases)
4. Efetuar testes de absorção de água e envelhecimento dos compósitos.
5. Testar a tenacidade e resistência ao impacto.
6. Fazer estudos mercadológicos para futuras aplicações e teste de abrasividade, por exemplo.

Referência Bibliográfica

- (1) HAGE Jr., Elias. Compósitos e Blendas Poliméricas. Campinas, Instituto Latino-Americano e IBM, 1989, p.2, 12 e 13.
- (2) D'ALMEIDA, José Roberto Moraes. Propriedades Mecânicas de Fibras de Juta. Ciência e Cultura. Rio de Janeiro, 39(11): 1032-1025. Nov. 1987
- (3) MILES, D.C. e BRISTON, I.H. Tecnologia de Polímeros, vol.II, Editora Polígono S.A. São Paulo, p.427 - 434.
- (4) RICHARDSON, M.O. Polymer Engineering Composites. Applied Science Publishers. London, 1977.
- (5) DEANIN, R.D. - History of Engineering Thermoplastics. Journal Macromol. Sci Chem., A 15, 6 1201-1209 (1981).
- (6) BARREIRA, Solange. Compósito com Jeitinho Brasileiro. Globo Ciência. São Paulo, 24 - 66 - 67, Jul, 1993.
- (7) CARVALHO FILHO, Antonio., CARVALHO, Francisco J. X. de., CORAZZA, Ismael Ribeiro., NUNES, Lourdes Candida., GALLI, Waldir., MOREIRA, Waldomiro S., HONDA, Wilson. Plástico Reforçado, a Alternativa Inteligente para a Indústria Moderna. Guia do Plástico Reforçado. São Paulo, 1989, p.10 - 46.
- (8) SHAH e LAKKAD SL, Fibre Si e Teohnol, 15 (1981), p.41 - 46.
- (9) BLASS, Arno. Processamento de Polímeros. 2a. ed. Florianópolis, Ed. da UFSC, 1988. 1991.
- (10) RESANA. Poliéster Insaturado - Resapol. Tecnologia de Processos. Publicação interna.
- (11) BORGES NETTO, Antonio. O Século dos Materiais. IPESI - Mecânica - Comunicação a Serviço da Tecnologia. Ano - XII - Jul/Ago, 1992.
- (12) ERHARDT, Theodor et alii. Curso Técnico Têxtil: Ficha Química Aplicada - Têxtil Tecnologia. Trad. de Jacob Furtener. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973 vol.2, p. 31 - 33.
- (13) B.C.BARKAKATY. J. Appl. Polym. Si, 20, 2921 (1976).

- (14) HOECHST DO BRASIL. Alpolit - Resina Poliéster Insaturada. Publicação Interna, Suzano - SP.
- (15) ALBA S. A. Indústria de Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro na Fabricação de Equipamentos Industriais. Resistentes à Corrosão. Publicação interna.
- (16) BHATTACHARYA, D. N, CHAKRAVARTHY IB e Sengupta SR, J. Sci Ind Res, 20D (1961) 168.
- (17) CHAWLA K.K, Proceeding of Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Boston, Aug. 1976, 1920.
- (18) CHAWLA K.K e Boston AC, Proceeding of the Third International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Cambridge, August 1979, vol. 3, p. 191.
- (19) CHAWLA KK et alii. Proceeding of the Third International Conference on Composite Materials, 1980, vol.1, p.414.
- (20) K.K. CHAWLA. Unsaturated Polyester Resin, its Production and Reinforcement with Natural Organic Fibres.
- (21) SATYANARAYANA, K.G., SUKUMARAN, K., KULKARNI, A.G., PILLAI, S.G.K. e ROHATGI, P.K. Fabrication and Properties of Natural Fibre - Reinforced Polyester Composites. Vol. 17 (4), October, 1986.
- (22) SRIDHAR, MK., BASAVARAPPA, G., KASTURI, S G e BALASUBRAMANIAN, N. Mechanical Properties of Jute- Polyester Composites. Indian Journal of Technology, India, 22, June, p. 213 - 215.
- (23) CHAWLA, K.K., AVILEZ, R.R., RODRIGUES, RR, S'A, A.C.M., SERRA, R.G. e CAVADAS, L. G. P. L. Comportamento Mecânico dos Conjugados de Resina Poliéster e Fibras de Carbono, Kevlar-29, Sial e Vidro. Revista Brasileira de Tecnologia. Vol. 9, 1978.
- (24) RABELO, Marcelo. Desenvolvimento de Compósito de Poliéster Insaturado com Fibra e de Vidro. I Congresso Brasileiro de Polímeros. São Paulo, 1991.
- (25) NORRIS SHREVE, R. e BRINK JR., J.A. Indústrias de Processos Químicos. Derivados Químicos da Madeira.
- (26) TEIXEIRA DE CARVALHO, Waldemiro Augusto. Aspectos Estruturais da Celulose. INF. INT./ RJ / V, XV/ n. 29/ p. 5 - 15 / Maio / Ago. 1982.

-
- (27) Boletim da Union Carbide, Chemical & Plastics Company Inc., Organosilicon Product Information. SC1844, p. 1-3, 1992.
- (28) NIELSEN, Lawrence E..Mechanical Properties of Polymers and Composites. New York, Marcel Dekker, p. 19.

ANEXOS

ANEXO 1 - DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DOS REFORÇOS E DENSIDADES.

1- FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO REFORÇO (ADICIONADA) (FVA)

O cálculo das frações volumétricas dos reforços foram efetuados considerando-se o peso do tecido de juta (reforço) e o peso da placa do compósito Poliéster/Juta.

