

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EFEITO DO EMPREGO DE FIBRAS DE VIDRO CURTAS  
COMO REFORÇO DE RESINAS TERMOFIXAS

JOSÉ AUGUSTO MARCONDES AGNELLI

Dissertação apresentada à Comis  
são de Pós-Graduação da Faculda  
de de Engenharia de Campinas  
-UNICAMP-, para a obtenção do tí  
tulo de MESTRE EM CIÊNCIAS.

Orientador: PROF.<sup>º</sup> DR. AUGUSTO RUY DE OLIVEIRA PINTO

- CAMPINAS -

1978

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

A

Augusto (em memória) e Marina

Beth

Patrícia

## RESUMO

Foi estudada a influência da variação do comprimento das fibras de vidro, de 1/8 pol a 1/2 pol, sobre as propriedades mecânicas de diferentes matrizes poliméricas de poliésteres insaturados. Para isto, desenvolveu-se uma técnica de fabricação adequada para a obtenção de compostos poliéster insaturado - fibras de vidro curtas, aleatoriamente dispersas. Os resultados encontrados mostram que as propriedades mecânicas das matrizes poliméricas melhoraram pela incorporação das fibras de vidro curtas, com exceção da resistência à flexão para pequenas porcentagens de fibras de vidro com comprimento 1/8 pol. Melhores propriedades mecânicas foram obtidas para maiores porcentagens das fibras de vidro, com 1/2 pol de comprimento.

## ABSTRACT

Studies were carried out on the influence of glass fibre length on the mechanical properties of different unsaturated polyester matrices, with fibre length varying between 1/8 inch and 1/2 inch. For this purpose, adequate fabrication technique was developed to obtain unsaturated polyester-short glass fibres composites with random fibre orientation. The results obtained showed that the mechanical properties of the polymeric matrices were enhanced by the incorporation of the short glass fibres with the exception of the flexural resistance for 1/8 inch long fibres at low fibre content. Better mechanical properties were obtained for higher fibre content using 1/2 inch long fibres.

A concretização desta dissertação foi possível graças a:

- Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Departamento de Engenharia Mecânica.
- Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais.
- Resana S.A. Indústrias Químicas.
- Ocfibras Ltda.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto pela amizade, orientação e apoio.

Aos técnicos Antonio Carlos Rosalini, João Bolsoni de Camargo e Raimundo Garbelotti Filho pela colaboração prestada no decorrer do trabalho.

Ao Gil de Carvalho pela colaboração prestada na análise estatística dos resultados.

À Senhora Virginia Ludovica Zanetti Brochini pelo trabalho de datilografia.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

## SUMÁRIO

	Pag.
1- INTRODUÇÃO GERAL . . . . .	1 ✓
1.1- Comentário Inicial . . . . .	1
1.2- Objetivo da Dissertação . . . . .	1
1.3- Introdução Geral sobre Polímeros . . . . .	2 ✓
2- RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO . . . . .	6 ✓
2.1- Conceituação das Resinas de Poliéster Insaturado . . . . .	7 ✓
2.2- Tipos de Poliésteres Insaturados . . . . .	9 ✓
2.2.1- Poliésteres Ortoftálicos . . . . .	10 ✓
2.2.2- Poliésteres Isoftálicos . . . . .	11 ✓
2.2.3- Resinas de Poliéster Bisfenólicas . . . . .	12 ✓
2.2.4- Resinas Éster-vinílicas . . . . .	13 ✓
2.2.5- Poliésteres Flexíveis . . . . .	14 ✓
2.2.6- Poliésteres Especiais . . . . .	15 ✓
2.3- Monômeros de Interligação . . . . .	15 ✓
2.4- Catalizadores e Aceleradores . . . . .	16 ✓
2.5- Processo de Cura das Resinas de Poliéster Insaturado . . . . .	19 ✓
3- FIBRAS DE VIDRO . . . . .	23 ✓
3.1- Características e Propriedades das Fibras de Vidro . . . . .	23 ✓
3.2- Tipos de Vidro e Composição da Fibra de Vidro Utilizada . . . . .	25 ✓
3.3- Processo de Fabricação das Fibras de Vidro . . . . .	28 ✓
3.4- Tratamento Superficial e Ligação Fibra de Vidro - Resina de Poliéster Insaturado . . . . .	31 ✓
3.5- Formas Comerciais das Fibras de Vidro . . . . .	34
4- PLÁSTICOS REFORÇADOS (POLIÉSTERES INSATURADOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO, PIRFV) . . . . .	36 ✓

4.1- Composição dos Plásticos Reforçados (PR) . . . . .	37
4.2- Propriedades e Aplicações dos Poliêsteres Insaturados Reforçados com Fibras de Vidro (PIRFV) . . . . .	38
4.3- Processos de Fabricação de PIRFV . . . . .	40
5- TEORIA DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE POLIÊSTERES INSATURADOS COM FIBRAS DE VIDRO CURTAS . . . . .	42
5.1- Introdução . . . . .	42
5.2- Reforçamento de Poliêsteres Insaturados com Fibras de Vidro Curtas . . . . .	43
6- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	51
6.1- Introdução . . . . .	51
6.2- Preparação de Compostos de Poliêsteres Insaturados Re forçados com Fibras de Vidro Curtas . . . . .	52
6.2.1- Materiais Empregados . . . . .	52
6.2.2- Composições dos Compostos Poliêster Insaturado - Fi bras de vidro Curtas . . . . .	54
6.2.3- Moldagem dos compostos na Forma de Placas . . . . .	56
6.3- Ensaio Mecânicos dos Compostos Poliêster Insaturado - Fibras de Vidro Curtas . . . . .	59
6.3.1- Normalização dos Ensaio Mecânicos . . . . .	59
6.3.2- Dispersão das Fibras de Vidro nas Matrizes Poliméri cas . . . . .	61
7- RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	64
7.1- Ensaio de Verificação da Dispersão das Fibras de Vidro Curtas nas Matrizes Poliméricas . . . . .	64
7.2- Ensaio de Impacto . . . . .	71
7.3- Ensaio de Flexão . . . . .	78
7.4- Ensaio de Compressão . . . . .	84

	vi
7.5- Ensaio de Tração . . . . .	90
7.6- Análise Estatística dos Resultados . . . . .	102
8- CONCLUSÕES . . . . .	103
APÊNDICE 1 . . . . .	105
APÊNDICE 2 . . . . .	106
BIBLIOGRAFIA . . . . .	122



## LISTA DE FIGURAS

1.1 - Esquema de formação de uma das cadeias poliméricas na poliadição de monômeros vinílicos . . . . .	3
1.2 - Esquema de formação de uma das cadeias poliméricas na policondensação de um poliéster . . . . .	4
1.3 - Diferentes tipos de cadeias poliméricas . . . . .	5
2.1 - Esquema simplificado da formação de uma cadeia de poliéster insaturado de uso geral . . . . .	8
2.2 - Esquema simplificado da solução do poliéster insaturado no diluente estireno . . . . .	9
2.3 - Representação da obtenção da cadeia polimérica do poliéster insaturado isoftálico . . . . .	11
2.4 - Representação simplificada da cadeia das resinas de poliéster bisfenólicas . . . . .	12
2.5 - Representação simplificada da cadeia das resinas éster-vinílicas . . . . .	13
2.6 - Representação simplificada da cadeia de um poliéster insaturado flexível . . . . .	14
2.7 - Fórmulas químicas dos catalizadores do tipo peróxido orgânico . . . . .	17
2.8 - Gráfico da temperatura da resina polimérica em função do tempo, no processo de cura . . . . .	21
2.9 - Esquema das reações do processo de cura de uma resina de poliéster insaturado . . . . .	22
3.1 - Esquema da fabricação de fibras de vidro pelo processo de fusão direta . . . . .	30

3.2 - Ligação química vidro-resina pelo uso de agente de ligação do tipo metacrilato silano . . . . .	33
5.1 - Modelos de laminados . . . . .	44
6.1 - Influência da temperatura na viscosidade da resina Poly lite 8001 . . . . .	59
6.2 - Corpos de prova (CP) utilizados nos ensaios mecânicos .	62
6.3 - Forma de extração das amostras para medida de dispersão das FV curtas . . . . .	63
7.1 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI) . . . . .	75
7.2 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI) . . . . .	75
7.3 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI) . . . . .	76
7.4 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI) . . . . .	76
7.5 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI) . . . . .	77
7.6 - Influência do comprimento das FV na Resistência ao Impacto (RI), para diferentes % de reforço . . . . .	77
7.7 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ) . . . . .	81
7.8 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ) . . . . .	81
7.9 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ) . . . . .	82
7.10 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ) . . . . .	82
7.11 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência	

cia à Flexão ( $\sigma_f$ ) . . . . .	83
7.12 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ), para diferentes % de reforço . . . . .	83
7.13 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) . . . . .	87
7.14 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) . . . . .	87
7.15 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) . . . . .	88
7.16 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) . . . . .	88
7.17 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) . . . . .	89
7.18 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ), para diferentes % de reforço . . . . .	89
7.19 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ) . . . . .	95
7.20 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ) . . . . .	95
7.21 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ) . . . . .	96
7.22 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ) . . . . .	96
7.23 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ) . . . . .	97
7.24 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) . . . . .	97
7.25 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) . . . . .	98

7.26 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) . . . . .	98
7.27 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) . . . . .	99
7.28 - Influência do tipo de matriz e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) . . . . .	99
7.29 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ ), para diferentes % de reforço . . . . .	100
7.30 - Influência do comprimento das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ), para diferentes % de reforço . . . . .	100
7.31 - Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ) em função da % das FV - valores experimentais e teóricos . . . . .	101
8.1 - Incremento na resistência à tração dos compostos pela incorporação do reforço . . . . .	104

## LISTA DE TABELAS

3.1 - Principais propriedades das fibras de vidro tipo "E" . . . . .	24
3.2 - Composição da fibra de vidro tipo "E" . . . . .	27
6.1 - Especificações dos ensaios mecânicos realizados . . . . .	61
7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos . . . . .	66
7.2 - Valor médio e desvio padrão da % de FV nas 20 regiões dos compostos PolyLite 8001 - "Roving" 825, 1/4" de comprimento . . . . .	71
7.3 - Resistência dos compostos ao impacto . . . . .	74
7.4 - Resistência dos compostos à flexão . . . . .	80
7.5 - Resistência dos compostos à compressão . . . . .	86
7.6 - Resistência dos compostos à tração . . . . .	93
7.7 - Módulo de elasticidade dos compostos na tração . . . . .	94

## 1- INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1- Comentário Inicial

O grande interesse no desenvolvimento de pesquisas em po  
límeros pode ser explicado com base em dois fatores: o crescente con  
sumo dos polímeros e a possibilidade de melhorar e modificar as pro  
priedades dos polímeros.

Os polímeros podem ser utilizados agregados a outros mate  
riais, inorgânicos e orgânicos, além de poderem receber reforços fi  
brosos de alta resistência, abrindo deste modo uma imensa gama de ma  
teriais de engenharia. Entre estes, estão os plásticos reforçados com  
fibras de vidro.

Assim, há uma crescente utilização dos plásticos reforça  
dos com fibras de vidro em substituição aos materiais convencionais  
como a madeira, o vidro e os metais. Tal substituição é feita com van  
tagens em função das excelentes propriedades dos plásticos reforçados  
com fibras de vidro, sendo que, entre estas propriedades se destacam  
a alta resistência mecânica específica e a estabilidade química.

Em virtude disto, as investigações no campo dos plásticos  
reforçados com fibras de vidro, principalmente dos poliésteres insatu  
rados com fibras de vidro, despertam especial interesse e crescem ano  
a ano.

### 1.2- Objetivo da Dissertação

A fibra de vidro é fabricada comercialmente em filamentos

contínuos ou sob forma de manta, que constitui um aglomerado aleatório de fibras com comprimento sempre superior a vinte e cinco milímetros. Desta forma, todas as pesquisas envolvendo resinas reforçadas empregam fibras de vidro dentro desta gama comercial. Não se conhecem estudos aprofundados envolvendo reforços com comprimentos inferiores a cinco milímetros.

Pode-se dizer que uma parcela não inferior a 10% da produção de fibras de vidro é rejeitada em suas várias fases de processamento, não encontrando ainda qualquer utilização prática. Devido à grande variedade de aspectos que apresentam as fibras rejeitadas, um para cada estágio de fabricação, normalmente consistindo num novelo emaranhado, a única maneira de uniformizar este material deve ser através da micropicagem com comprimentos variáveis entre 1 e 10 mm.

A presente pesquisa se propôs a verificar o efeito sobre as propriedades mecânicas das resinas termofixas de poliéster insaturado que traz a adição desta forma de reforço descontínuo, fibras de vidro curtas com comprimentos entre 1/8 e 1/2 polegada, abrindo caminho para o aproveitamento das fibras de vidro rejeitadas, em condições economicamente vantajosas.

### 1.3- Introdução Geral sobre Polímeros

Polímeros são materiais de alto peso molecular, ou seja, materiais com cadeias longas. Cada cadeia polimérica é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas unidades estruturais ligadas por covalência. As muitas unidades de repetição (meros) de cada cadeia são geradas a partir de pequenas moléculas (monômeros), que são

as matérias primas dos polímeros.

Em relação à origem os polímeros se dividem em: naturais, artificiais ou naturais modificados e sintéticos. Para os polímeros sintéticos, a obtenção do polímero por reações químicas é a síntese ou polimerização deste polímero.

As polimerizações se dividem em dois grandes grupos:

a) Polimerização em cadeia ou poliadição: para monômeros in saturados, sendo que a polimerização ocorre por quebra de ligações du plas carbono-carbono de cada monômero e formação de ligações simples carbono-carbono entre monômeros distintos. A Figura 1.1 mostra o es quema de uma poliadição para monômeros vinílicos.

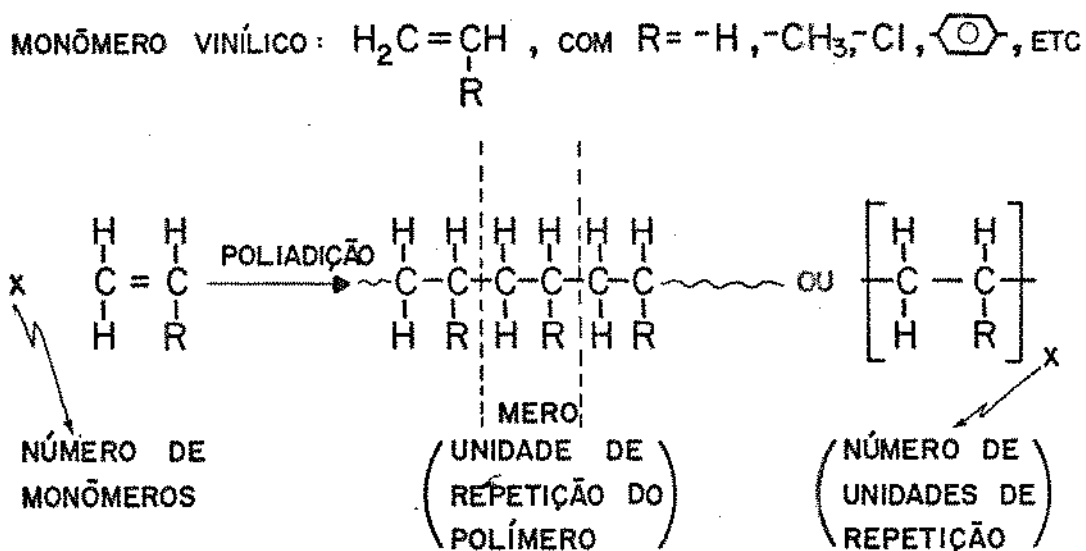


FIGURA 1.1- Esquema de formação de uma das cadeias poliméricas na poliadição de monômeros vinílicos.

b) Polimerização em etapas ou policondensação: para monômeros ou materiais iniciais com grupos funcionais reativos; a polimerização ocorre pela condensação de grupos funcionais reativos dos monô



meros com formação da unidade de repetição do polímero e liberação de sub-produtos de baixo peso molecular, principalmente água. A Figura 1.2 ilustra o esquema de uma policondensação para a obtenção de um poliéster.