Assim, para o tecido de cordão fino, 1 camada e sem tratamento, por exemplo, tem-se:

$$\text{Peso do tecido} = 2,6638\text{g}$$

$$\text{Peso da placa} = 76,0125\text{g}$$

Considerou-se que:

$$76,0125 \text{ ----- } 100\%$$

$$2,6638 \text{ ----- } x$$

$$\text{daí : } x = 3,50\%$$

Então, em 100g do compósito Poliéster/Juta tem-se :

$$\text{Poliéster} = 96,5\%$$

$$\text{reforço} = 3,5\%$$

A partir destes percentuais efetuou-se os cálculos das frações volumétricas:

Assim:

$$\% \text{ vol. resina} = \frac{96,5}{1,3 \text{ (dens. da resina)}} = 74,23$$

$$\% \text{ vol. reforço} = \frac{3,5}{1,3 \text{ (dens. do reforço)}} = 2,33$$

1a). Fração volumétrica do reforço (tecido de juta)

$$\text{Fr. vol. ref} = \frac{2,33}{74,23+2,33} = 0,0304$$

1b). Fração volumétrica da resina

$$\text{Fr. vol. resina} = 1 - 0,0304 = 0,9696$$

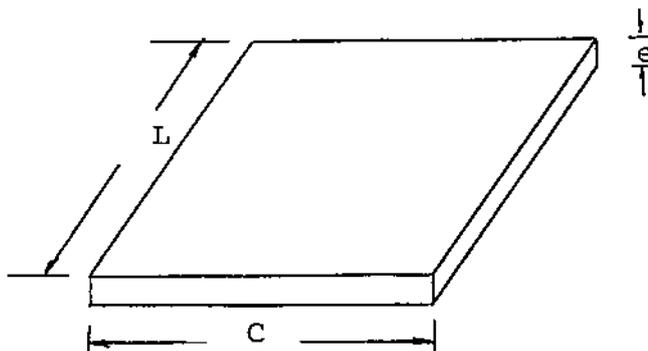
2- FRAÇÃO VOLUMÉTRICA EFETIVA DO REFORÇO (FVE)

Para o cálculo das frações volumétricas dos corpos de prova em tração, foram considerados apenas os fios que participam, efetivamente, opondo-se ao esforço trativo. Estes se encontram alinhados na direção deste esforço. A estas frações volumétricas chamou-se "frações volumétricas efetivas" do reforço, e foram determinadas a partir da análise visual de cada corpo de prova. Com esta análise detectou-se fios efetivos e, a partir daí, considerando-se o número de fios unidirecionais dos corpos de prova tomados como padrão de comparação (aqueles com tecidos de fios finos), e considerando que haja proporcionalidade entre as massas dos reforços, chegou-se às frações volumétricas efetivas.

3- DENSIDADE APARENTE (D)

As densidades aparentes dos compósitos de Poliéster/Juta foram determinadas tomando-se como base as massas e os volumes dos compósitos produzidos. Os volumes foram determinados considerando-se as dimensões das placas dos compósitos Poliéster/Juta.

Considerando-se o desenho abaixo, tem-se :



Onde : C - comprimento da placa
L - largura da placa
e - espessura da placa

então : volume do compósito (VC) = C x L x e (unidade de comprimento)³

daí:

$$\text{Densidade aparente (D)} = \frac{M_c}{V_c} \quad (4a)$$

onde: Mc - massa do compósito

4- DENSIDADE TEÓRICA (Dt)

Segundo (27), a densidade teórica é determinada pela seguinte equação:

$$D_t = \frac{M_c}{\frac{m_f}{d_f} + \frac{m_r}{d_r}} \quad (4b)$$

onde: Dt - densidade teórica
mf - massa do reforço
mr - massa da resina
df - densidade do reforço
dr - densidade da resina
Mc- massa do compósito

Neste trabalho utilizou-se a equação 4b, onde os valores das densidade do reforço e da resina, foram retirados da literatura, ou seja, 1,5 g/cm³ e 1,3 g/cm³, respectivamente.

ANEXO 2 - CURVAS REPRESENTATIVAS DOS TESTES DE TRAÇÃO E DE FLEXÃO.

2.1 - MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO MÓDULO

A- Módulo de Young

Numerosos métodos têm sido usados para medir o módulo de elasticidade. Provavelmente o mais comum é calculado com os dados obtidos pelo teste de Tensão - Deformação. Considerando-se o material Isotrópico, o Módulo de Young é proporcional a inclinação inicial da curva tensão-deformação, isto é:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{F/A}{(L - L_0) / L_0} \quad (5)$$

onde: F/A é a força por unidade de área na seção transversal, L é o comprimento do corpo de prova quando a força de tração F é aplicada e L_0 é o comprimento do corpo de prova não tracionado. A Equação 5 é também aplicada para materiais anisotrópicos, desde que a tensão aplicada seja paralela a um dos eixos principais do material, NIELSEN (28).

São apresentados neste anexo as curvas representativas dos testes de tração e de flexão mostradas nos ANEXOS 2A a 2I. São apresentados também, os valores das propriedades mecânicas resultantes destes dois tipos de testes. Neste trabalho especial importância foi dispensada aos Módulos de Elasticidade (Módulos de Young) que foram determinados segundo 3 critérios:

1 - Pela máquina durante o teste de tensão deformação, seguindo as diretrizes do padrão ASTM D638 que apenas relaciona tensões e deformações pelo quociente destas duas grandezas, de acordo com a Equação 5, descrita a seguir por NIELSEN (28).

2 - Utilizando-se os dados obtidos dos testes de tensão deformação a 1% de deformação. Como exemplo, pode-se tomar os dados do ANEXO 2A, Assim:

$$\text{Tensão a 1\% de deformação} = 1,0775 \text{ Kgf/mm}^2 = 10,775 \text{ MPa}$$

$$\text{Deformação} = 0,01$$

$$E = \frac{10,775}{0,01} = 1,0775 \text{ GPa}$$

3 - Utilizando-se os gráficos dos testes de Tensão - Deformação, conforme a Figura 34.

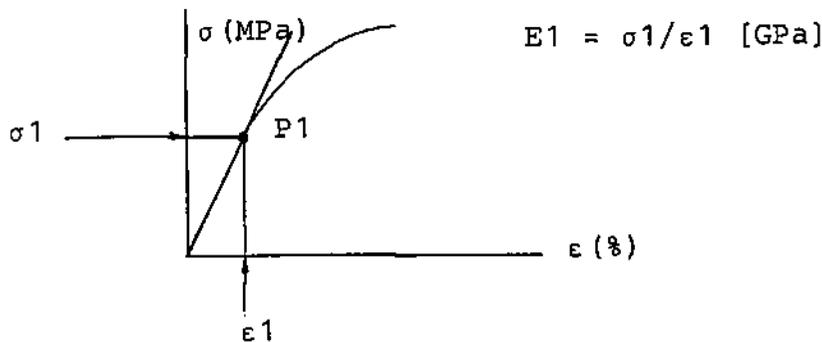


Figura 34 - Curva Tensão x Deformação

Como exemplo ilustrativo será determinado o módulo de elasticidade com a utilização da curva apresentada no anexo 2A. As demais curvas participam apenas como representativas dos testes de tração efetuados nos compósitos de Poliéster/Juta.

B - Cálculo do Módulo Tangente de Flexão

O módulo tangente de elasticidade, frequentemente chamado "módulo de elasticidade" é a razão, dentro do limite elástico do material, entre a tensão e a deformação e deve ser expressado em megapascal. É calculado traçando-se uma tangente pela parte inicial da curva carga-deflexão, usando-se a Equação 6.

$$E_b = \frac{L^3 \cdot m}{4b d^3}$$

onde:

E_b - módulo de elasticidade na flexão, MPa

L - distância entre apoios, mm

b - largura da barra testada, mm

d - espessura da barra testada, mm

m - inclinação da tangente na porção inicial da curva carga-deflexão, N/mm de deflexão.

Como exemplo ilustrativo pode-se utilizar os dados disponíveis no anexo 2F para determinar o módulo tangente de flexão.

Dados :

$$L - 64\text{mm}$$

$$b - 9,75\text{mm}$$

$$d - 3,7\text{mm}$$

$$m = 29 \text{ N/mm (pela curva, ANEXO 2F)}$$

Dai :

$$Eb = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot d^3}$$

$$Eb = \frac{64^3 \cdot 29}{4 \cdot 9,75 (37)^3}$$

$$Eb = 3,848 \text{ GPa}$$

ANEXO 2A

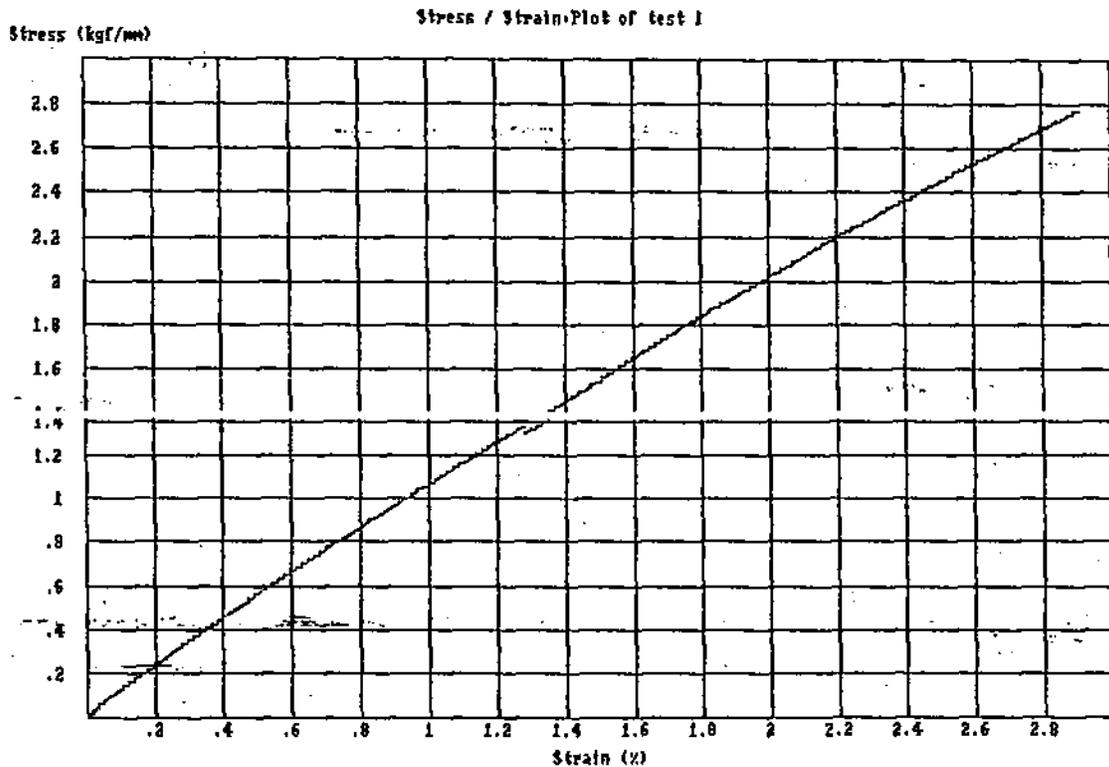
D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Malha estreita
 REFERENCE 2 : 1 camada
 REFERENCE 3 : Lavada 10 /T1

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 57 mm
 SAMPLE WIDTH : 13.2 mm
 PRE-TENSION : .1 kgf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (kgf)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (kgf/mm)	EXT @ YIELD POINT (kgf/mm)
1	3.6000	131.80	2.7736	2.9118	97.550	2.9298