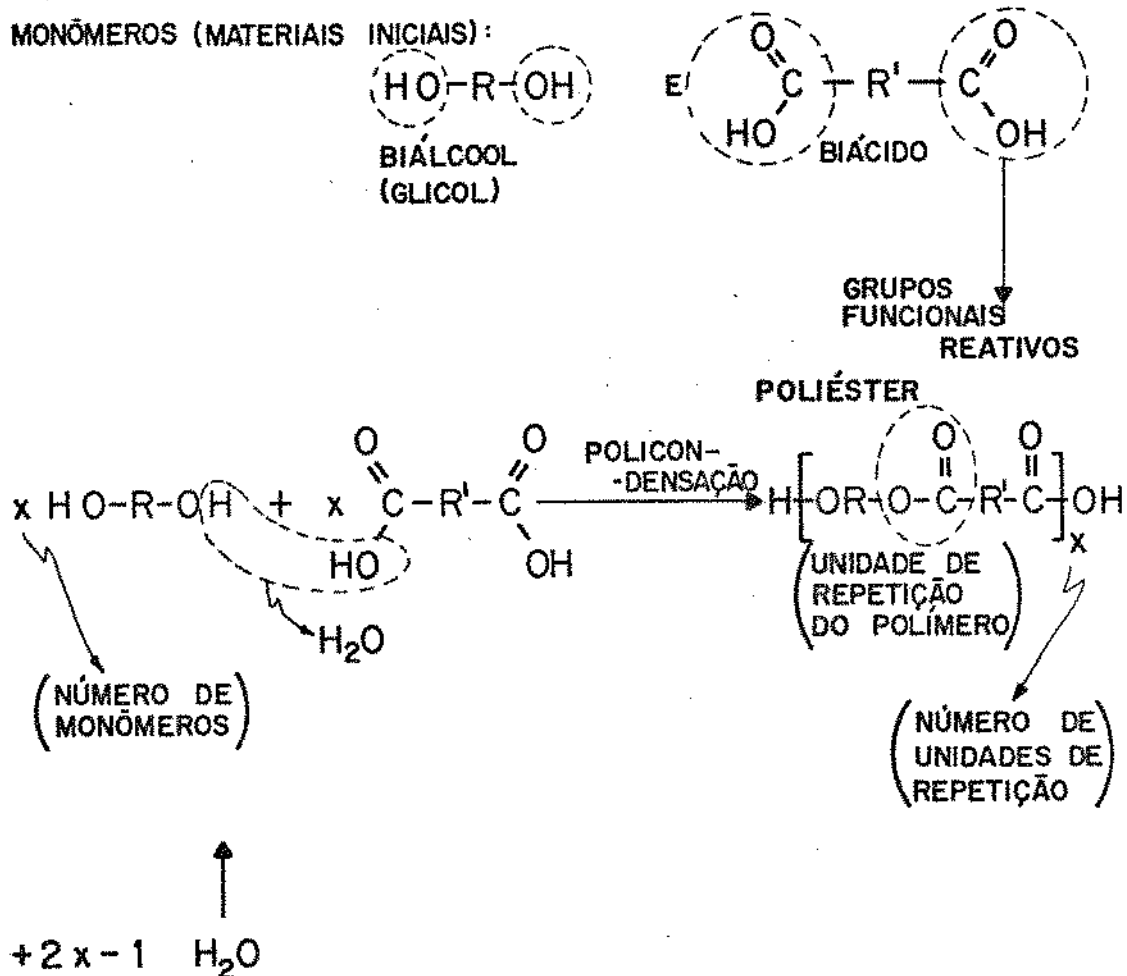


FIGURA 1.2 - Esquema de formação de uma das cadeias poliméricas na policondensação de um poliéster.

Os polímeros, dependendo de suas propriedades, características, processamento e forma de aplicação, quando empregados como produtos fornecem: plásticos, borrachas, fibras, adesivos, espumas, tintas e revestimentos.

Os plásticos, em função do tipo de cadeia polimérica e, conseqüentemente, das suas propriedades tecnológicas, são divididos

em duas grandes classes: termoplásticos e termofixos (termorrígidos ou termoestáveis).

Os termoplásticos são polímeros com cadeias lineares ou ramificadas, ou seja, com cadeias não interligadas como mostra a Fig. 1.3a. Em consequência disto, os termoplásticos amolecem sob efeito de temperatura e pressão, podem ser remoldados e solúveis em solventes adequados. São exemplos de termoplásticos: polietilenos de baixa e alta densidade, polipropileno, poliestireno, policloreto de vinila (PVC) e poliésteres saturados.

Os termofixos são polímeros com cadeias interligadas por ligações químicas covalentes, que formam as ligações cruzadas ou pontes entre cadeias como mostra a Fig. 1.3b. Assim, os termofixos são infusíveis, insolúveis e não podem ser remoldados. Formam os principais polímeros termofixos: poliésteres insaturados, epoxi, fenol-formaldeído (baquelite), melamina-formaldeído e uréia-formaldeído.

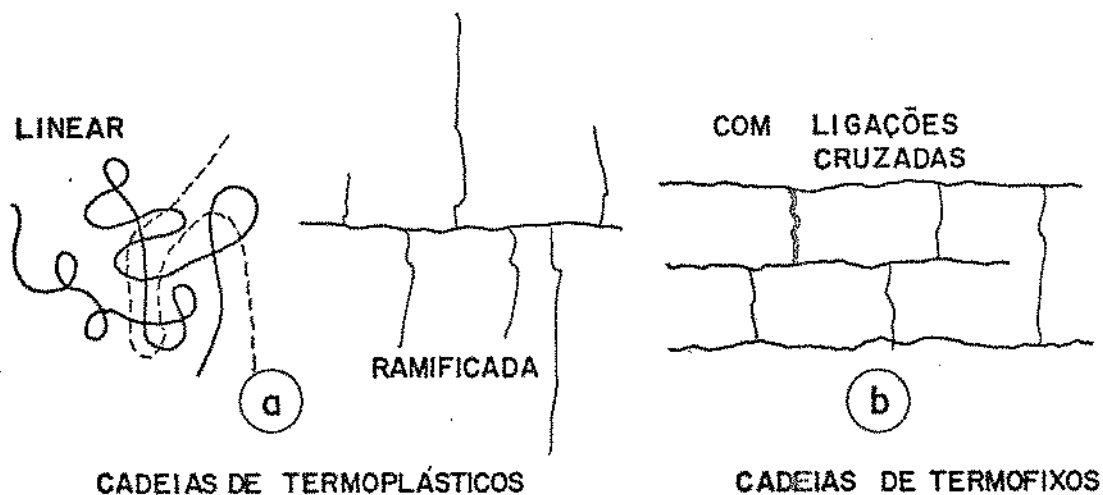


FIGURA 1.3 - Diferentes tipos de cadeias poliméricas

## 2- RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO

Poliésteres são compostos químicos orgânicos que se enquadram na categoria dos polímeros, sendo produtos da reação de policondensação de álcoois di-hídricos (diálcoois) ou polihídricos e ácidos dibásicos (bifuncionais) ou polibásicos. Tecnicamente, os poliésteres pertencem à classe dos materiais plásticos.

O termo poliéster é muito genérico, pois, dependendo dos reagentes que participam da policondensação são obtidos poliésteres com características e aplicações diferentes. Assim, os poliésteres incluem:

- poliésteres saturados, como por exemplo o polietileno tereftalato, obtido pela policondensação do etileno glicol com o ácido tereftálico (ácido saturado) e que forma fibras e filmes.

- poliésteres modificados por ácidos graxos e óleos, que formam as resinas alquídicas muito usadas em tintas.

- poliésteres insaturados, que possuem insaturações não aromáticas, sendo normalmente obtidos pela policondensação de diálcoois (glicóis) com ácidos ou anidridos de ácidos insaturados; são usados como plásticos reforçados, principalmente com fibras de vidro.

As resinas de poliéster insaturado por razões técnicas e econômicas formam a maioria das matrizes para os plásticos reforçados com fibras de vidro e a base de toda a indústria dos plásticos reforçados, sendo que serão as únicas abordadas neste trabalho.

## 2.1- Conceituação das Resinas de Poliéster Insaturado (PI)

Desde a sua descoberta e primeiras utilizações os poliésteres insaturados (PI) tiveram uma grande aceitação, pois: permitiam fácil manuseio na forma líquida; podiam ser moldados à frio, e, em muitos casos sem pressão; podiam ser utilizados em peças de grande dimensão; tinham boas propriedades; não se deformavam pelo calor após a cura, sendo classificados como resinas termofixas; permitiam fácil pigmentação e modificação para aplicações especiais.

Os poliésteres insaturados (PI) comuns ou de uso geral contem normalmente ácido ou anidrido ftálico, ácido fumárico ou anidrido maléico e glicóis, combinados quimicamente e dissolvidos em monômeros vinílicos não saturados (principalmente estireno). O PI é apresentado como uma resina líquida xaroposa, que após a cura se transforma em um polímero sólido insolúvel, infusível, que não se altera, sendo dificilmente atacado por produtos químicos e solventes.

Estruturalmente pode-se considerar o PI como um polímero linear não saturado, ou seja, uma cadeia de poliéster linear contendo uma série de duplas ligações provenientes, por exemplo, do anidrido maléico e que são os pontos reativos onde, depois da adição de catalizador e acelerador (sistema que promove a cura), vão ocorrer as reações de polimerização e cura.

Dependendo dos tipos e proporções das matérias primas empregadas e das condições do processo pode-se obter resinas PI com as mais diversas características no que se refere ao grau de reatividade, resistência química, propriedades mecânicas, resistência ao calor etc., para um ilimitado número de aplicações. Deste modo, a resistência química de um PI está principalmente ligada à sua estrutura mole

cular ou seja ao seu peso molecular, índice de acidez, quantidade de grupos ésteres formados e densidade de ligações cruzadas.

Basicamente um poliéster insaturado é obtido pela condensação de três tipos de componentes: ácidos saturados, ácidos ou anídridos insaturados e glicóis. Como já mencionado, para um poliéster comum temos o ácido ou anidrido ftálico como ácido saturado, o ácido fumárico ou o anidrido maléico como ácido ou anidrido insaturado, e, o etileno e propileno glicol como glicóis empregados.

A função dos ácidos ou anidridos insaturados é fornecer as insaturações, isto é, os pontos reativos para a formação das ligações cruzadas entre as cadeias do polímero durante a cura. Os ácidos saturados são responsáveis pela distância das moléculas do ácido insaturado, distância das insaturações ao longo da cadeia do poliéster. O glicol é o componente que participa da policondensação com os ácidos, possibilitando a esterificação com a formação do poliéster.

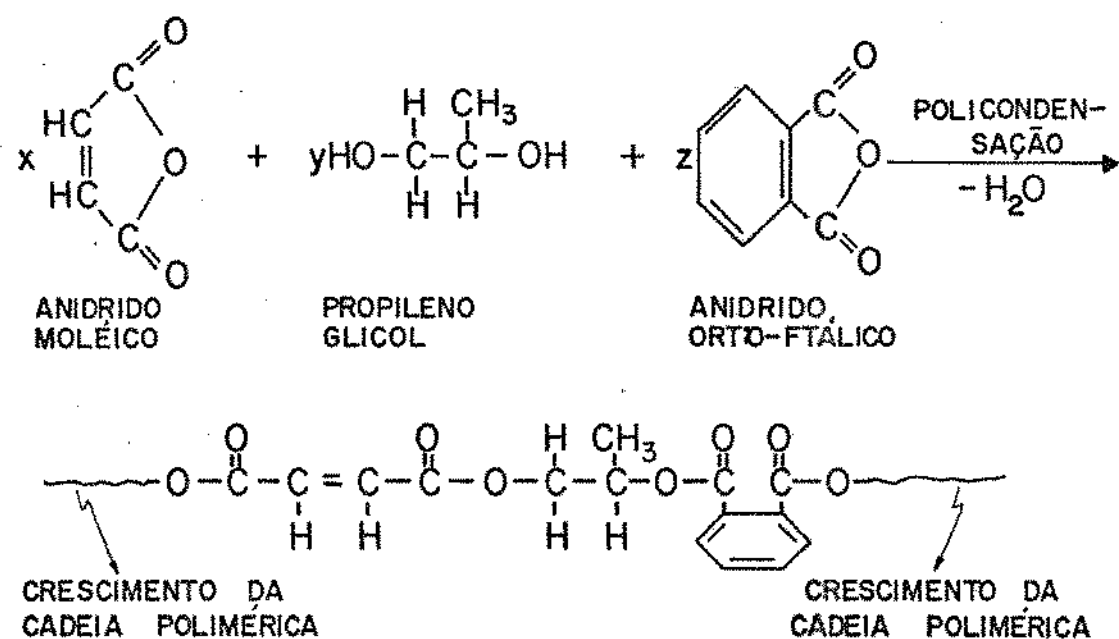


FIGURA 2.1 - Esquema simplificado da formação de uma cadeia de poliéster insaturado de uso geral.

A função do monômero vinílico insaturado (diluyente), normalmente estireno, é a de dissolver e controlar a viscosidade do polímero formado na reação de esterificação e participar da cura como copolímero ligado às cadeias do poliéster através dos pontos onde existiam as insaturações.

A Figura 2.1 apresenta um esquema simplificado da policondensação para a obtenção de um PI de uso geral. O esquema da solução deste poliéster no diluyente estireno é mostrado na Figura 2.2.

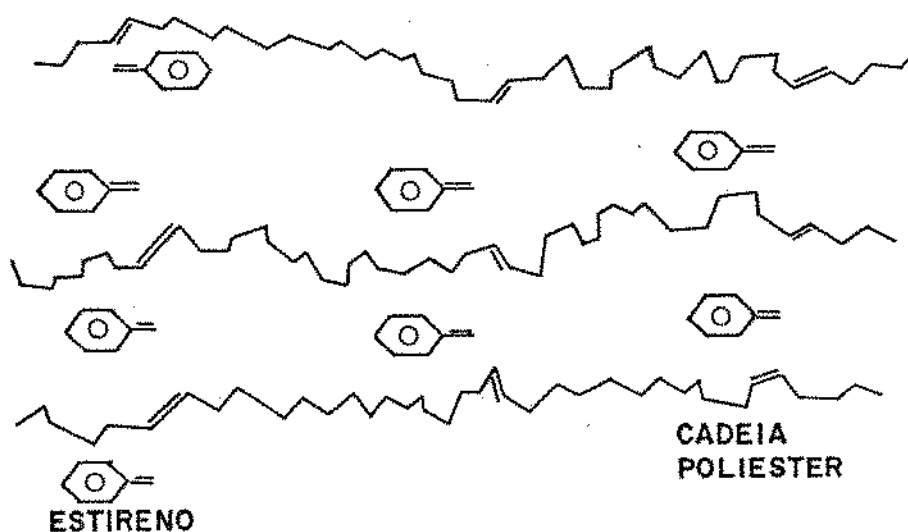


FIGURA 2.2 - Esquema simplificado da solução do poliéster insaturado no diluyente estireno.

## 2.2- Tipos de Poliésteres Insaturados

Como os poliésteres insaturados podem empregar diferentes componentes para obtenção de sua composição química, a partir desta é possível dividi-los principalmente em: poliésteres orto-ftálicos ou de

uso geral, poliésteres isoftálicos, resinas de poliéster bisfenólicas, resinas éster-vinílicas, poliésteres flexíveis e poliésteres especiais com finalidades específicas.

### 2.2.1- Poliésteres Ortoftálicos

Os poliésteres ortoftálicos conhecidos como PI de uso geral são obtidos tendo o ácido ortoftálico, normalmente empregado na forma de anidrido ortoftálico, com ácido saturado. O esquema da Figura 2.1 caracteriza este tipo de poliéster obtido com o anidrido ortoftálico, anidrido maléico e o propileno glicol.

No poliéster ortoftálico os dois radicais provenientes do ácido ortoftálico (ou do seu anidrido), em razão do seu pequeno espaçamento interferem entre si na cadeia polimérica em formação, fornecendo um poliéster de cadeia relativamente curta e dando origem à alta frequência de ligações éster. Uma outra característica que ocorre em quase todos os casos práticos é a necessidade da utilização de excesso do glicol para produzir um poliéster com baixo índice de acidez. Este excesso de glicol prejudica a resistência química do polímero.

Nas resinas ortoftálicas comerciais o ácido ou anidrido ortoftálico entra em proporções de 10 a 60% da fase ácida, sendo quanto maior a sua porcentagem em relação ao ácido insaturado menos rígido e menos reativo vai ser o polímero. Os poliésteres ortoftálicos podem ser rígidos ou flexíveis, desde que sejam introduzidos outros componentes flexibilizantes em sua cadeia molecular.

Na presente pesquisa foram utilizadas resinas de poliéster ortoftálicos especificadas no item 6.2.

### 2.2.2- Poliésteres Isoftálicos

Os poliésteres isoftálicos são obtidos substituindo o ácido ortoftálico pelo ácido isoftálico. Este, devido a maior distância entre os radicais ácidos, permite a obtenção de polímeros de maior peso molecular (polímero com cadeias mais longas) sem excesso de glicol, implicando em melhores propriedades químicas e mecânicas em relação ao poliéster ortoftálico, como por exemplo, maior resistência ao impacto por apresentar um peso molecular mais elevado. A Figura 2.3 representa a cadeia polimérica de um PI isoftálico.