TEST No.	STRESS @ 1 % (kgf/mm)	STRESS @ 2 % (kgf/mm)
1	1.0775	2.0245



$$\begin{array}{l} 6,2 \text{ ——— } 0,2 \\ 7,5 \text{ ——— } x \end{array} \implies x = 0,242 \text{ kgf/mm}^2$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{0,242}{0,002} = 121 \text{ kgf/mm}^2$$

$$E = 1,210 \text{ GPa.}$$

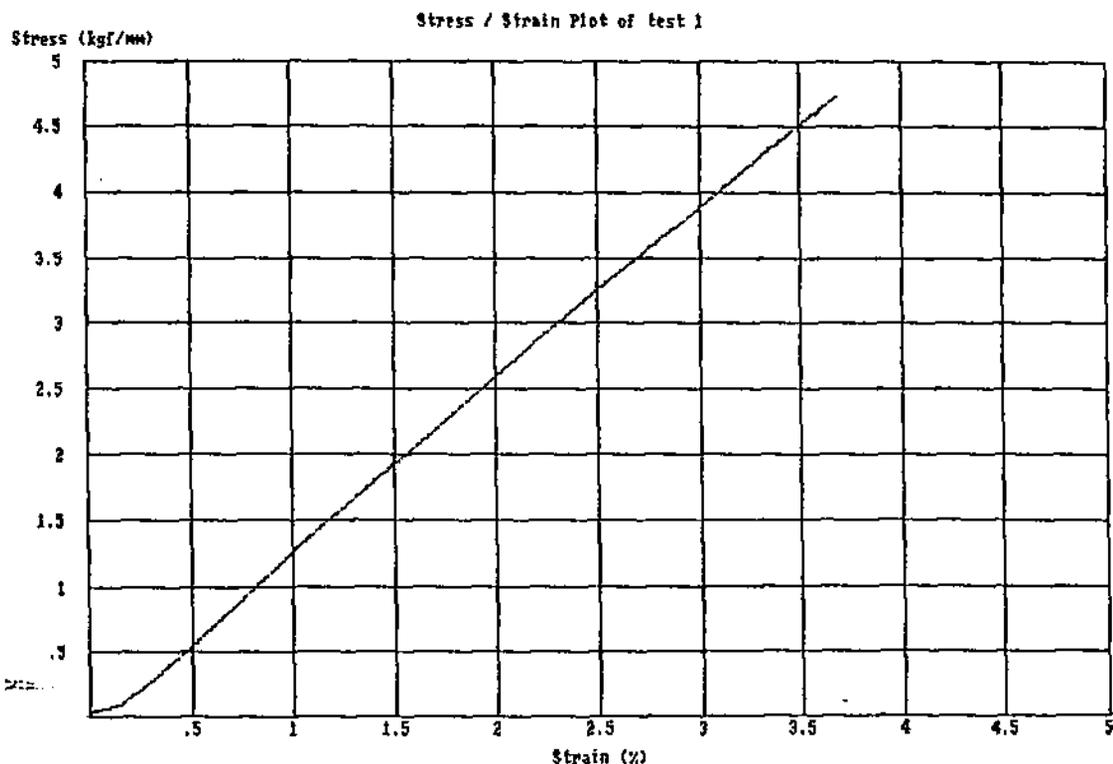
ANEXO 2B

D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : cordao grosso	TEST SPEED : .5 mm/min
REFERENCE 2 : 1 camadas	SAMPLE LENGTH : 57 mm
REFERENCE 3 : trat. Silano T5	SAMPLE WIDTH : 13.1 mm
	PRE-TENSION : 1 kgf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (kgf)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (kgf/mm)	EXT @ YIELD POINT (kgf/mm)
1	3.6000	222.80	4.7243	3.6829	132.83	3.7193

TEST No.	STRESS @ 1 % (kgf/mm)	STRESS @ 2 % (kgf/mm)
1	1.2639	2.5976



ANEXO 2C

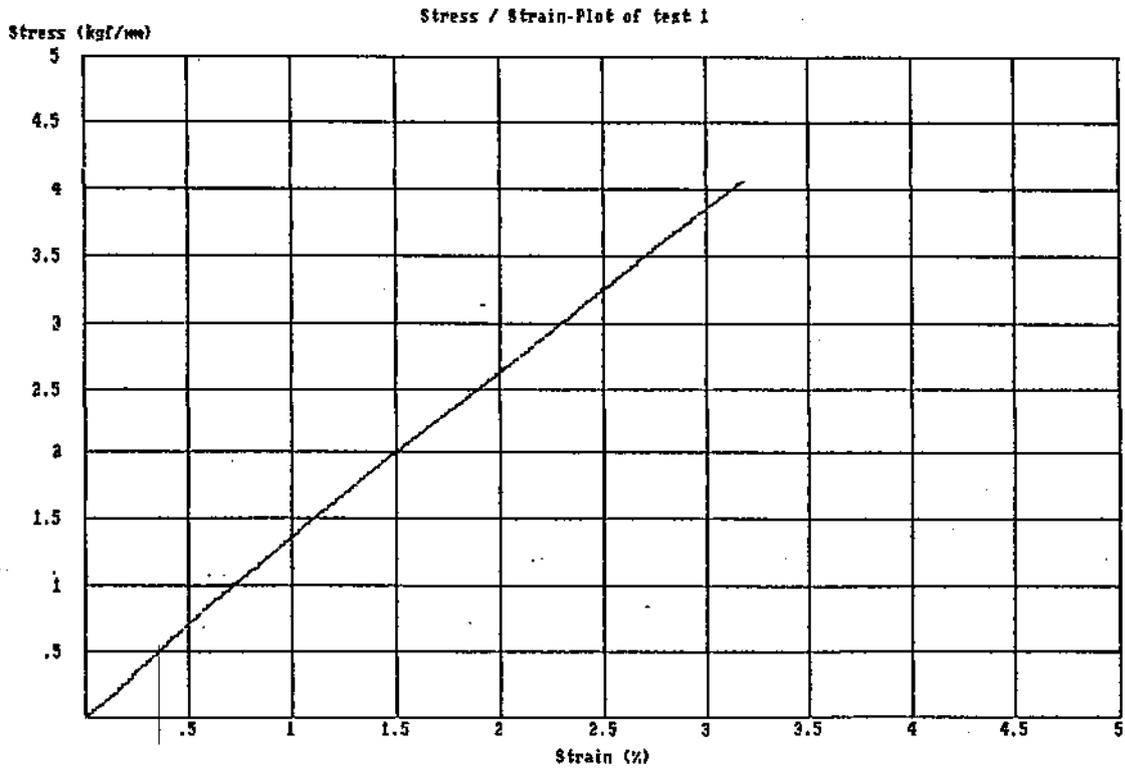
D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Cordao grosso
 REFERENCE 2 : 1 camada
 REFERENCE 3 : Lavada 22/T1