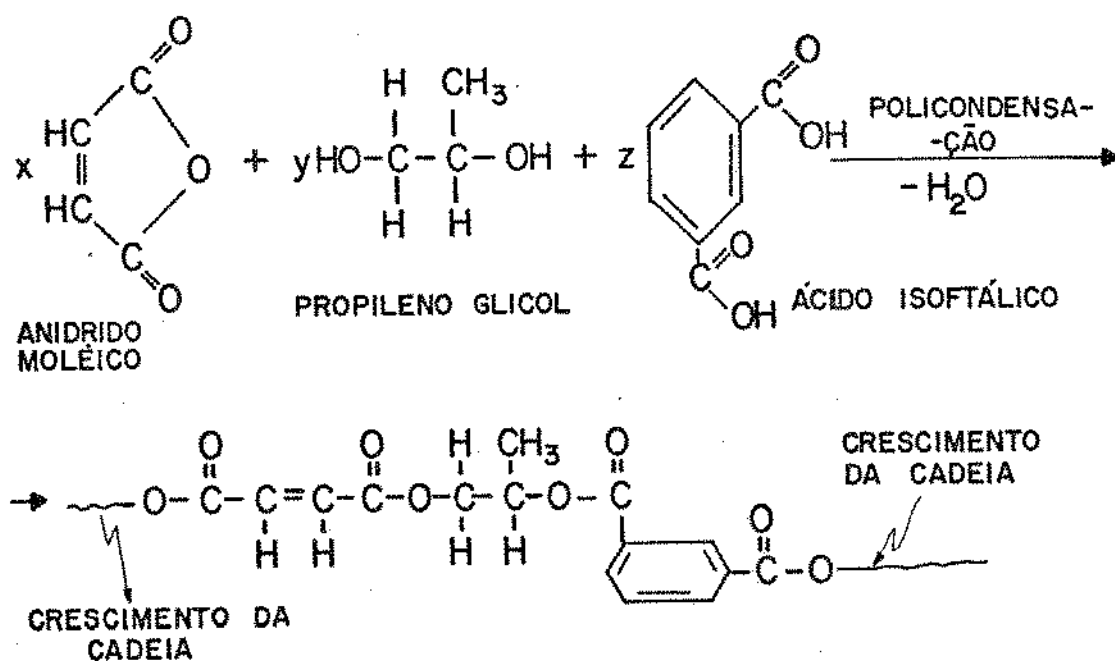


FIGURA 2.3 - Representação da obtenção da cadeia polimérica do poliéster insaturado isoftálico.



Para as resinas isoftálicas, o peso molecular mais elevado implica na maior viscosidade da resina líquida, que determina uma diluição com maiores quantidades do diluente estireno, entretanto não suficiente para modificar a cura da resina. Uma variação importante das resinas isoftálicas é a sua obtenção com neopentil-glicol, apresentando alto peso molecular e uma viscosidade normal.

### 2.2.3- Resinas de Poliéster Bisfenólicas

As resinas de poliéster bisfenólicas são obtidas pela condensação do óxido de propileno com o bisfenol A, e, posterior reação com o ácido insaturado. A Figura 2.4 apresenta o esquema de uma cadeia da resina bisfenólica.

Estas resinas bisfenólicas, cuja estrutura apresenta poucas ligações éster, têm boa resistência à degradação hidrolítica pelo ataque a estas ligações. Além disto, a presença de grupos aromáticos na cadeia principal pelo emprego do glicol aromático substituindo o glicol alifático reduz muito a hidrólise, onde o glicol é um componente importante.

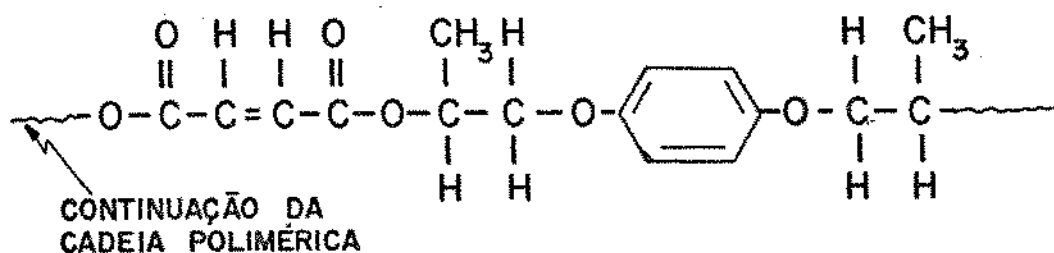


FIGURA 2.4 - Representação simplificada da cadeia das resinas de poliéster bisfenólicas.

Devido a sua estrutura molecular as resinas bisfenólicas apresentam temperatura de deflexão ao calor e rigidez maiores que os outros tipos de poliéster.

#### 2.2.4- Resinas Éster-Vinílicas

Este tipo de poliéster é obtido pela condensação da epícloridrina com o bisfenol A, seguida de modificação com derivados acrilados. A estrutura molecular do polímero apresenta grupos ésteres próximos a ligações vinílicas. A Figura 2.5 mostra o esquema de uma cadeia da resina éster-vinílica.

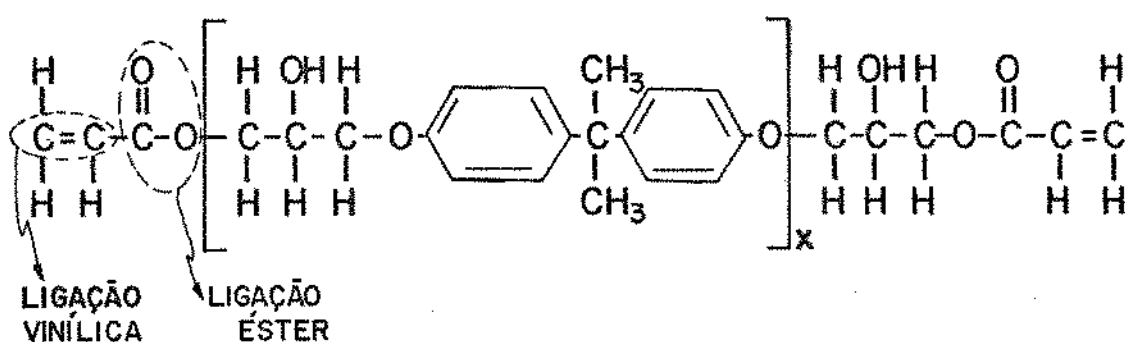


FIGURA 2.5 - Representação simplificada da cadeia das resinas éster-vinílicas.

As ligações vinílicas, dupla ligações carbono-carbono, que são os pontos ativos para a formação das ligações cruzadas, se localizam nas extremidades das cadeias poliméricas. A ausência das ligações cruzadas nas regiões internas das cadeias permite que o polímero absorva energia tendo boa resistência ao impacto.

Mesmo apresentando baixo peso molecular, as resinas éster-

vinílicas têm alta resistência química devido à pequena relação de grupos ésteres para insaturações das cadeias.

### 2.2.5- Poliésteres Flexíveis

O principal fator que induz flexibilidade a um PI é a presença em grandes quantidades de longas cadeias moleculares saturadas, em relação aos componentes insaturados. Isto, diminui a densidade de ligações cruzadas e as ramificações das cadeias. A Figura 2.6 mostra a cadeia de um poliéster flexível pela incorporação do ácido adípico ( $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$ ) como flexibilizante.

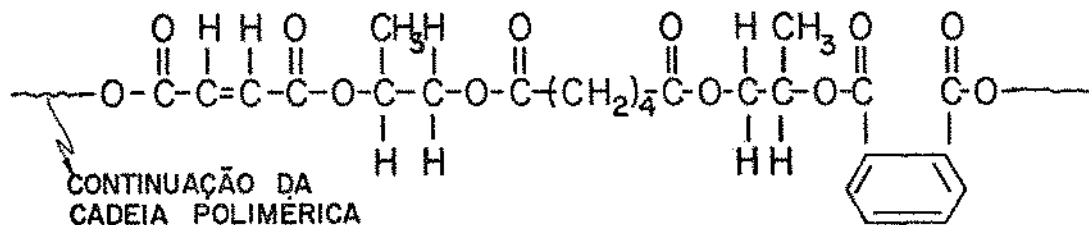


FIGURA 2.6 - Representação simplificada da cadeia de um poliéster insaturado flexível.

Em relação ao ácido insaturado, grandes quantidades de ácidos alifáticos saturados, mais flexibilizantes do que os ácidos aromáticos saturados e com flexibilidade crescente com o comprimento de cadeia, provocam a flexibilidade da resina curada. Esta mesma condição vale para os glicóis alifáticos, embora com a restrição da diminuição na resistência química do polímero.

Em relação à rigidez os PI podem ser separados em: rígidos, semi-rígidos e flexíveis.

Desde que sejam compatíveis, resinas rígidas podem ser misturadas entre si e com outros tipos de resinas mais flexíveis para a obtenção de uma mistura polimérica com maior flexibilidade e maior resistência ao impacto. Estas misturas foram realizadas nesta presente pesquisa.

#### 2.2.6- Poliésteres Especiais

Podem ser obtidos outros tipos de PI com diferentes formulações que introduzem características especiais ao polímero. Um exemplo é o caso dos poliésteres auto-extinguíveis ou resistentes ao fogo.

Os poliésteres auto-extinguíveis ou resistentes ao fogo são obtidos pela inclusão de compostos halogenados na cadeia polimérica, como por exemplo o anidrido tetracloroftálico, ou, pela utilização de aditivos retardantes de chama, externos à cadeia polimérica, como as parafinas cloradas e o trióxido de antimônio. Estas formulações provocam grande aumento na resistência do polímero ao fogo.

#### 2.3- Monômeros de Interligação

Nas resinas de PI, os monômeros de interligação ou diluentes são empregados com duas funções:

- o monômero serve como solvente (diluyente) controlando a viscosidade da resina de poliéster no estado líquido viscoso antes da cura (ver Fig. 2.2).

- participa da copolimerização com os pontos de insaturação das cadeias do poliéster, até então lineares, formando ligações cruzadas (ponte) entre cadeias distintas, ou seja, a cura originando o retículo tridimensional e transformando a resina de um líquido viscoso para um sólido.

Pela forma como desempenha estas duas funções, além da razão econômica, o monômero mais empregado como diluyente e monômero de interligação é o estireno.

Normalmente, as resinas comerciais de PI contém cerca de 70% da resina para aproximadamente 30% de estireno. Para tornar a resina mais fluída podem ser adicionadas maiores quantidades de estireno, mas, verificou-se que a proporção 65% de resina de poliéster e 35% de estireno é considerada como sendo ótima na maioria das formulações, embora seja variável com estas. A quantidade de estireno pode variar de 25 a 45%, mas, grandes quantidades de estireno modificam as características de cura e as propriedades finais do produto, que pode se tornar quebradiço e sensível ao calor.

#### 2.4- Catalizadores e Aceleradores

Os primeiros poliésteres insaturados que apareceram eram curados, isto é, endurecidos, através de calor. Entretanto, logo foram encontrados sistemas contendo certas substâncias que na temperatu

ra ambiente promoviam a cura, isto é, a reação de "copolimerização" que leva ao endurecimento pela formação de ligações cruzadas e transformação do PI em termorrígido. Estes sistemas são formados por catalizadores (ou iniciadores) e aceleradores.

Catalizadores (ou iniciadores)\* são substâncias químicas de alta reatividade que por decomposição formam radicais livres. Esta decomposição pode ser obtida termicamente numa temperatura em que a taxa de geração de radicais livres é suficiente para promover uma cura cineticamente viável ou na temperatura ambiente pela adição de aceleradores que funcionam como iniciadores do processo de geração de radicais livres.

Os catalizadores mais importantes são os peróxidos orgânicos, que formam uma grande classe de compostos químicos caracterizados pela presença de ligações químicas entre dois átomos de oxigênio. A Figura 2.7 ilustra a fórmula química de dois catalizadores do tipo peróxido orgânico: o peróxido de metil etil cetona (peróxido MEK) e o peróxido de benzóila.

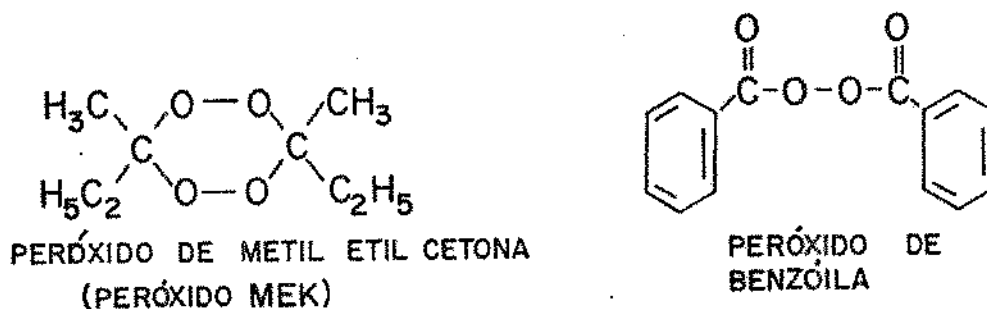


FIGURA 2.7 - Fórmulas químicas dos catalizadores do tipo peróxido orgânico.

\* O termo catalizador é largamente utilizado por razões históricas. Como por este processo de polimerização, fragmentos de catalizador ficam presos na cadeia polimérica, contrariando a sua definição clássica, o melhor nome para estas substâncias deveria ser iniciador.

Os aceleradores são compostos químicos que possuem a propriedade de decompor os peróxidos orgânicos à temperatura ambiente. É importante frisar que os peróxidos orgânicos normalmente são estáveis à temperatura ambiente, sem a presença dos aceleradores. Os aceleradores mais comuns são: o naftalenato de cobalto, o naftalenato de manganês e as aminas terciárias. O naftalenato de cobalto é empregado com um conteúdo de 6% do metal, se apresentando como um líquido vermelho escuro e viscoso.

Para cada catalizador existe um acelerador mais eficiente. Por exemplo, para o peróxido de metil etil cetona emprega-se o naftalenato de cobalto e para o peróxido de benzóila emprega-se dimetil amina.

Através das quantidades de catalizador e acelerador adicionadas pode-se regular a velocidade da cura. As porcentagens de catalizador e acelerador necessárias para efetuar a cura, embora variem com a temperatura e com a velocidade desejada para a cura, normalmente são próximas de 1% de catalizador e 0,5% de acelerador.

Aqui, devem ser consideradas as seguintes observações:

1) As resinas de PI entre a fabricação do pré-polímero e a utilização, quando se promove a cura, enfrentam um período de armazenamento. Para evitar o início prematuro da cura, que pode ocorrer através da geração térmica de radicais livres, são empregados inibidores. Estes inibidores são altamente reativos e eliminam os radicais livres gerados antes que eles iniciem a cura, sendo consumidos nesta eliminação. Os inibidores mais empregados são as quinonas (hidroquinonas), em quantidades de aproximadamente 100 ppm ou de acordo com as condições de armazenamento.

2) O acelerador só atua em presença do catalizador. Assim, as

resinas de poliéster podem ser pré-aceleradas.

3) O catalizador e o acelerador não devem ser misturados entre si, pois, esta reação é perigosa. O procedimento mais correto é o de incorporar primeiramente o acelerador na resina de poliéster, com a posterior adição do catalizador.

## 2.5- Processo de Cura das Resinas de Poliéster Insaturado

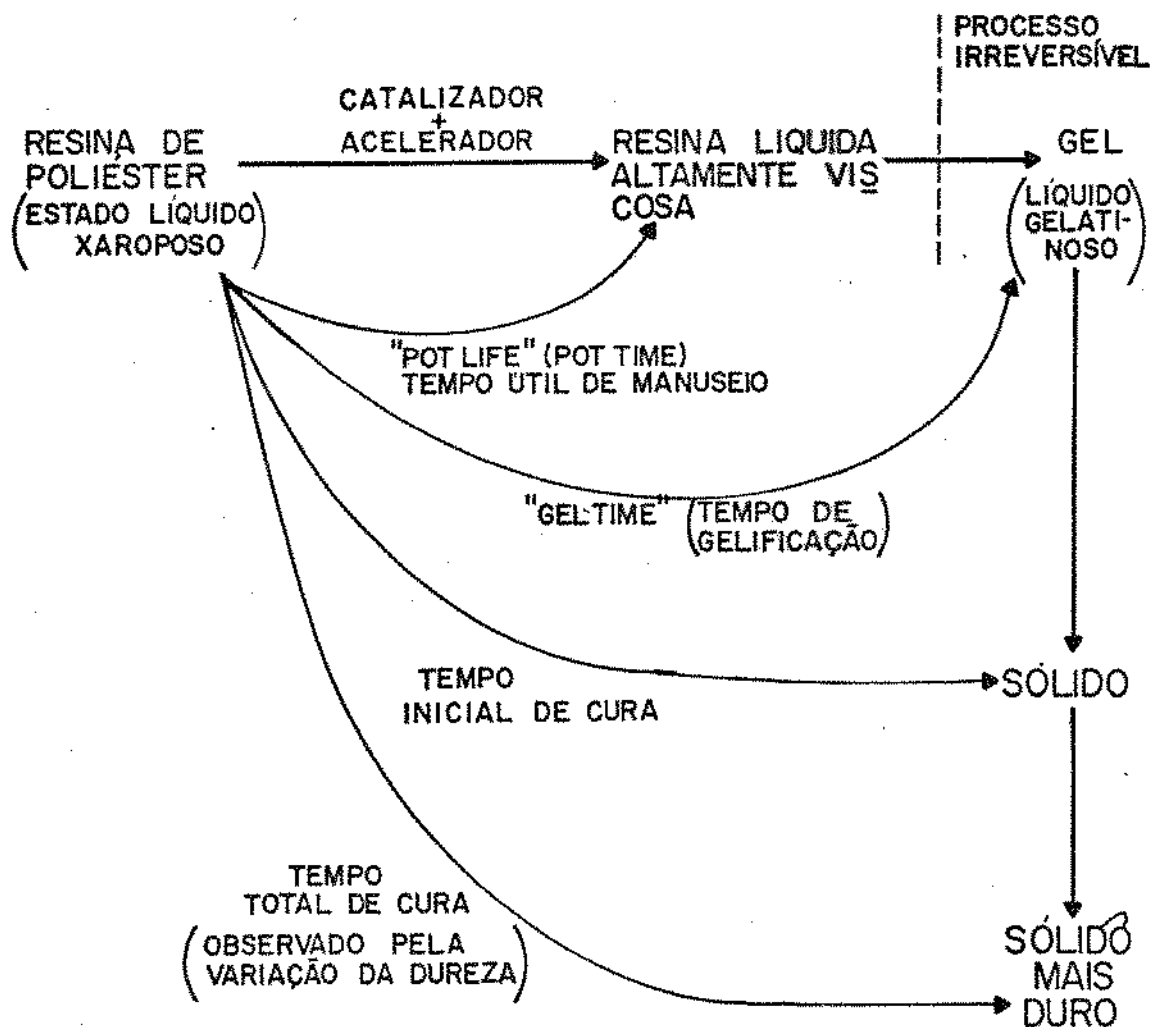
A reação de cura é uma reação de adição, que ocorre sem liberação de materiais voláteis. Como já mencionado, o monômero no qual a resina de poliéster está dissolvida reage com as insaturações do poliéster formando as ligações cruzadas e transformando o poliéster num polímero termofixo (termorrígido) com cadeias interligadas.