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 57 mm
 SAMPLE WIDTH : 13.1 mm
 PRE-TENSION : .1 kgf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (kgf)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (kgf/mm)	EXT @ YIELD POINT (kgf/mm)
1	3.8000	202.60	4.0699	3.1930	128.00	3.1754

TEST No.	STRESS @ 1 % (kgf/mm)	STRESS @ 2 % (kgf/mm)
1	1.3439	2.6175



ANEXO 2D

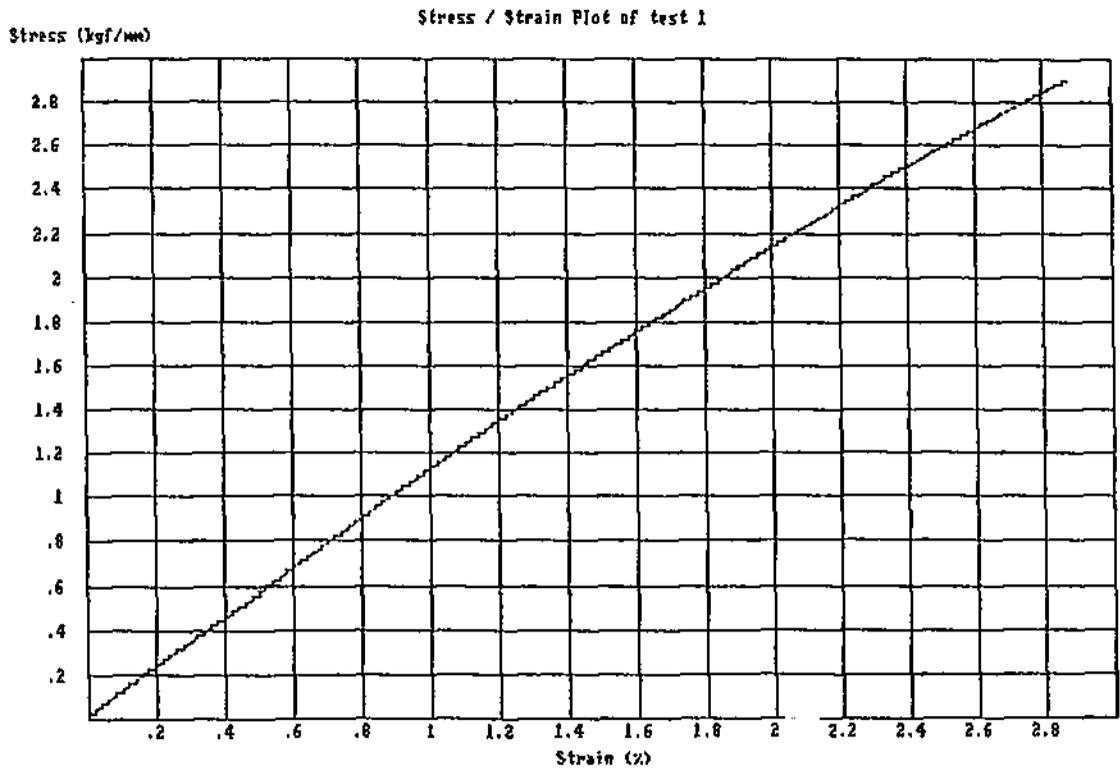
D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Malha estreita
 REFERENCE 2 : 2 camadas
 REFERENCE 3 : trat. Silano T4

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 50 mm
 SAMPLE WIDTH : 12.9 mm
 PRE-TENSION : 1 kgf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (kgf)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (kgf/mm)	EXT @ YIELD POINT (kgf/mm)
1	3.5000	131.10	2.9037	2.8788	110.62	2.9200

TEST No.	STRESS @ 1 % (kgf/mm)	STRESS @ 2 % (kgf/mm)
1	1.1363	2.1397



ANEXO 2E

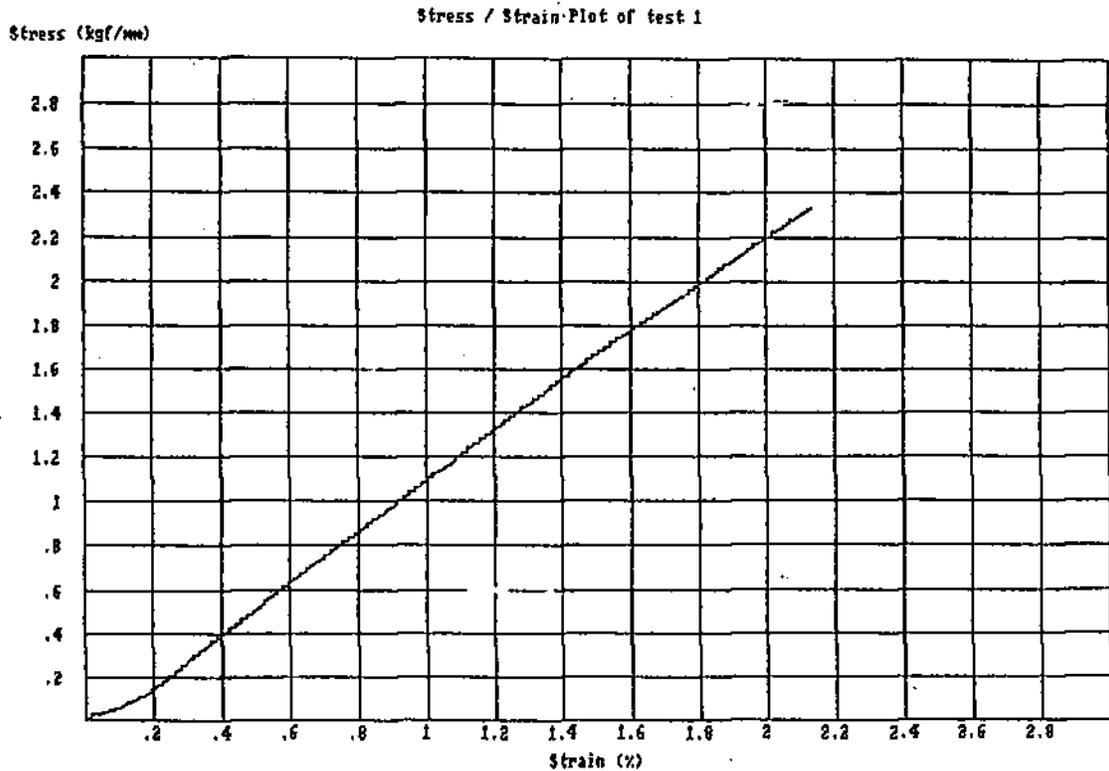
D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Malha estreita
 REFERENCE 2 : 2 camadas
 REFERENCE 3 : Lavada 11/T2