A iniciação das reações de cura se processa com a geração de radicais livres. Esta criação de radicais livres é conseguida pela incorporação do catalizador e acelerador na resina de poliéster quando da realização da cura. Por exemplo, na presença de cobalto, o peróxido de metil etil cetona forma radicais livres à temperatura ambiente.

A sequência do processo envolve o ataque destes radicais livres às duplas ligações do monômero e do poliéster. Isto leva à ruptura das duplas ligações com a formação de ligações cruzadas simples entre cadeias, com os monômeros sendo as pontes destas ligações. Este processo de reações segue em cadeia até que toda a massa polimérica se transforme de líquido a sólido.

As transformações que ocorrem durante o processo de cura da resina são as seguintes:





Estas características da cura podem variar de acordo com a escolha da resina, com a temperatura, e, principalmente com as quantidades de acelerador e catalizador adicionadas. Um fator importante é a quantidade ideal do monômero de interligação, que normalmente é da ordem de 30%.

O processo de cura é exotérmico, desprendendo uma grande quantidade de calor. Uma vez iniciado, é de difícil interrupção e normalmente em alguns minutos a resina já atinge o tempo de gelificação, ou seja, o processo passa a ser irreversível. O tempo de gelificação, tempo parâmetro de controle do processo de cura, é o tempo entre a adição do catalizador e acelerador e o início de endurecimento

da resina, atingindo o estado gelatinoso. Num gráfico da temperatura da amostra em função do tempo, observa-se o comportamento exotérmico com grande aumento de temperatura a partir do tempo de gelificação (Fig. 2.8).

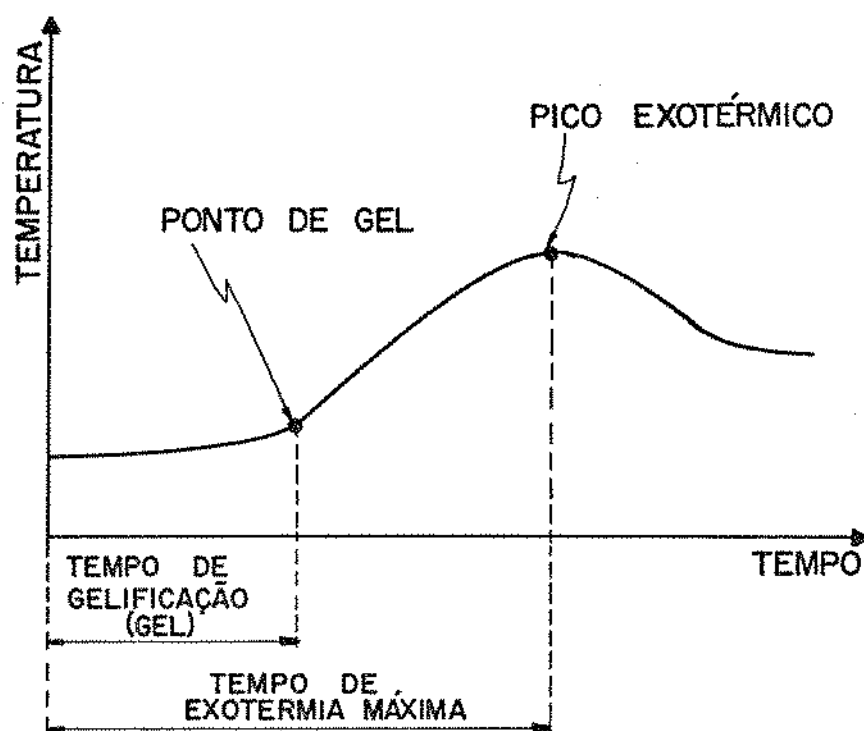


FIGURA 2.8 - Gráfico da temperatura da resina polimérica em função do tempo, no processo de cura.

A Fig. 2.9 mostra um esquema das reações do processo de cura de uma resina de poliéster insaturado, empregando peróxido de metil etil cetona como catalizador, naftalenato de cobalto como acelerador e o estireno como monômero de interligação.

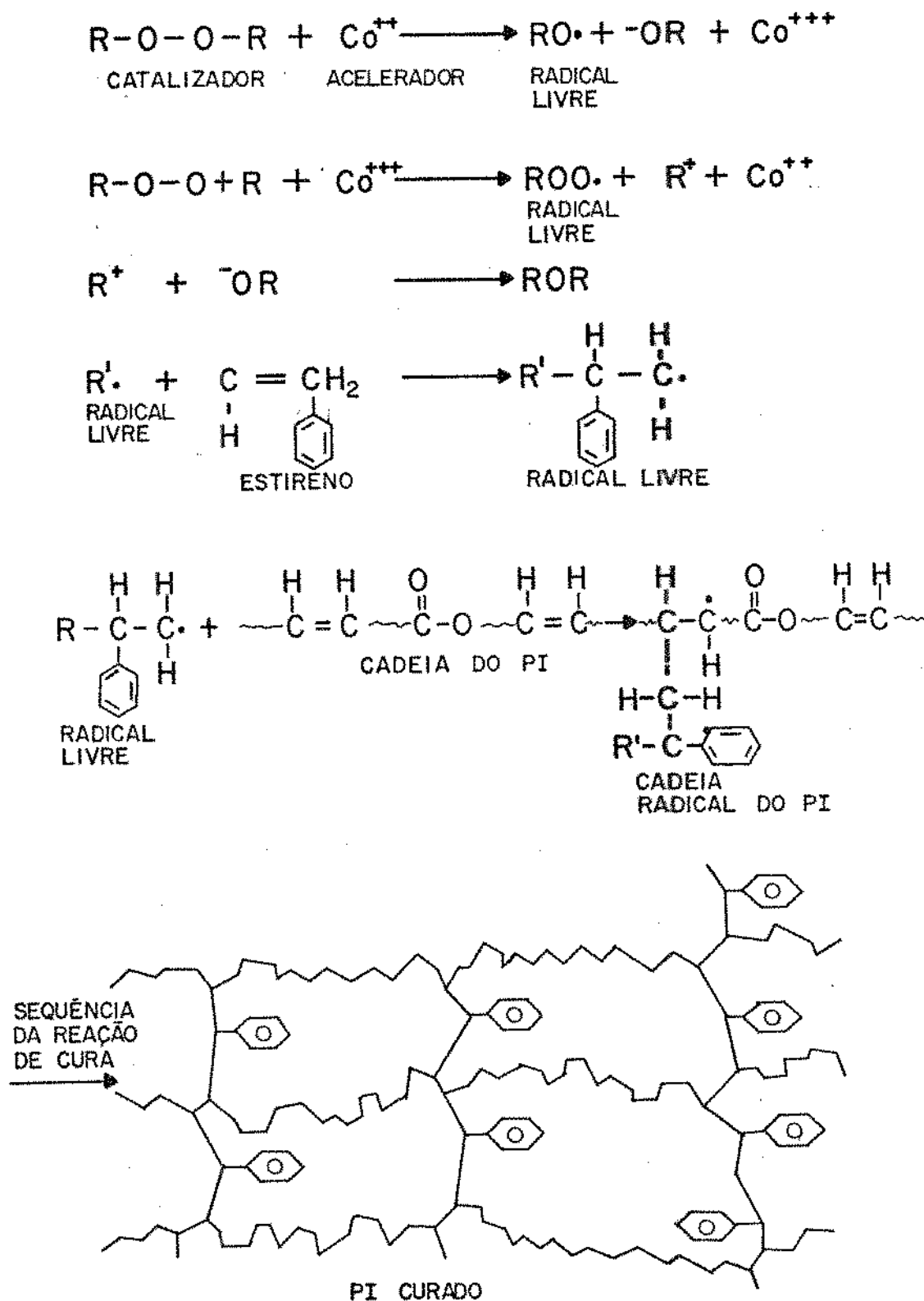


FIGURA 2.9 - Esquema das reações do processo de cura de uma resina de poliéster insaturado.

### 3- FIBRAS DE VIDRO

#### 3.1- Características e Propriedades das Fibras de Vidro

A fibra de vidro (FV) é o material básico de reforço empregado na moldagem dos polímeros, originando uma família de materiais de engenharia designada como plásticos reforçados e chamados em linguagem comum de "fiber glass". Diversos são os polímeros reforçados com fibras de vidro, sendo os principais: poliésteres insaturados, resinas epoxi, nylons, polietilenos, polipropileno e o terpolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). As resinas de poliéster insaturado reforçadas com fibras de vidro formam a classe mais importante dos plásticos reforçados em termos de volume e diversidade de aplicações.

Possuindo uma série de características inerentes e propriedades excepcionais, a FV é o reforço ideal para a fabricação de plásticos reforçados. Entre as características e propriedades das fibras de vidro podem ser citadas:

- perfeita elasticidade e excelentes propriedades mecânicas, incluindo a alta resistência à tração.
- excelentes propriedades dielétricas, com alta rigidez e baixa constante dielétrica.
- alta resistência a produtos químicos, solventes, à água, à degradação bioquímica e às intempéries.
- translucidez.
- a utilização até 500°C, sendo incombustível e dissipando bem o calor.

A fibra de vidro que se emprega para isolamento térmico

ou acústico, conhecida como lã de vidro, não é a mesma que se usa no reforçamento de plásticos, pois esta última em termos gerais é considerada neutra. Para a fabricação das FV é necessário um vidro especial, normalmente vidro tipo E contendo óxidos de silício (principal componente), boro, alumínio, cálcio, magnésio e com teor alcalino menor que 1%.

A Tabela 3.1 mostra as principais propriedades das FV tipo E.

Além de possuir uma composição especial, as FV têm superfície tratada com compostos especiais de silano, cromo e outros, para que haja uma ligação química efetiva entre a matriz (resina de poliéster insaturado) e o reforço (fibra de vidro).

As quantidades de FV utilizadas com as resinas de poliéster insaturado variam em uma ampla faixa dependendo principalmente do

TABELA 3.1 - Principais propriedades das fibras de vidro tipo "E"

PROPRIEDADES	FV, TIPO "E"
Peso específico	2,55 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à tração	35.000 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade à tração	7,5.10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Alongamento até ruptura	4,8 %
Recuperação elástica	100 %
Coefficiente de expansão térmica	4,6 10 <sup>-6</sup> cm/cm °C
Rigidez dielétrica (valor eficaz)	> 100 KV/mm
Constante dielétrica entre 50 e 10 <sup>6</sup> Hz	6 a 7
Índice de refração	1,55

processo de fabricação e do arranjo das fibras, mas, normalmente, es tão situadas entre 20% e 75% em peso. Em certas massas pré-mistura das, empregadas em modelagem à pressão, são usados 5% em peso de FV, enquanto que para certos produtos como varas de pesca são empregados 70% em peso de FV.

### 3.2- Tipos de Vidro e Composição da Fibra de Vidro Utilizada

Todo líquido ao ser resfriado se solidifica, organizando-se ou não em unidades que se repetem regularmente formando uma rede cristalina. Os vidros fundidos possuem alta viscosidade que causa uma baixa mobilidade dos seus átomos constituintes, dificultando a orien tação regular e organizada destas unidades básicas. Assim, os vidros, obtidos pela fusão de uma mistura de óxidos inorgânicos, dos quais, a sílica ou bióxido de silício é o mais importante, quando resfriados ao estado sólido não cristalizam e se caracterizam como materiais ví treos, amorfos ou não cristalinos, rígidos, definidos como líquidos super resfriados.

Comercialmente existem vários tipos de vidro que se carac terizam pelas suas composições e consequentes propriedades físico-me cânicas, químicas e elétricas. Estes vidros são diferenciados por le tras do alfabeto que designam suas principais propriedades.

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é o principal componente dos vidros comer ciais. Possuindo uma configuração tetraédrica onde o átomo de silício é envolvido por quatro átomos de oxigênio, a sílica é inerte em mui tos ambientes sendo responsável pela resistência química e pelas pro

priedades típicas dos vidros. Juntamente com a sílica são empregados agentes modificadores a fim de controlar o processamento e as propriedades finais dos vidros.

A sílica, modificada com óxido de sódio, agente fluidizante que a dissolve abaixando a viscosidade e o ponto de fusão da mistura, com óxido de cálcio, cujo objetivo é aumentar a resistência química da estrutura amorfa, e, com outros óxidos formadores de retículo, forma uma composição conhecida como vidro alcalino ou vidro tipo A, que não possui nenhuma característica de boas propriedades físico-mecânicas ou químicas. Os óxidos de sódio e cálcio não participam do retículo amorfo, ficando soltos na estrutura. Os pequenos átomos de sódio têm uma relativa mobilidade sendo facilmente extraídos para a superfície. Os átomos de cálcio maiores, dificultam esta extração. Estes fatores contribuem para que o vidro tipo A seja atacado pela água.

Desta forma, os vidros tipo A, alcalinos e baratos, são utilizados em aplicações comuns. Não se prestam para a fabricação de FV de pequeno diâmetro, pois a relação área superficial/volume é muito grande, o que os tornaria muito vulneráveis à ação deterioradora da umidade.

Os vidros planos apresentam baixa resistência à tração devido a existência de imperfeições superficiais, ou seja microtrincas superficiais. As FV por possuírem um mínimo de óxidos alcalinos, como o óxido de sódio, não apresentam microtrincas superficiais cuja propagação enfraquece a estrutura do material. Além disto, as FV não têm tensões residuais, pois o seu pequeno diâmetro permite que toda a massa vítrea seja simultânea e rapidamente resfriada, gerando também um retículo amorfo com orientação muito aleatória. Assim, as FV pos

suem alta resistência à tração e são flexíveis, em oposição aos vidros maciços.

Atualmente as FV utilizadas para reforço de plásticos são fabricadas quase exclusivamente com uma formulação especial conhecida por vidro tipo E. As outras composições compatíveis para a fabricação de fibras de vidro são pouco empregadas. Por exemplo, o emprego do vidro tipo C, "vidro químico", em aplicações especiais que exigem alta resistência química.

O vidro têxtil padrão tipo E, "vidro elétrico", apresenta alto desempenho em inúmeras aplicações em razão de suas propriedades físico-mecânicas e elétricas. Estas são originadas da composição do vidro E: sílica com principal componente, óxido de boro como agente fluidizante, óxidos de alumínio, cálcio e magnésio como modificadores, e, um baixo teor de álcalis. A Tabela 3.2 mostra os limites de variação da composição do vidro E.

TABELA 3.2 - Composição da Fibra de vidro Tipo "E"

ÓXIDOS INORGÂNICOS	%	
SiO <sub>2</sub>	52	- 56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	- 15
CaO	16	- 25
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	- 13
MgO	0	- 6
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0	- 0,8
TiO <sub>2</sub>	0	- 0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	- 0,4



Na presente pesquisa foi empregada a fibra de vidro tipo E nacional, fabricada pela Ocfibras Ltda.

### 3.3- Processo de Fabricação das Fibras de Vidro

Basicamente são dois os processos de fabricação de FV: *processo de fusão direta* e o processo de fabricação das fibras a partir de pequenas esferas de vidro fabricadas previamente, também chamado *processo de segunda fusão*. O processo de fusão direta é o mais importante, tendo uma utilização muito superior ao processo de segunda fusão.

O processo de fabricação empregado pela Ocfibras Ltda para a produção de filamentos contínuos de vidro é o da fusão direta, sendo os filamentos formados pela passagem do vidro derretido, diretamente do forno de fusão, através de fieiras. A Figura 3.1 apresenta um esquema da fabricação de fibras de vidro pelo processo de fusão direta.

Os diversos óxidos inorgânicos devidamente dosados são alimentados no tanque de fusão do forno de onde, após a fusão, a massa fluida escorre por canais e passa por fieiras que dão origem aos filamentos. As fieiras, construídas com uma liga metálica especial de platina-ródio, são alimentadas por corrente elétrica aquecendo-se por efeito Joule, assegurando uma temperatura uniforme à massa fundida. Além disto, resistem ao atrito e à corrosão causada pela massa fluida na temperatura de fusão e apresentam orifícios por onde a gota líquida assoma e escorre. As fieiras normalizadas apresentam uma quan

tidade de 200, 400, 800 e outros números de orifícios, apropriadamente distribuídos, e que originam igual número de filamentos contínuos de diâmetro variável entre 3,5 e 20 microns.

A alta resistência à tração, de 35.000 kg/cm<sup>2</sup>, do vidro sob a forma de fibras de pequeno diâmetro, em relação a resistência à tração de 30 a 40 kg/cm<sup>2</sup> do vidro maciço, deve-se a modificação íntima da matéria no momento da formação ("forming"), ou seja, às condições excepcionais a que a massa vítrea é submetida num curtíssimo espaço de tempo, que são:

- A massa fundida no forno é acelerada do repouso para uma velocidade de 200 km/hora.

- A gota fluída, que cai no orifício da fieira com 2 milímetros de diâmetro, é violentamente reduzida a um filamento de secção 50.000 vezes menor.

- Ocorre violento resfriamento do vidro fundido com a temperatura caindo de 1400<sup>o</sup>C/1200<sup>o</sup>C à temperatura ambiente.

Logo após a sua formação os diversos filamentos, de acordo com a fieira empregada, são unidos em um fio básico e aspergidos com um tratamento químico superficial. Este tratamento superficial especial, denominado encimagem, tem as seguintes finalidades:

- unir os diversos filamentos em um fio básico.

- fornecer à superfície da fibra de vidro um lubrificante que impeça o desgaste dos filamentos pelo atrito.

- compatibilizar o vidro inorgânico com as diferentes resinas plásticas pela incorporação de um agente de ligação à superfície do vidro, promovendo uma futura ligação química entre a FV e matriz polimérica (poliéster insaturado).

A fase de enrolamento das FV em bobinas, coordenada com a reunião dos filamentos elementares no fio básico, é realizada por tambores giratórios equipados com compensadores de velocidade que mantêm

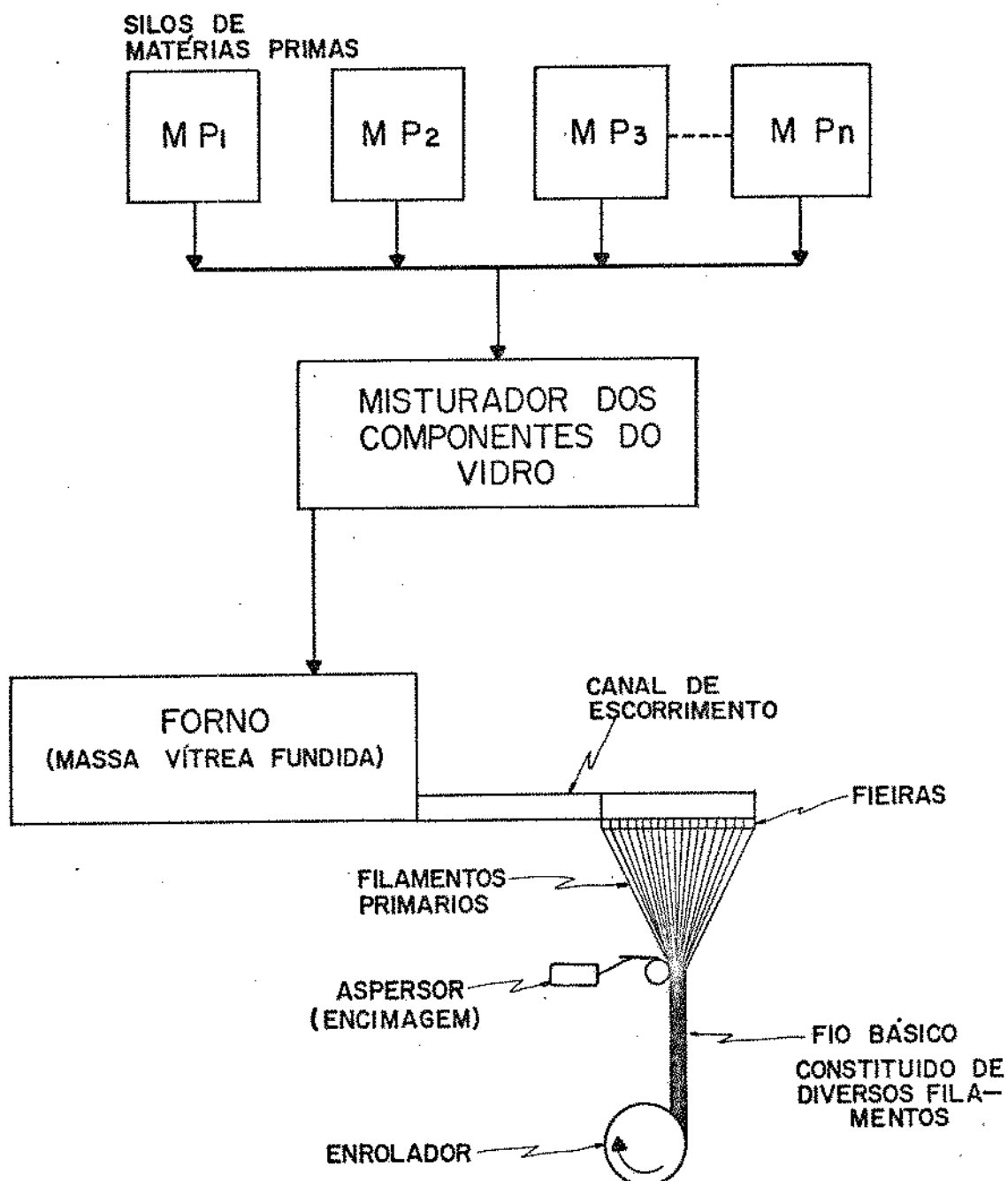


FIGURA 3.1 - Esquema da fabricação de fibras de vidro pelo processo de fusão direta.

constante a velocidade linear de puxamento dos filamentos. Segue-se a "cura" da encimagem em estufas, estando as fibras de vidro prontas para o processamento e transformação nas diversas formas finais em contradas comercialmente.

### 3.4- Tratamento Superficial e Ligação Fibra de Vidro - Resina de Poliéster Insaturado

As FV e as resinas de poliéster insaturado isoladamente não possuem boas características estruturais, mas, empregadas em conjunto apresentam todas as características ideais para originar um material estrutural. Para isto, o requisito que se apresenta é a da transferência de tensões entre as duas fases, constituídas de um material inorgânico (fibra de vidro) e outro orgânico (resina de poliéster insaturado), à primeira vista quimicamente incompatíveis.

A transferência de solicitações entre as duas fases, ou seja, na interface vidro-resina, é conseguida pela união química entre elas e pelas forças de atrito. As forças de atrito são causadas pela contração do poliéster insaturado durante a cura, mas, é a ligação química vidro-resina que possibilita o melhor aproveitamento das características das FV.

O tratamento superficial das FV pode ser dividido em dois tipos:

- Tratamento superficial completo com a presença do agente de ligação, imediato à fabricação das fibras de vidro, como mencionado anteriormente.

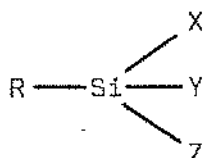
- Tratamento superficial para as FV que vão sofrer operações têxteis (torção, dobramento, etc.), denominado encimagem propriamente dita, sem o agente de ligação. Caso seja optado por esta técnica de tratamento superficial, ocorre a seguinte sequência:

fabricação das fibras de vidro → encimagem → operações têxteis → desencimagem (química ou térmica) → aplicação do agente de ligação ("finish") → utilização das fibras de vidro.

Existem muitos processos que independentes das operações têxteis fazem a aplicação única do tratamento superficial completo.

O agente de ligação (agente ligante ou agente de acoplagem) é basicamente uma substância química bifuncional, com um grupo funcional podendo se ligar à fase inorgânica (fibra de vidro) e o outro à fase orgânica (resina), formando uma ponte entre as duas fases. Normalmente as duas classes de agentes de ligação mais empregadas são a base dos compostos de silício, os silanos, e dos compostos de cromo. Os agentes silanos têm sido mais usados por permitirem melhor retenção da resistência em ambientes úmidos.

De uma maneira geral os agentes de acoplagem organo-silanos podem ser representados por:



sendo: R = vinil, amino, metacrilato, etc., e  
X, Y e Z = metoxi, etoxi, acetoxi, etc.

Os grupos X, Y e Z se hidrolizam quando entram em conta-to com a água absorvida no vidro, ou, quando este composto é dissolvi



interface, sofra a hidrólise e forme uma cobertura polisiloxona no substrato.

### 3.5- Formas Comerciais das Fibras de Vidro

As fibras de vidro são obtidas normalmente pela reunião de 50 a 400 filamentos primários, constitui o chamado *fio básico* ou "strand". Após o enrolamento em bobinas e cura do tratamento superficial são convertidas, por operações que podem incluir dobramento e retorcimento, em vários reforços comerciais. Esta variedade de formas, provenientes de FV com qualquer um dos dois tipos de tratamento superficial característico de cada processo industrial, inclui:

- Fios contínuos e paralelos ("roving" contínuo).
- Fios básicos trançados em único fio ("yarn").
- Mantas ("mats"): fios picados em comprimentos variáveis entre 25 e 50 milímetros, dispostos multidirecionalmente e aglomerados em mantas pelo uso de um ligante apropriado; normalmente são apresentadas nas seguintes gramagens: 225, 450 e 600 g/m<sup>2</sup>.
- Fios cortados ("chopped strands"): fibras cortadas do "roving" contínuo, podendo ter um tratamento superficial especial mais intenso, principalmente se forem utilizadas em processo onde sofrem alto atrito.
- Tecidos de "roving" ("Woven roving"): tecidos obtidos a partir do processamento do "roving" em tearas; estes tecidos possuem gramagens variáveis entre 600 e 900 g/m<sup>2</sup>.
- Tecidos: tecidos normais de inúmeros tipos, fabricados

com fios torcidos e trançados.

- Produtos especiais:

a) Vêus de superfície de alta resistência química, alguns fabricados do vidro "C", vidro químico; vêus de superfície leves com gramagens de 30 a 50 g/m<sup>2</sup> ("surfacing mat") e vêus de superfície mais pesados com gramagens de 50 a 60 g/m<sup>2</sup> ("overlay mat").

b) Combinação de mantas e tecidos roving ("fab mat").

c) Fibras moídas ("milled fibers") com comprimento entre 0,5 a 3 mm de comprimento.

Na presente pesquisa foram utilizadas "rovings" cortados e "chopped strands".

Os "rovings" são obtidos pela união em paralelo e sem torção de uma quantidade de fios básicos, por exemplo, 5, 10, 15, 30, 60 e 120 fios. Os "rovings" são apresentados em bobinas e podem ser separados em dois tipos, em função do tratamento superficial:

- "Roving duro" com tratamento superficial mais eficiente que permite a separação dos fios básicos, mas com difícil separação dos filamentos primários entre si.

- "Roving mole" com separação dos filamentos primários, tendo maior molhabilidade.

Os "rovings" podem ser especificados em peso por comprimento.

O "roving" empregado foi o "roving" 825, fabricado pela Ocfibras Ltda., cortado nos comprimentos 1/2", 1/4" e 1/8".

As fibras cortadas, "chopped strands", são obtidas cortando os mesmos tipos de fios básicos que se empregam para a fabricação dos "rovings" em comprimentos uniformes, normalmente variáveis entre



5 e 50 mm. Os comprimentos mais comuns em que se fornecem estas fibras cortadas são 6, 12, 25 e 50 milímetros, ou, cortadas em comprimentos adequados pelo próprio usuário.

As fibras "chopped strands" recebem tratamentos superficiais característicos para compatibilização com cada tipo de polímero a ser reforçado, podendo ter tratamentos mais intensos em função do processo de fabricação em que vão ser empregadas.

As fibras "chopped strands", que fornecem reforçamentos com orientação geométrica aleatória no espaço, são principalmente empregadas em processos "Premix" (pré-mistura), "BMC" ("bulk molding compound", compostos moldados a partir de uma massa) e "SMC" ("sheet molding compound", compostos moldados a partir de uma placa).

Na presente pesquisa foram empregadas as fibras de vidro "chopped strands" 832, comprimento 1/4", fabricadas pela Ocfibras Ltda.

#### 4- PLÁSTICOS REFORÇADOS (Poliésteres Insaturados Reforçados com Fibras de vidro, PIRFV)

Plásticos reforçados (PR) são materiais compostos obtidos pela incorporação de um reforço a uma matriz polimérica. Muitos são os materiais empregados como reforço de polímeros, sendo os reforços fibrosos os mais importantes, e, como já mencionado dentre estes, a FV é o reforço mais usual. Entre os polímeros, as resinas de PI são as matrizes de maior interesse. Assim, os PIRFV formam a principal classe dos compostos conhecidos como PR.

Um outro termo que é adotado muitas vezes como sinônimo de PR é laminado. Conceitualmente, laminado é qualquer elemento ou peça de PR obtido pela sobreposição sucessiva de camadas de reforços de vidro, tais como mantas e tecidos. Mas, por extensão se aplica a qualquer peça ou elemento caracterizado por conter uma resina e um reforço de fibras longas, e em particular, de FV.

Apesar de relativamente recentes, em relação aos materiais convencionais como madeira, metais, concreto, etc., os PR já apresentam grande utilização, crescendo dia a dia o número de suas aplicações e o volume de consumo.

#### 4.1- Composição dos Plásticos Reforçados (PR)

Os PR consistem essencialmente de uma combinação de:

- uma matriz polimérica; no caso dos poliésteres insaturados, um sistema polimérico resinoso que inclui além da própria resina, outros elementos como catalizadores, aceleradores, inibidores e diluentes (ver capítulo 2).

- o elemento reforçante: fibras de carbono, asbestos e principalmente fibras de vidro, que se apresentam em diferentes formas e são empregadas em diferentes porcentagens; este reforço quase sempre é o responsável pelas propriedades mecânicas do composto (ver capítulo 3).

- produtos complementares: estes são opcionais sendo utilizados de acordo com as características e propriedades desejadas do PR; os produtos complementares incluem: cargas, pigmentos, agentes tixotrópicos.

trópicos, absorvedores de ultravioleta, estabilizantes, anti-retardantes, etc. Como os plásticos reforçados com fibras de vidro (PRFV) têm tendência a aderir nas superfícies dos moldes onde são produzidos, um outro tipo de produto complementar muito útil é o desmoldante, que é aplicado sobre os moldes para facilitar a remoção das peças prontas.

- um processo de fabricação que define as características mecânicas do composto.

A formulação dos PRFV pode ser escolhida de acordo com as especificações que se deseja obter, podendo-se produzir peças estruturais resistentes ao fogo, à corrosão química, às intempéries, etc., sendo translúcidas ou opacas. No projeto dos PRFV, a quantidade, a forma e a orientação das FV são fatores de primordial importância. Em síntese, podemos considerar os PRFV como materiais de engenharia, cujas características podem ser obtidas quase "sob medida".

#### 4.2- Propriedades e aplicações dos Poliésteres Insaturados Reforçados com Fibras de Vidro (PIRFV)

Pode-se justificar a excelente aceitação dos poliésteres insaturados reforçados com fibras de vidro (PIRFV) com base nas suas principais características e propriedades, que são as seguintes:

- A FV é um material de elevada resistência mecânica, sendo inalterável com o tempo em virtude de sua elevada inércia química.

- As resinas de PI são líquidas, portanto práticas de serem aplicadas às FV facilitando e assegurando ótima impregnação. Além disso, estas resinas podem ser curadas à temperatura ambiente e conformadas

madras na pressão atmosférica.

- Os produtos finais possuem: ótimas propriedades físicas, mecânicas, elétricas, químicas incluindo resistência à corrosão, além de baixo peso específico.

- O material apresenta grande facilidade de conformação permitindo o projeto de peças de grande tamanho e com formas e contornos complexos.

- As ferramentas, incluindo os moldes, para fabricação com este material apresentam custos baixos, não implicando em elevados investimentos.

Como desvantagens que limitam as aplicações dos PIRFV, podemos citar as seguintes:

- matérias primas com custo moderado e em alguns casos elevado.

- temperatura limite de utilização não superior a 200°C.

- rigidez (módulo de elasticidade) baixa quando comparada com alguns metais.

- dificuldade na uniformização de peças fabricadas manualmente.

- ciclos de produção, em alguns casos, podem ser considerados lentos.

Devido às excelentes características expostas acima, mesmo com algumas limitações, são inúmeras as áreas de aplicação dos PIRFV.

Podemos citar as seguintes áreas: indústria química e de equipamentos para ambientes agressivos e corrosivos; na construção civil; nas indústrias aeronáutica e naval; nas indústrias automobilísticas.

ticas, elétricas e mecânicas; utensílios, equipamentos, artigos esporádicos, artigos para manuseio de materiais, etc.

#### 4.3- Processos de Fabricação de PIRFV

Atualmente existe um grande número de técnicas e processos empregados para moldar as matérias primas: resina, fibras de vidro e aditivos complementares, em produtos de PR.

Cada processo de fabricação dos PR tem suas características e deve ser escolhido de acordo com a aplicação do material, a forma e o tamanho da peça, o número total de peças a serem fabricadas e o ritmo de produção, de tal modo que o processo seja economicamente viável.

A moldagem pode ser feita na temperatura ambiente ou a altas temperaturas, com ou sem pressão, e, manualmente ou com o auxílio de equipamentos especiais.

Podemos dividir os métodos de fabricação dos PR em duas categorias:

- Processos de molde aberto: empregam moldes machos ou fêmeas, de madeira, plásticos ou metais, sendo usados à pressão atmosférica ou com baixa pressão; com estes, podem ser obtidas peças grandes de formas complexas mas com bom acabamento apenas na face em contato com o molde.

- Processos de molde fechado: empregam moldes macho-fêmea, produzindo peças com acabamento dos dois lados e com uniformidade entre si.