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 57 mm
 SAMPLE WIDTH : 12.9 mm
 PRE-TENSION : .1 kgf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (kgf)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (kgf/mm)	EXT @ YIELD POINT (kgf/mm)
1	3.4000	102.10	2.3279	2.1400	114.51	2.1579

TEST No.	STRESS @ 1 % (kgf/mm)	STRESS @ 2 % (kgf/mm)
1	1.1086	2.1979



ANEXO 2F

ASTM D790 FLEXURAL TEST RESULTS

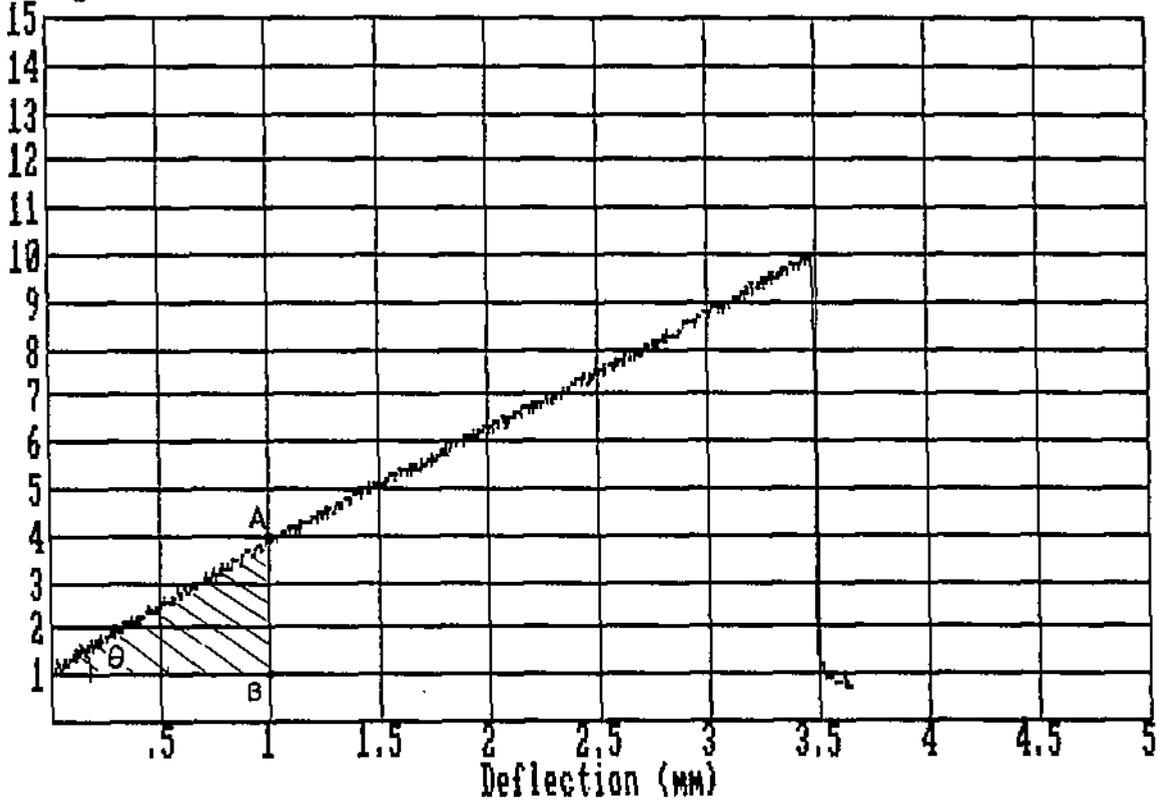
REFERENCE 1 : Cordao Grosso
 REFERENCE 2 : 1 Camada
 REFERENCE 3 : Trat. Silano 21 / F1
 DATE TESTED :
 TEST SPEED : 1.7 mm/min

SPAN : 80 mm
 WIDTH : 9.75 mm
 SUPPORT SPAN : 64 mm
 GIVEN STRAIN : 5 mm
 YIELD OFF SET : .2 %
 SECANT STRAIN : 3 mm

TEST No.	THICKNESS (mm)	MAXIMUM FIBRE STRESS @ 5 mm (kg/mm ²)	FLEXURAL STRENGTH (kg/mm ²)	FLEXURAL YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	.2 % FLEX OFFSET YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	MAXIMUM STRAIN (mm/mm)	TANGENT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)	SECANT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)
1	3.0000	0.00	1.2332	0.00	0.0068	0.0197	398.10	387.04

Load / Deflection Plot of test 1

Load (kgf)