São os seguintes os principais métodos de fabricação dos PR:

- Moldagem manual por contato ("hand-lay-up")
- Moldagem por aplicação ou deposição à pistola ("spray-up")
- Moldagem por enrolamento ("filament winding")
- Moldagem com membrana elástica à vácuo ou com pressão ("vacuum bag molding" e "pressure bag molding")
- Moldagem por injeção (para termoplásticos reforçados)
- Moldagem por injeção à vácuo
- Moldagem por centrifugação
- Moldagem por métodos de produção contínua: laminação contínua e moldagem por pultrusão
- Moldagem por "Premix" (pré-mistura) ou BMC ("bulk molding compound") ou DMC ("dough molding compound")
- Moldagem do composto em placas, SMC ("sheet molding compound").

No presente trabalho, cuja finalidade era a de investigar as influências do comprimento das FV e da matriz polimérica, no reforçamento de PI de uso geral com FV curtas (1/2, 1/4 e 1/8 de polegada), a técnica de moldagem empregada foi uma combinação de uma pré-mistura da resina de poliéster, catalizador, acelerador e fibras de vidro curtas, com um posterior vazamento no molde. Este processo, descrito a seguir com detalhes no procedimento experimental, foi utilizado para obtenção de placas reforçadas de onde foram retirados os corpos de prova para os ensaios mecânicos realizados.

## 5- TEORIA DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE POLIÉSTERES INSATURADOS COM FIBRAS DE VIDRO CURTAS

### 5.1- Introdução

A teoria do reforçamento de poliésteres insaturados com FV é importante para produzir, prever e analisar as propriedades destes materiais. Este estudo é feito com base nas características dos materiais constituintes (matriz polimérica e fibra de vidro), na composição do composto (porcentagem dos constituintes), no tipo de reforço de vidro empregado, e, em caso de materiais anisótropos deve levar em consideração a direção.

São dois os principais métodos empregados para analisar os laminados de plásticos reforçados: micromecânica e macromecânica. A micromecânica analisa os laminados planos com uma camada de reforço uniaxial a partir das características do reforço e da matriz, em nível microscópico, enquanto, a macromecânica analisa as propriedades do multilaminado a partir das características de cada uma das suas camadas. Os dois métodos devem ser interligados, pois, as propriedades de um multilaminado analisado pela macromecânica dependem da microestrutura do material analisada pela micromecânica. Entretanto, a descrição destas teorias não está no objetivo deste trabalho.

Em relação à disposição das fibras, a classificação dos laminados é a seguinte:

- Mono-orientado ou unidirecional, com as fibras em uma posição determinada e com o laminado francamente anisótropo.

- Multi-orientado ou multidirecional, com as fibras dispostas em duas ou mais direções em um espaço bidimensional; o material apresenta anisotropia com valores máximos nas direções preferenciais

do reforço.

- Aleatório, na maior parte dos casos no espaço bidimensional, com o material apresentando comportamento isotrópico no plano.

Como a presente pesquisa empregou FV curtas, a seguir são apresentados somente os conceitos e as fórmulas das teorias de reforçamento necessários para o tratamento teórico e para a previsão do comportamento dos compostos poliméricos reforçados com FV curtas, orientadas aleatoriamente.

## 5.2- Reforçamento de Poliésteres Insaturados com Fibras de Vidro Curtas

Atualmente existe grande interesse no estudo do reforçamento de compostos poliésteres insaturados - fibras de vidro descontínuas curtas<sup>(2)</sup>. Para estes compostos as poucas pesquisas teóricas existentes apresentam variações de considerações na abordagem do problema: algumas por exemplo imaginam o reforço com orientação geométrica uniforme, outras com orientação aleatória; algumas consideram que a matriz do composto seja constituída de resina pura, outras que essa matriz contenha elementos de carga; assim como variam também as propriedades mecânicas estudadas<sup>(1,15,24,25,50)</sup>.

As teorias para reforçamento com FV curtas, apesar de diferenças profundas até mesmo na análise conceitual do laminado\*, con

---

\* Originalmente o termo laminado era empregado apenas para compostos reforçados com fibras contínuas.



sideram os laminados unidirecionais e aleatórios reforçados com fibras contínuas, fazendo aproximações, considerações e hipóteses para o tratamento dos laminados unidirecionais e aleatórios reforçados com FV descontínuas curtas. A Figura 5.1 descreve os modelos de três laminados importantes.

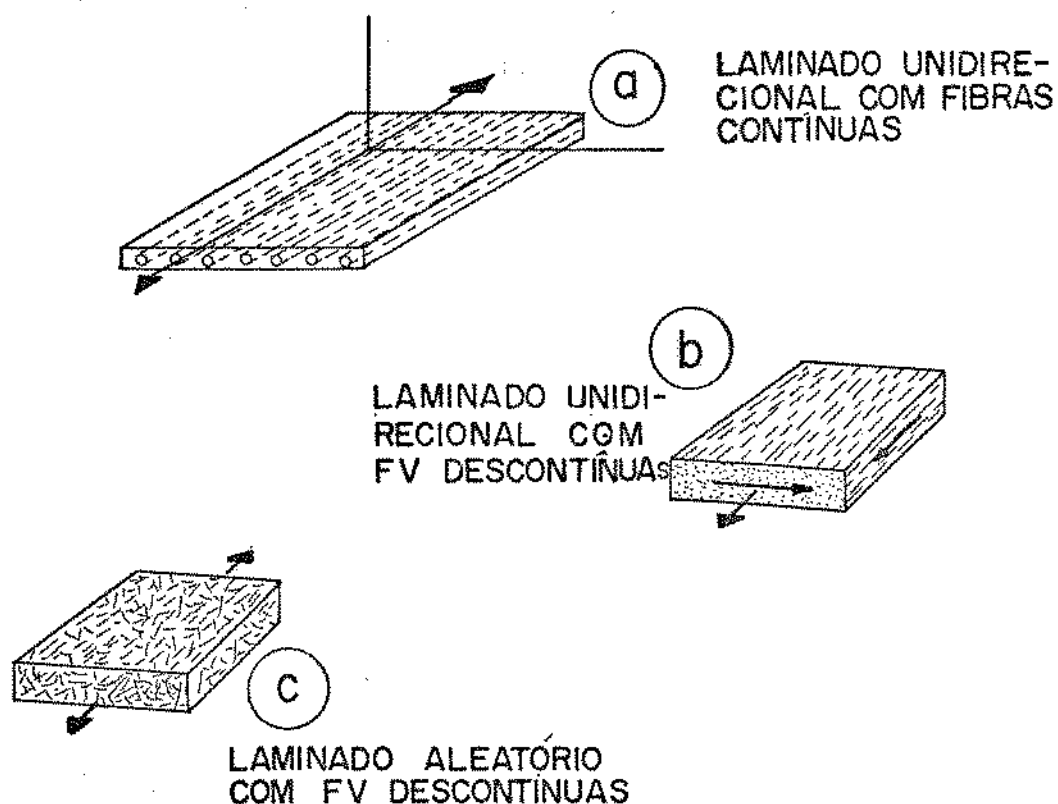


FIGURA 5.1 - Modelos de laminados

Na análise resumida das teorias de previsão do comportamento mecânico dos PIRFV descontínuas curtas, considera-se as propriedades mecânicas dos laminados unidirecionais reforçados com FV contínuas (Fig. 5.1a). Assim, emprega-se as relações clássicas dadas pela lei das misturas. Nestas equações, desprezam-se as bolhas e vazios que são defeitos comuns nos plásticos reforçados:

$$E_c = v_f E_f + v_m E_m \quad (5.1)$$

$$\sigma_c = v_f \sigma_f + v_m \sigma_m \quad (5.2)$$

$$\epsilon_c = v_f \epsilon_f + v_m \epsilon_m \quad (5.3)$$

sendo:  $E_c$ ,  $E_f$  e  $E_m$  módulos de elasticidade à tração do composto, das FV e da matriz polimérica, respectivamente.

$\sigma_c$ ,  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$  tensões de ruptura à tração do composto, das FV e da matriz polimérica, respectivamente.

$\epsilon_c$ ,  $\epsilon_f$  e  $\epsilon_m$  deformações específicas na ruptura à tração do composto, das FV e da matriz polimérica, respectivamente.

$v_f$  e  $v_m$  frações em volume das FV e da matriz polimérica, respectivamente.

Para compostos reforçados unidirecionalmente com fibras de vidro descontínuas curtas (Fig. 5.1b), uma das abordagens teóricas<sup>(25)</sup> introduz um fator de eficiência do reforçamento ( $K$ ) nas relações (5.1), (5.2) e (5.3). Então, estas expressões passam a ser dadas por:

$$E_c = k v_f E_f + v_m E_m \quad (5.4)$$

$$\sigma_c = k v_f \sigma_f + v_m \sigma_m \quad (5.5)$$

$$\epsilon_c = k v_f \epsilon_f + v_m \epsilon_m \quad (5.6)$$

Este fator de eficiência do reforçamento,  $k$ , é uma medida da efetividade do reforçamento, sendo calculado para FV descontínuas curtas, unidirecionalmente orientadas, por:

$$k = \frac{l}{2l_c} \quad \text{para } l \leq l_c \quad \text{com } 0 \leq k \leq 0,5 \text{ e}$$

$$k = 1 - \frac{2l_c}{2l} \quad \text{para } l > l_c \quad \text{com } 0,5 \leq k \leq 1$$

sendo:  $l$  = comprimento das FV

$l_c$  = comprimento crítico das FV definido pela expressão:

$$l_c = \frac{d \sigma_f}{2 \tau}$$

onde  $d$  = diâmetro das FV

$\sigma_f$  = resistência à tração das FV

$\tau$  = resistência máxima ao cisalhamento na interface matriz-fibra

Um outro tipo de abordagem teórica<sup>(1,25)</sup> para reforço aleatório com FV descontínuas curtas (Fig. 5.1c) é o que considera um fator de eficiência de utilização das FV dado pelo quociente entre os valores das propriedades mecânicas medidos experimentalmente e os valores dados pelas equações (5.1), (5.2) e (5.3). Por exemplo, o módulo de elasticidade experimental dividido pelo valor calculado na expressão (5.1) fornece o fator de eficiência. Neste caso, são traçadas curvas do fator de eficiência em função da razão de aspecto ("aspect

ratio"), que é o quociente do comprimento ( $l$ ) pelo diâmetro ( $d$ ) das fibras de vidro, verificando-se a influência do comprimento das FV no reforçamento, além das influências dos módulos de elasticidade da matriz polimérica e das FV.

Recentes trabalhos com fibras de vidro curtas orientadas aleatoriamente<sup>(24)</sup> têm encontrado boa correlação de resultados experimentais com os teóricos, obtidos por simplificações das equações micromecânicas de Puck<sup>(24,50)</sup> e dos invariantes dos laminados definidos por Tsai e Pagano<sup>(26,50)</sup>. As simplificações são realizadas a partir das seguintes condições impostas:

- A fração volumétrica das FV deve estar entre 0,1 e 0,4, que inclui praticamente todos os compostos reforçados com fibras de vidro curtas possíveis tecnologicamente de serem obtidos pelos métodos comuns de fabricação.

- A razão de aspecto ( $l/d$ ) deve ser maior do que 300, sendo o material considerado como um arranjo bidimensional aleatório de FV.

- Assume-se que o comportamento mecânico dos compostos com fibras de vidro descontínuas, dispostas ao acaso, é similar ao comportamento dos laminados com infinito número de camadas orientadas em todas as direções.

As expressões empregadas para desenvolvimento desta última teoria são as seguintes:

Equações Micromecânicas de Puck (FV curtas, unidirecionais):

$$E_{11} = v_f E_f + (1 - v_f) E_m \quad (5.7)$$

$$V_{12} = v_f V_f + (1 - v_f) V_m \quad (5.8)$$

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - V_m^2} \cdot \frac{1 + 0,85 v_f^2}{(1 - v_f)^{1,25} + v_f \frac{E_m}{E_f} \cdot \frac{v_f}{1 - V_m^2}} \quad (5.9)$$

$$G_{12} = \frac{E_m}{2(1 + V_m)} \cdot \frac{1 + 0,6 v_f^{0,5}}{(1 - v_f)^{1,25} + v_f \frac{E_f}{E_m} \cdot \frac{1 + V_f}{1 + V_m}} \quad (5.10)$$

sendo:  $V$  = razão de Poisson

$G$  = módulo de cisalhamento

11 : na direção paralela a fibra

22 : na direção normal a fibra

12 : na direção paralela a fibra, no plano 12

Usando a analogia do laminado, as equações micromecânicas de Puck e as propriedades invariantes do composto de Tsai-Pagano, as propriedades elásticas do composto reforçado com FV descontínuas curtas orientadas aleatoriamente (Fig. 5.1c), são dadas por<sup>(24)</sup>:

$$\bar{E} = \frac{(U_1 + U_4)(U_1 - U_4)}{U_1} \quad (5.11)$$

$$\bar{V} = \frac{U_4}{U_1} \quad (5.12)$$

$$\bar{G} = \frac{U_1 - U_4}{2} \quad (5.13)$$

sendo:  $\bar{E}$  = módulo de elasticidade em tração (módulo de Young) do composto

$\bar{V}$  = razão de Poisson do composto

$\bar{G}$  = módulo de cisalhamento do composto

$U_1$  e  $U_4$  = coeficientes invariantes definidos por Tsai-Pagano<sup>(50)</sup>

As equações (11), (12) e (13) satisfazem a relação clássica dos materiais isotrópicos:

$$\bar{G} = \frac{\bar{E}}{2(1 + \bar{V})}$$

Pelas condições impostas, ou seja,  $0,1 \leq v_f \leq 0,4$ ,  $l/d > 300$  e  $v_m \cong 0,4$ , as expressões podem ser simplificadas para:

*Equações de Puck simplificadas:*

$$E_{11} = v_f E_f + (1 - v_f) E_m \quad (5.14)$$

$$V_{12} = v_f V_f + (1 - v_f) V_m \quad (5.15)$$

$$E_{22} \cong E_m (3,92 v_f + 0,89) \quad (5.16)$$

$$G_{12} \cong E_{22} / 2,75 \quad (5.17)$$

*Invariantes:*

$$U_1 \cong v_f \left( \frac{2}{5} E_f + \frac{9}{4} E_m \right) + E_m \quad (5.18)$$

$$U_4 \cong v_f \left( \frac{2}{15} E_f + \frac{3}{4} E_m \right) + \frac{E_m}{3} \quad (5.19)$$

$$U_1 \cong 3U_4 \quad (5.20)$$

*Equações aproximadas para as propriedades elásticas do composto reforçado aleatoriamente com FV curtas:*

$$\bar{E} = v_f \left( \frac{16}{45} E_f + 2 E_m \right) + \frac{8}{9} E_m \quad (5.21)$$

$$\bar{G} = v_f \left( \frac{2}{15} E_f + \frac{3}{4} E_m \right) + \frac{1}{3} E_m \quad (5.22)$$

$$\bar{V} = 1 / 3 \quad (5.23)$$

Atualmente, esta última teoria de reforçamento com FV descontínuas curtas aleatórias é a que apresenta maior aceitação devido à boa equivalência dos resultados teóricos e experimentais.

## 6- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 6.1- Introdução

A parte experimental desenvolvida nesta dissertação constou de duas etapas principais, com as seguintes sequências de atividdes:

a) Preparação do material, isto é, preparação de compostos poliéster insaturado reforçado com FV curtas, dispostas aleatoriamente:

- 1- escolha dos materiais a serem empregados.
- 2- fixação das composições adequadas dos compostos, visando obter resultados sobre as influências do comprimento da FV e da matriz polimérica no reforçamento.
- 3- escolha e verificação da melhor técnica de moldagem dos compostos na forma de placas.

b) Ensaios mecânicos dos compostos poliéster insaturado - FV curtas:

- 1- estudo das técnicas de ensaios mecânicos, normalização dos corpos de prova e obtenção dos corpos de prova normalizados a partir das placas dos compostos.
- 2- verificação da homogeneidade e isotropia dos compostos.



3) realização de ensaios mecânicos normalizados, com a obtenção dos resultados necessários para a análise da investigação científica proposta.

## 6.2- Preparação dos Compostos de Poliésteres Insaturados Reforçados com Fibras de Vidro Curtas

### 6.2.1- Materiais Empregados

Como o objetivo do trabalho envolvia apenas a FV (reforço) e a matriz polimérica (poliéster insaturado), todos os compostos foram obtidos pelo emprego do reforço, da matriz polimérica e dos aditivos necessários à cura da matriz polimérica, não sendo utilizados produtos complementares, tais como cargas.

Os materiais empregados foram os seguintes:

#### a) Resina de poliéster insaturado.

Foram empregadas as resinas de poliéster insaturado, ortoftálicas de uso geral: Polylite T-223-E (8001), Polylite T-238 e Polylite 10069, fabricadas pela Resana S.A. Indústrias Químicas, São Bernardo do Campo, São Paulo. As principais características destas resinas são:

- *Polylite T-223-E (8001)*: resina ortoftálica, de uso geral, não acelerada, líquida, com viscosidade média e baixa reatividade; esta resina contém em média 35% de estireno necessário à cura; quando curada forma um PI sólido e rígido.