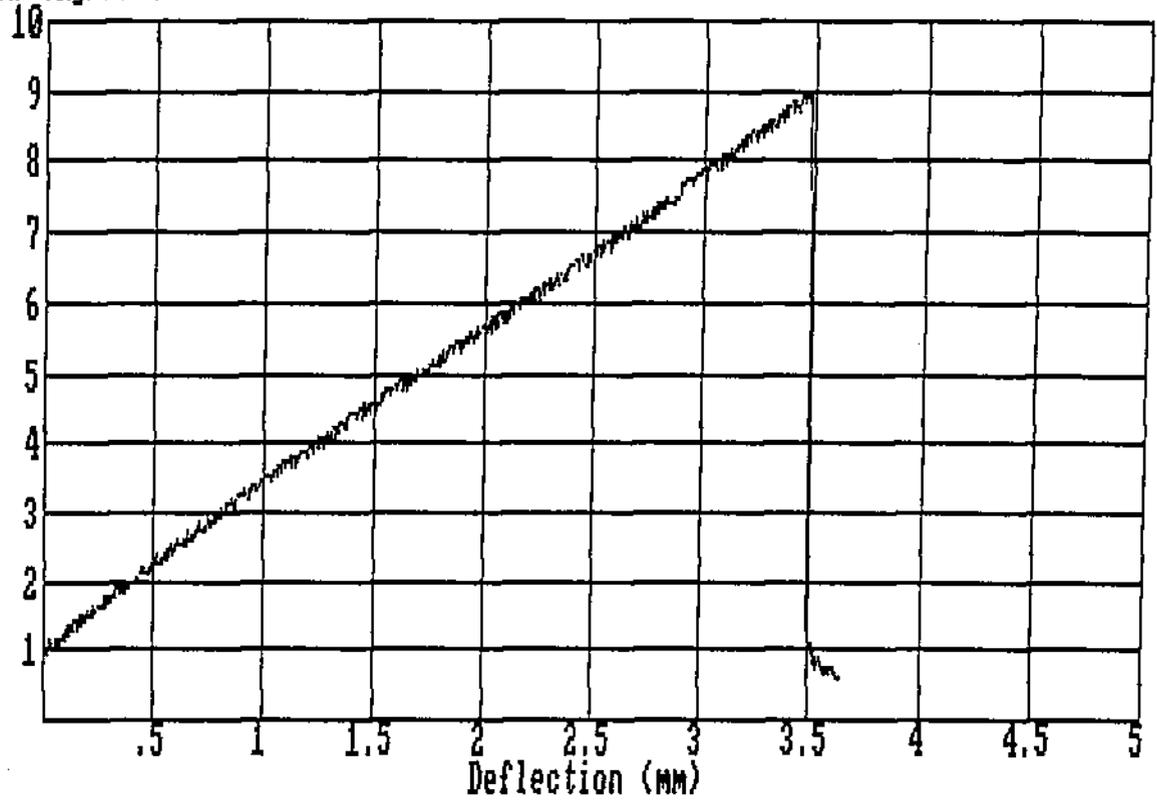


$$\operatorname{tg} \theta = m$$

$$m = \frac{3}{1} = \frac{3 \times 9,807}{1} \text{ N/mm} = 29 \text{ N/mm}$$

Stress / Deflection Plot of test 1 21/F1

Stress (kg/mm²)



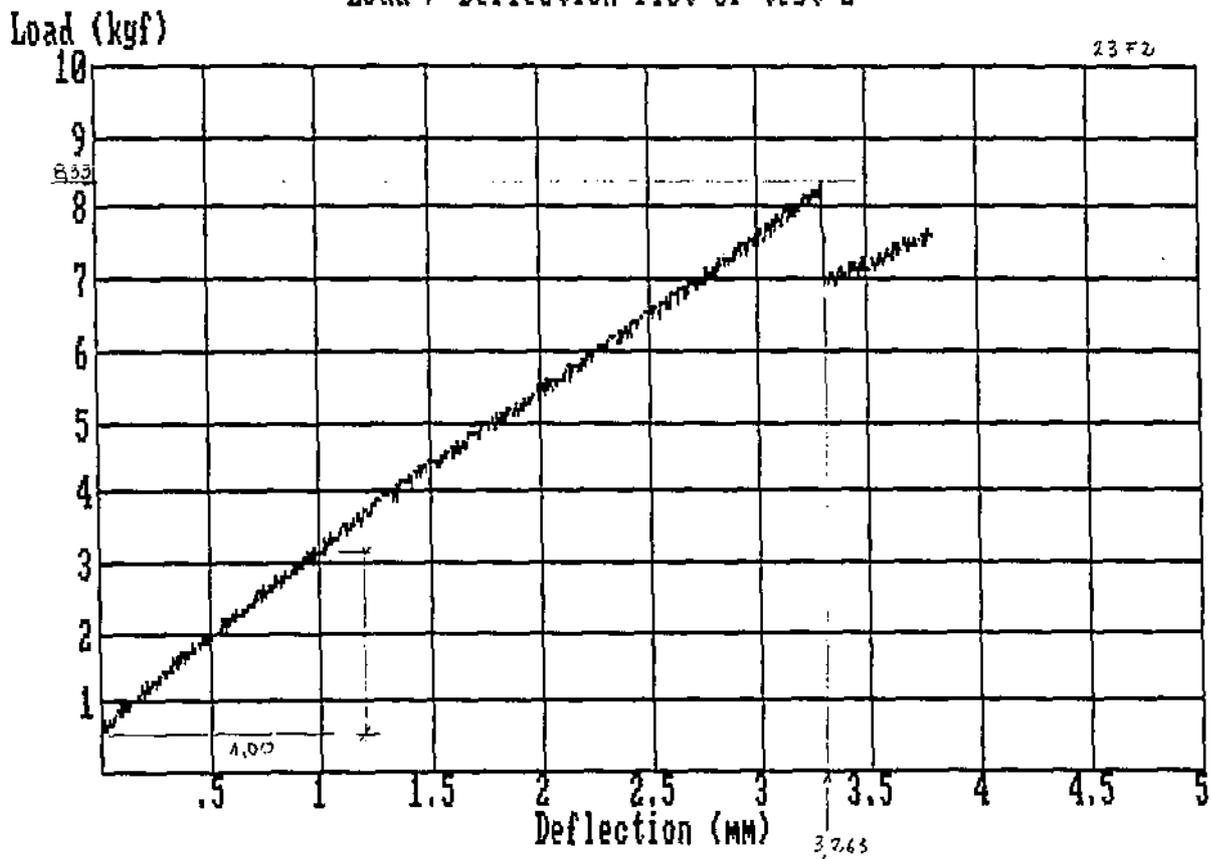
ANEXO 2G

ASTM D 790 FLEXURAL TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Cordão Grosso	SPAN : 80 mm
REFERENCE 2 : 1 Camada	Largura : 9.95 mm
REFERENCE 3 : Sem tratamento	Espessura: 3.70 mm