- *Polylite T-238*: resina ortoftálica, de uso geral, não

acelerada, com baixas viscosidade e reatividade, tixotrópica; esta resina contém em média 35% de estireno; quando curada forma um PI sólido e rígido.

- *Polylite 10069*: resina ortoftálica, pré-acelerada, líquida, com viscosidade média; a resina contém em média 30% de estireno; é uma resina de PI flexível, sendo empregada como plastificante das resinas ortoftálicas rígidas para melhorar as características mecânicas dos laminados ou das peças fundidas.

As propriedades mecânicas das matrizes poliméricas empregadas, geradas por combinações de diferentes porcentagens das três diferentes resinas acima citadas, foram obtidas a partir de suas respectivas placas fundidas sem reforço de onde se retiraram os corpos de prova para os ensaios mecânicos. Assim, foram usados os resultados calculados no trabalho e não os dados fornecidos pelo fabricante.

#### b) *Fibras de Vidro*

Como FV curtas, foram empregados:

- "*Roving*" 825: utilizado nos comprimentos 1/8, 1/4 e 1/2 polegada, sendo cortado nos laboratórios; este "roving" é tratado superficialmente com agentes de acoplagem à base de compostos de cromo; é o mais barato reforço de fibra de vidro atualmente disponível no Brasil; os diversos fios que constituem este "roving" possuem uma alta rigidez e cortam facilmente com um mínimo de desenvolvimento de eletricidade estática, formando uma dispersão uniforme e bem assentada sobre o molde, pois, também molham rapidamente.

- "*Chopped Strands*" 832: esta FV cortada ("chopped strands") é destinada a processos onde na fase de mistura das FV com os outros componentes dos PR ocorre um elevado atrito, que também pode ocorrer

na própria fase de moldagem; assim, estas fibras recebem um tratamento superficial mais intenso, pois, além do agente de acoplagem à base de compostos de silício (silanos), recebem um agente lubrificante que diminui os danos superficiais nas fibras durante a mistura e moldagem; estas fibras são fornecidas no comprimento 1/4 de polegada.

Tanto o "roving" 825 como o "chopped strands" 832 são fabricados pela Ocfibras Ltda., Rio Claro, São Paulo.

#### *c) Catalizador*

O catalizador empregado foi o peróxido de metil-etil-cetona (peróxido MEK), que é um líquido incolor para cura da resina de PI pela geração de radicais livres à temperatura ambiente, quando utilizado em conjunto com um acelerador à base de cobalto.

#### *d) Acelerador*

O acelerador utilizado foi o naftalenato de cobalto, que é um líquido violeta com 6% de conteúdo do metal cobalto. Este acelerador e o peróxido de metil-etil-cetona promovem a cura das resinas de PI na temperatura ambiente.

### 6.2.2- Composições dos Compostos Poliêster Insaturado - Fibras de Vidro Curtas

Para a realização do trabalho foram escolhidos compostos com as seguintes características:

6 matrizes poliméricas: - Polylite 8001

- 75% PolyLite 8001 + 25% PolyLite 10069
- 50% PolyLite 8001 + 50% PolyLite 10069
- PolyLite T-238
- 75% PolyLite T-238 + 25% PolyLite 10069
- 50% PolyLite T-238 + 50% PolyLite 10069

As composições das matrizes foram escolhidas de forma a obter diferentes características, tal como módulo de elasticidade, possibilitando a verificação da influência da matriz no reforçamento.

3 comprimentos de FV: 1/2, 1/4 e 1/8 de polegada, sendo que o "roving" 825 foi empregado nestes comprimentos com 4 das 6 matrizes poliméricas, não sendo utilizado para as matrizes com 50% de PolyLite 10069, enquanto, os "chopped Strands" 832 com 1/4 de polegada foram empregados com as 6 matrizes poliméricas.

% das fibras de vidro: 0; 5; 12,5; 25 e 40% em peso de FV, em relação ao peso da matriz polimérica. O Apêndice 1 fornece a conversão da % em peso para % em volume de FV.

*Catalizador:* 1% de peróxido de metil-etil-cetona, em relação ao peso das matrizes poliméricas.

*Acelerador:* 0,4% de naftalenato de cobalto, em relação ao peso das matrizes poliméricas.

*Estireno:* as resinas de PI empregadas, já são comercializadas com as quantidades ideais de estireno necessárias a uma cura adequada.

Portanto, englobando todas as variáveis do trabalho foram

obtidos 72 compostos diferentes, sendo: 48 compostos empregando o "roving" 825 (4 matrizes poliméricas, com 3 comprimentos de FV, para 4 percentagens do reforço) e 24 compostos empregando "chopped strands" 832 (6 matrizes poliméricas, com 1 comprimento de FV, para 4 percentagens do reforço).

Além disto, foram obtidas placas das 6 matrizes poliméricas não reforçadas (0% de FV), tomadas como referência do material não modificado.

### 6.2.3- Moldagem dos Compostos na Forma de Placas

O estabelecimento da técnica mais adequada para a moldagem dos compostos PI-FV curtas na forma de placas de 15 cm por 15 cm, foi obtido após várias experiências e modificações nas seguintes condições do processo:

- dimensionamento e escolha adequada do molde.
- na escolha da condição de cura da matriz polimérica, aplicada com as outras variáveis do processo.
- na técnica de mistura das resinas de PI com o acelerador, o catalizador e as FV curtas.
- na moldagem do composto propriamente dita.

Nas primeiras experiências foram empregados moldes de madeira, encerados e revestidos com desmoldantes, vaselina e uma solução de álcool polivinílico, que quando seca forma um filme não aderente ao molde e ao moldado. Posteriormente, estes moldes, devido à sua baixa durabilidade, foram substituídos por moldes de PVC (policloreto

de vinila) polidos e sobre os quais se aplicam o álcool polivinílico, que formava a película desmoldante. Entretanto, devido ao elevado número necessário de moldagens, foi empregado também e principalmente um molde metálico para obtenção das placas dos compostos, onde também o álcool polivinílico atuava como desmoldante.

Para o conhecimento das condições de cura das resinas de PI foi feito um levantamento completo da influência das quantidades do catalizador e do acelerador no tempo de gelatinização e no tempo inicial de cura das matrizes poliméricas. As quantidades do catalizador foram variadas de 0,8 a 1,5% e as quantidades do acelerador de 0,3 a 0,6% em peso, em relação ao peso da matriz polimérica. A composição inicial do sistema de cura tomado como referência foi: 1,3% de catalizador e 0,5% de acelerador, que apresenta um tempo de gelatinização (tempo útil de manuseio) igual a 8 minutos à 25°C.

Após a adição do acelerador e do catalizador na resina de PI, as FV curtas devem ser incorporadas em pequenas quantidades e mecanicamente misturadas à matriz polimérica. Depois da mistura é feito o vazamento no molde, sendo aplicada uma pequena pressão de compactação igual a 40 g/m<sup>2</sup>.

Os compostos assim obtidos apresentavam dois problemas: presença de bolhas de ar e não homogeneidade na dispersão das FV curtas na matriz polimérica. Assim, para evitar estes dois problemas foram feitas as seguintes alterações na técnica de moldagem:

a) diminuição da espessura das placas para no máximo 4 milímetros.

b) cinética de cura mais lenta pela utilização de 1% de catalizador e 0,4% de acelerador. Em um processo normal a 25°C, este sistema de cura fornece um tempo de gelatinização igual a 20 minutos.

c) a mistura dos componentes do composto passou a ser realizada do seguinte modo:

- eliminação de umidade e bolhas de ar no sistema polimérico através de um tratamento em estufa à vácuo. Como na secagem e desgasificação da matriz polimérica há pequena evaporação do estireno, este é adicionado até se atingir o valor original.

- incorporações ordenadas do acelerador, do catalizador e de pequenas parcelas das FV curtas na matriz polimérica. Cada uma destas incorporações é seguida de uma cuidadosa, mas, eficiente mistura.

- neste estágio, o composto é levado a uma estufa a 50°C onde permanece por 5 minutos. Deste modo, a viscosidade\* das resinas de PI sofre um grande decréscimo, como mostra a Figura 6.1 para a resina Polylite 8001, cuja viscosidade a 25°C igual a 10 poises passa a 1,5 poises a 50°C.

- após este tempo de tratamento, o composto é retirado da estufa, remisturado eficiente e cuidadosamente, vazado nos moldes e submetido a uma pequena pressão de compactação igual a 40 g/cm<sup>2</sup>.

Desta maneira, foram obtidos os compostos em placas de boa qualidade através de uma observação visual, sendo isentas de bolhas de ar e apresentando uma dispersão uniforme das FV.

Após a moldagem, a próxima etapa foi a do levantamento das propriedades mecânicas dos compostos PI-FV curtas.

---

\* As viscosidades das resinas de PI foram determinadas experimentalmente no presente trabalho através da utilização do Viscosímetro Contraves Rheomat - 30.

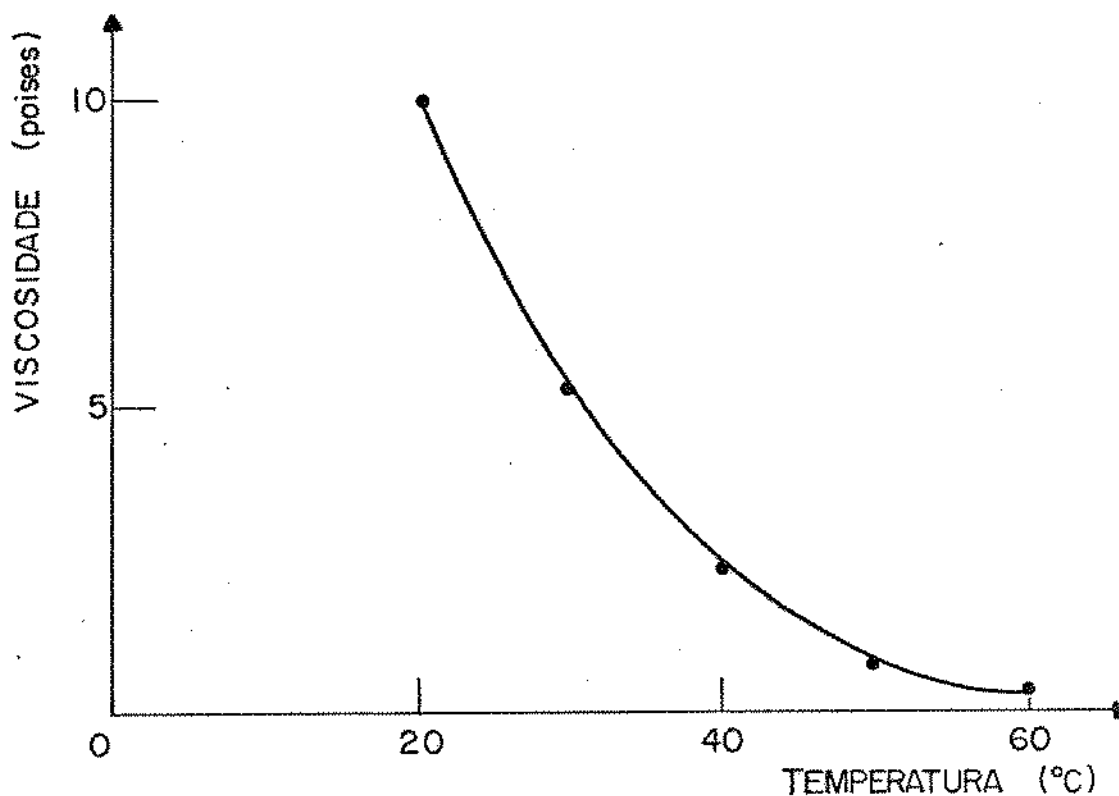


FIGURA 6.1 - Influência da temperatura na viscosidade da resina Polylite 8001

### 6.3- Ensaios Mecânicos dos Compostos Poliêster Insaturado - Fibras de Vidro Curtas

#### 6.3.1- Normalização dos Ensaios Mecânicos

Para o levantamento das propriedades mecânicas dos compostos e das matrizes poliméricas puras, foi feito um estudo completo sobre as normas de ensaios mecânicos da ASTM ("The American Society for Testing and Materials") para polímeros reforçados. Neste estudo, além da tecnologia de preparação dos corpos de prova normalizados das resinas de PI puras e reforçadas, e, das técnicas de ensaio das proprieda



des mecânicas, deu-se uma especial atenção ao estudo estatístico dos ensaios.

Na ASTM, o número de testes no ensaio de cada propriedade mecânica é considerado de acordo com a isotropia do material composto: no caso de materiais isótopos para cada amostra devem ser testados pelo menos 5 corpos de prova e para materiais anisótopos 10 corpos de prova, sendo 5 corpos de prova normais e 5 corpos de prova para lelos ao eixo principal de anisotropia.

Para verificação da isotropia do material retirou-se, para 3 amostras de compostos diferentes, corpos de prova em 3 direções: 2 perpendiculares entre si e uma a  $45^{\circ}$  com as duas primeiras. Pelos resultados das propriedades mecânicas obtidas foi possível concluir que não houve nenhuma dependência destes valores com a direção de retirada das amostras. Assim, para todos os compostos, cada um dos ensaios de propriedades mecânicas foi baseado nos valores apresentados pelos testes em 5 corpos de prova normalizados, ou seja, todos os compostos foram admitidos como isótopos sendo este o número de testes considerado por recomendação das normas ASTM.

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram extraídos das placas dos compostos através de operações de usinagens realizadas de maneira cuidadosa e seguidas de um rigoroso acabamento superficial, que além de conferir as dimensões padronizadas aos corpos de prova, permite a obtenção de uma superfície bem lisa.

Foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: impacto, compressão, flexão e tração. As características destes ensaios mecânicos estão listadas na Tabela 6.1 e na Figura 6.2.

Em todo o trabalho, efetuaram-se 1440 testes mecânicos, com 360 testes em cada tipo específico de ensaio, pois, para cada com

TABELA 6.1 - Especificações dos ensaios mecânicos realizados

TIPO DE ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DO ENSAIO	CORPO DE PROVA (pol.)
Impacto	ASTM D-256	2,5 X 0,5 X espessura
Flexão	ASTM D-790	5 X 1/2 X 1/4
Compressão	ASTM D-695	1/4 X 1/4 X espessura 1/2 X 1/2 X espessura
Tração	ASTM D-638	Corpo de prova Nº 1

posto e para cada ensaio foram testados 5 corpos de prova. Todos os ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão foram efetuados na Máquina Universal de Ensaio "Instron", modelo 1127, sendo que os ensaios de impacto foram feitos na Máquina de Impacto CSI.

### 6.3.2- Dispersão das FV nas Matrizes Poliméricas

A análise da distribuição das FV nas matrizes poliméricas foi feita através da queima do material orgânico (matriz polimérica) com a obtenção do resíduo ou material inorgânico (FV curtas). Esta análise quantitativa consiste do aquecimento de uma quantidade conhecida dos compostos PI - FV curtas por 3 horas a 500°C, sendo que após este aquecimento somente restará a FV presente no composto, cuja quantidade é assim perfeitamente determinada.

Uma primeira análise da dispersão foi feita detalhadamente em quatro tipos de compostos, selecionando-se uma matriz polimérica com as quatro porcentagens de reforço empregadas. Nestes compos

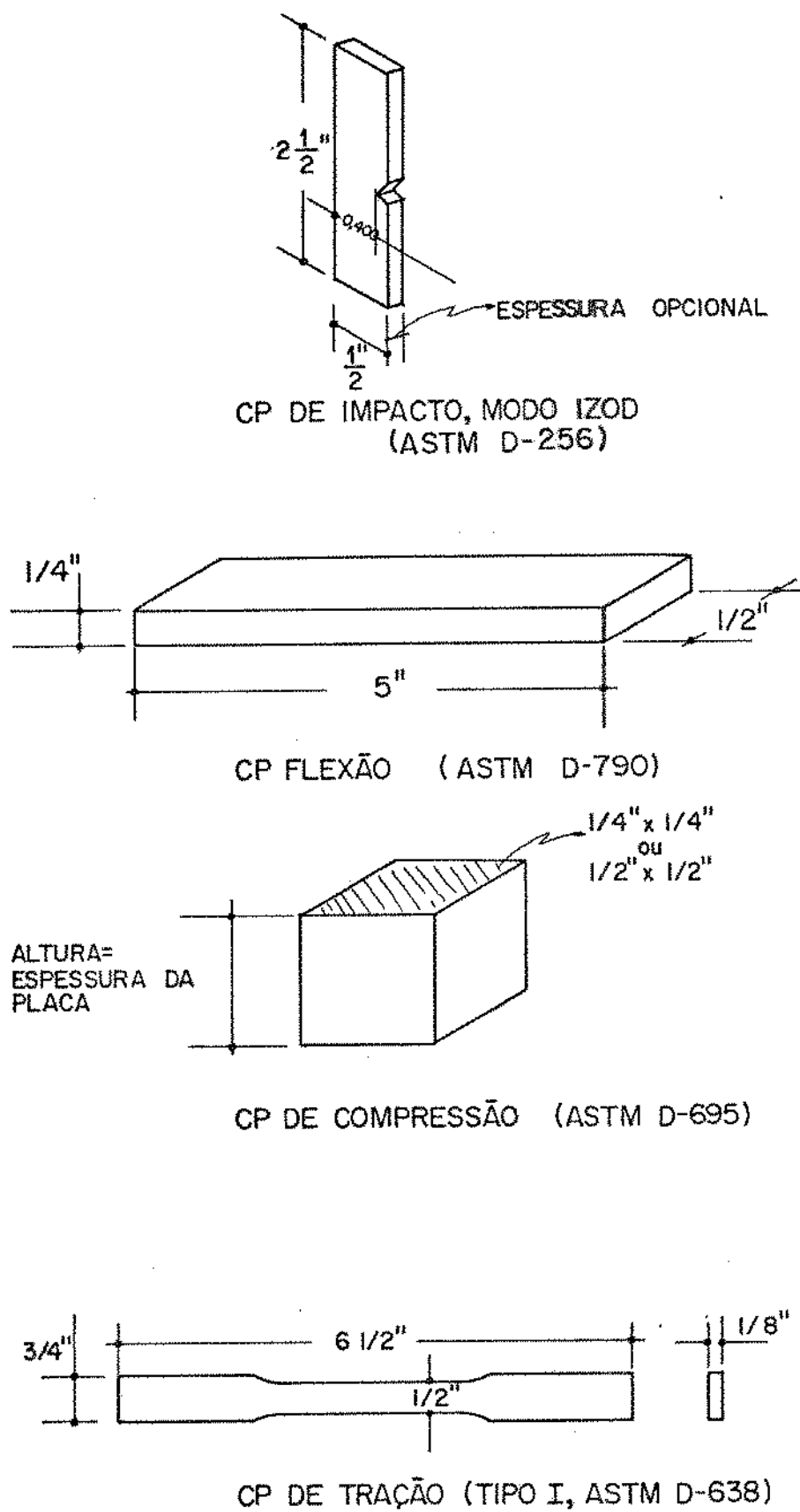


FIGURA 6.2 - Corpos de prova (CP) utilizados nos ensaios mecânicos

tos, foram escolhidas 20 pequenas regiões de acordo com a Figura 6.3 e determinadas as porcentagens de FV em cada uma delas. Em todas as medidas houveram mínimas variações ligeiramente superiores a 10%, em relação ao valor pré-determinado da porcentagem de FV. Portanto, estes compostos apresentam uma boa homogeneização, com uma uniforme dispersão das FV nas matrizes poliméricas.