Módulo Tangente de Flexão : 293.3 Kgf/mm ²
Resistência à Flexão : 5,9214 Kgf/mm ²
Deformação máxima : 0,0206 (mm/mm)

Load / Deflection Plot of test 2



ANEXO 24

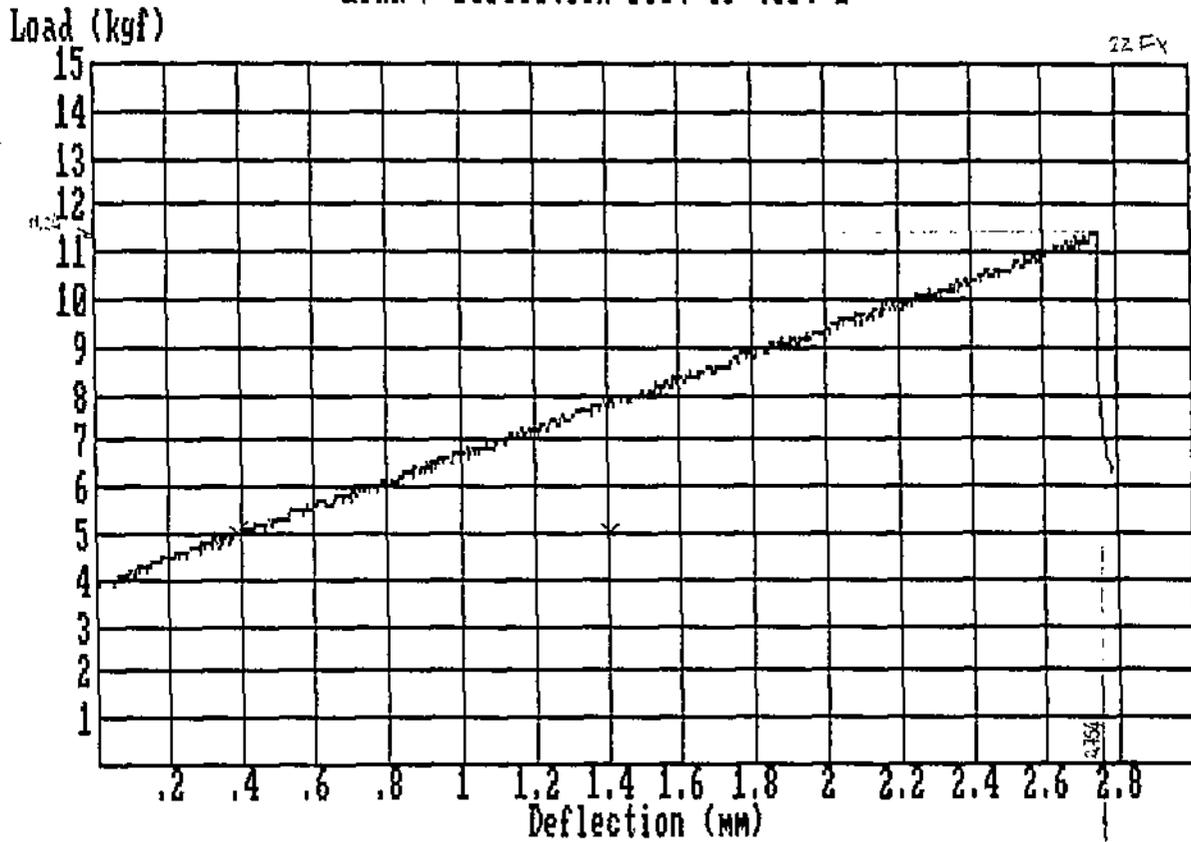
ASTM D790 FLEXURAL TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Cordao Grosso
 REFERENCE 2 : 1 camada
 REFERENCE 3 : Lavado Fx / 22
 DATE TESTED :
 TEST SPEED : 1.7 mm/min

SPAN : 80 mm
 WIDTH : 9.91 mm
 SUPPORT SPAN : 64 mm
 GIVEN STRAIN : 5 mm
 YIELD OFF SET : .2 %
 SECANT STRAIN : 3 mm

TEST No.	THICKNESS (mm)	MAXIMUM FIBRE STRESS @ 5 mm (kg/mm ²)	FLEXURAL STRENGTH (kg/mm ²)	FLEXURAL YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	.2 % FLEX OFFSET YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	MAXIMUM STRAIN (mm/mm)	TANGENT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)	SECANT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)
1	3.9000	0.00	7.2596	0.00	0.0000	0.0159	0.00	0.00

Load / Deflection Plot of test 1



ANEXO 2I

ASTM D790 FLEXURAL TEST RESULTS

REFERENCE 1 : Cordao grosso	SPAN	: 80 mm
REFERENCE 2 : 1 camada	WIDTH	: 10 mm
REFERENCE 3 : Lavada 22/Fx	SUPPORT SPAN	: 17 mm
DATE TESTED : 01-01-80	GIVEN STRAIN	: 5 mm
TEST SPEED : 1.7 mm/min	YIELD OFF SET	: .2 %
	SECANT STRAIN	: 3 mm

TEST No.	THICKNESS (mm)	MAXIMUM FIBRE STRESS @ 5 mm (kg/mm ²)	FLEXURAL STRENGTH (kg/mm ²)	FLEXURAL YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	.2 % FLEX OFFSET YIELD STRENGTH (kg/mm ²)	MAXIMUM STRAIN (mm/mm)	TANGENT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)	SECANT MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm ²)
1	1.9000	0.00	2.6823	0.00	0.0000	0.0130	0.000	0.00

Load / Deflection Plot of test 1