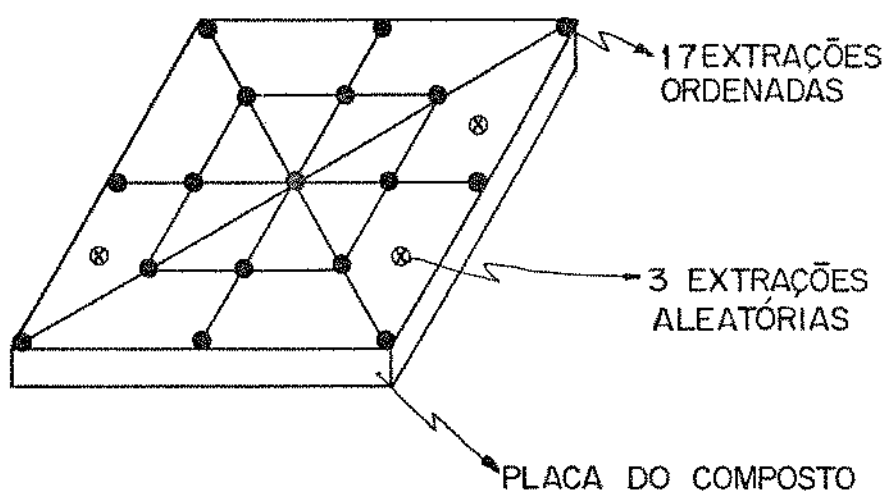


FIGURA 6.3 - Forma de extração das amostras para medida da dispersão das FV curtas.

Para os outros compostos PI - FV curtas, a análise da dispersão foi realizada pela retirada de amostras de quatro regiões escolhidas aleatoriamente. Os resultados foram semelhantes aos da análise anterior, pois, todos os compostos foram obtidos pela mesma técnica de moldagem.

Em todos os compostos efetuaram-se 352 análises de queima das resinas de PI, com determinação quantitativa das porcentagens de FV curtas.

## 7- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já mencionado no procedimento experimental, foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: impacto, flexão, compressão e tração, além dos ensaios de verificação da dispersão das FV curtas nas matrizes poliméricas. A seguir, após um comentário sobre as características de cada tipo específico de ensaio, são fornecidos os resultados obtidos nos testes de cada um deles.

### 7.1- Ensaios de Verificação da Dispersão das Fibras de Vidro Curtas nas Matrizes Poliméricas

A análise da dispersão das FV curtas nas matrizes poliméricas de PI, comentada no procedimento experimental, foi feita com o objetivo de verificar a homogeneidade dos compostos obtidos. Esta verificação tomou como base os resultados apresentados pela análise das amostras extraídas de diferentes regiões do composto. A medida da porcentagem de reforço foi feita incinerando-as, pois, com a eliminação dos componentes orgânicos (PI), a quantidade de FV curtas (resíduos) em cada região é precisamente determinada.

#### Resultados:

Os resultados das análises de dispersão estão listados nas Tabelas 7.1a a 7.1e. Nestas tabelas pode-se observar que em um

número mínimo das medidas obtidas houve variação da dispersão superior a 10%, sendo que o valor médio destas variações está próximo aos 5%. Também não se notou nenhuma influência de qualidade das matrizes poliméricas, das porcentagens médias de FV e da posição das regiões de onde foram retiradas as amostras - centro ou borda das placas - sobre a homogeneidade de dispersão.

Na tabela 7.1e para cada uma das porcentagens de reforço empregadas, foi feito o cálculo do valor médio e do desvio-padrão da porcentagem de FV curtas nas 20 regiões dos compostos (Fig. 6.3). Nestes resultados, apresentados na Tabela 7.2, pode-se verificar que o valor médio das porcentagens de FV curtas nas 20 regiões de cada composto está muito próximo do valor teórico previsto. Além disto, o desvio padrão calculado pode ser considerado pequeno para a dispersão de FV em plásticos reforçados. Também pode-se observar que com o aumento da % de FV houve uma diminuição no desvio padrão, com melhor homogeneização dos compostos PI-FV curtas.

TABELA 7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos

a: Fibras de vidro: "Roving" 825, 1/8" de comprimento

COMPOSIÇÃO TEÓRICA DO COMPOSTO - % DE FV EM PESO	Composição experimental das amostras - % de FV em peso			
	Tipos de Matrizes Poliméricas*			
	1	2	4	5
5 %	5,6	4,4	4,6	5,0
	4,8	4,9	4,9	5,1
	5,1	5,3	5,3	4,9
	4,7	5,0	5,1	5,0
12,5 %	13,0	13,5	11,7	12,4
	12,9	12,1	12,6	12,1
	12,3	12,3	12,5	11,9
	12,1	11,8	12,9	13,1
25 %	25,1	25,5	25,1	25,3
	26,0	24,6	25,6	24,6
	25,2	25,1	24,6	24,9
	24,3	24,8	24,9	24,8
40 %	39,1	39,8	40,1	38,5
	40,5	40,0	41,0	39,3
	40,2	40,8	39,5	40,0
	39,8	39,3	39,7	41,2

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

1 : Polylyte 8001

2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte

4 : Polylyte T-238

5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069

TABELA 7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos (continuação)

b: Fibras de vidro: "Roving" 825, 1/4" de comprimento

COMPOSIÇÃO TEÓRICA DO COMPOSTO - % DE FV EM PESO	Composição experimental das amostras - % de FV em peso		
	Tipos de Matrizes Poliméricas*		
	2	4	5
5 %	4,8	4,7	5,2
	5,0	4,9	5,0
	5,2	5,3	5,1
	5,4	5,1	4,5
12,5 %	12,8	12,5	11,8
	11,9	11,7	13,4
	12,3	12,9	12,1
	12,9	12,4	12,2
25 %	25,4	25,1	25,2
	24,8	26,0	24,5
	26,1	24,5	25,3
	24,7	24,6	24,8
40 %	38,4	40,5	41,5
	39,8	39,8	40,8
	41,0	38,9	39,6
	40,6	40,9	39,2

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte 10069

4 : Polylyte T-238

5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069



TABELA 7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos (continuação)

c: Fibras de vidro: "Roving" 825, 1/2" de comprimento

COMPOSIÇÃO TEÓRICA DO COMPOSTO - % DE FV EM PESO	Composição experimental das amostras - % de FV em peso			
	Tipos de Matrizes Poliméricas*			
	1	2	4	5
5 %	5,4	5,0	4,6	4,9
	5,1	5,3	4,9	5,3
	4,8	4,4	5,1	5,5
	4,9	5,2	5,0	4,8
12,5 %	11,9	12,7	12,3	12,5
	12,5	13,0	12,8	12,3
	12,4	12,1	12,5	11,9
	12,8	12,2	11,7	13,0
25 %	23,8	24,5	23,9	25,0
	24,5	25,2	24,2	26,1
	25,3	24,8	25,7	23,9
	25,9	25,1	24,8	24,8
40 %	39,2	40,5	39,8	40,2
	40,0	39,1	40,6	38,5
	39,6	41,0	40,0	39,8
	40,3	40,4	39,4	40,9

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

1 : Polylyte 8001

2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte 10069

4 : Polylyte T-238

5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069

TABELA 7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos (continuação)

d: Fibras de vidro: "Chopped strands" 832, 1/4" de comprimento

COMPOSIÇÃO TEÓRICA DO COMPOSTO - % DE FV EM PESO	Composição experimental das amostras - % de FV em peso					
	Tipos de Matrizes Poliméricas*					
	1	2	3	4	5	6
5 %	5,5	5,8	5,1	4,9	4,4	5,0
	4,9	5,1	4,6	4,7	5,2	4,8
	5,4	4,7	4,5	5,0	4,6	4,9
	4,8	5,0	5,3	5,2	5,1	5,2
12,5 %	12,0	12,6	11,8	11,6	13,0	11,5
	11,7	11,9	11,4	12,5	12,5	12,9
	13,2	13,3	12,7	12,9	12,1	12,3
	11,8	13,3	12,9	13,6	13,2	12,4
25 %	24,3	23,9	25,4	25,8	25,0	26,1
	26,0	24,8	25,9	24,2	24,8	25,1
	25,3	25,6	25,0	24,6	25,9	25,2
	25,4	26,0	24,1	26,0	25,5	24,3
40 %	41,0	40,8	40,4	39,2	39,8	42,0
	42,5	40,1	39,5	40,5	40,6	40,5
	38,5	40,4	40,8	40,8	41,0	38,6
	37,5	39,1	39,8	39,7	38,5	39,2

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

1 : PolyLite 8001

2 : 75% PolyLite 8001 + 25% PolyLite 10069

3 : 50% PolyLite 8001 + 50% PolyLite 10069

4 : PolyLite T-238

5 : 75% PolyLite T-238 + 25% PolyLite 10069

6 : 50% PolyLite T-238 + 50% PolyLite 10069

TABELA 7.1 - % de FV curtas em amostras de diferentes regiões dos compostos (continuação)

e) Fibras de vidro: "Roving" 825, 1/4" de comprimento

Matriz Polimérica: Polylite 8001

	COMPOSIÇÃO TEÓRICA DOS COMPOSTOS - % DE FV EM PESO			
	5 %	12,5 %	25 %	40 %
	5,3	12,0	25,5	40,8
	4,9	11,8	24,7	41,5
	5,2	12,7	25,0	38,7
	5,0	12,6	25,2	39,6
	4,9	12,8	26,0	40,2
	5,3	12,5	23,9	39,9
	5,4	13,1	24,5	40,4
COMPOSIÇÃO DAS	4,7	13,3	26,1	38,4
AMOSTRAS DETER	4,5	11,9	25,6	41,0
MINADA EXPERI	5,0	12,6	25,1	40,5
MENTALMENTE-	5,1	12,8	24,5	39,8
% DE FV EM	4,8	12,1	24,8	39,6
PESO	4,7	12,7	25,9	39,1
	4,6	11,7	23,9	42,3
	5,0	12,5	24,6	38,7
	5,1	11,9	24,9	39,4
	5,2	13,0	25,0	40,5
	4,8	12,4	25,1	40,6
	4,8	12,3	24,8	41,0
	5,1	13,1	24,7	39,1

TABELA 7.2 - Valor médio e desvio padrão da % de FV nas 20 regiões dos compostos PolyLite 8001 - "Roving" 825, 1/4" de comprimento.

COMPOSIÇÃO TEÓRICA DOS COMPOSTOS (%)	VALOR MÉDIO REAL DA % DE FV NAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS DAS 20 REGIÕES DOS COMPOSTOS	DESVIO PADRÃO DA POPULAÇÃO ( $\sigma$ )
5,0	4,975	0,245
12,5	12,490	0,513
25,0	24,990	0,610
40,0	40,050	1,013

## 7.2 - Ensaios de Impacto

Os 360 testes de impacto foram realizados de acordo com a ASTM D-256, Método Izod. Os corpos de prova com 2,5 pol X 0,5 pol X espessura, ilustrados pela Figura 6.2, após passarem pela usinagem do entalhe com  $0,1 \pm 0,002$  pol de profundidade na largura de 0,5 pol, eram testados. Para cada corpo de prova determinou-se a energia necessária para a ruptura do material por impacto, resistência ao impacto, em libras-pé por polegada do entalhe, que é a unidade convencional de resistência ao impacto dos PR.

## Resultados dos Testes de Impacto

A Tabela 7.3 apresenta os valores médios da resistência dos compostos ao impacto. Cada valor médio é obtido a partir dos resultados de testes em 5 corpos de prova normalizados.

As Figuras 7.1 a 7.5 mostram a variação da resistência ao impacto (RI) com a porcentagem de FV, em função do comprimento e do tipo das FV, e, da matriz polimérica.

Dos resultados obtidos, pode-se constatar que:

1- A adição da resina *flexível* Polylyte 10069 às resinas *rígidas* Polylyte 8001 e Polylyte T-238 melhora a resistência ao impacto das matrizes poliméricas.

2- Para as diferentes matrizes poliméricas observa-se que os maiores valores da resistência ao impacto foram obtidos para 40% em peso de FV, "Roving" 825 1/2", reforçando a matriz polimérica 75% 8001/25% 10069.

3- Com o PI 8001 foi conseguido um reforçamento mais eficiente, isto é, maior relação da resistência ao impacto do composto com 40% em peso de FV para a resistência ao impacto da resina pura, enquanto que as matrizes poliméricas 50% T-238/50% 10069 e 50% 8001/50% 10069 apresentaram um reforçamento menos eficiente.

4- Em relação ao PI T-238, a matriz polimérica 8001 se adaptou melhor à resina plastificante 10069. Assim, as combinações 8001/10069 apresentaram maior resistência ao impacto.

5- Pela adição das FV curtas pode-se observar que em quais

quer % e comprimentos houve um aumento na resistência dos compostos ao impacto. Com o aumento da % de FV houve um expressivo crescimento na resistência ao impacto. Com o aumento no comprimento das FV de 1/8 pol para 1/2 pol houve um acentuado crescimento na resistência ao impacto. O gráfico da Figura 7.6 mostra, para a matriz polimérica 8001 reforçada com diferentes % de FV, a variação da resistência ao impacto com o comprimento das FV. Nota-se maior influência do comprimento para maiores % de FV.

6- Para as FV com comprimento 1/4 pol originadas do "Roving" 825 ou "Chopped Strands" 832 houve um comportamento semelhante na forma de variação da resistência ao impacto com a % de reforço, sendo que as FV "Chopped Strands" 832 devido ao melhor e mais intenso tratamento superficial (ver 3.4 e 6.2.1) forneceram um reforçamento mais eficiente (Figuras 7.1 a 7.5).

OBSERVAÇÃO: Para facilitar a visualização de todos os gráficos dos resultados experimentais obtidos, não estão mencionados os desvios-padrão dos valores médios, cujos valores foram calculados e considerados pequenos (da ordem de 5%).

TABELA 7.3 - Resistência dos compostos ao impacto

(valores médios de 5 testes)

TIPO DE FV	% DE FV EM PESO	RESISTÊNCIA AO IMPACTO, RI (LIBRAS.PÉ /POLEGADA DE ENTALHE)					
		Tipos de Matrizes Poliméricas*					
		1	2	3	4	5	6
"Roving" 825, 1/8 pol (R - 1/8")	0 **	0,21	0,36	0,40	0,29	0,42	0,53
	5	0,60	0,82	-	0,62	0,88	-
	12,5	1,42	1,83	-	1,43	1,74	-
	25	3,42	4,05	-	3,12	3,72	-
	40	6,24	7,10	-	5,43	6,50	-
"Roving" 825, 1/4 pol (R - 1/4")	0 **	0,21	0,36	0,40	0,29	0,42	0,53
	5	0,84	1,09	-	0,80	0,99	-
	12,5	1,77	2,40	-	1,72	2,36	-
	25	3,92	5,12	-	3,63	4,97	-
	40	7,32	9,35	-	6,39	8,84	-
"Roving" 825, 1/2 pol (R - 1/2")	0 **	0,21	0,36	0,40	0,29	0,42	0,53
	5	1,24	1,61	-	1,24	1,50	-
	12,5	2,61	3,66	-	2,50	3,00	-
	25	5,00	7,54	-	4,80	6,10	-
	40	10,15	14,25	-	8,18	12,01	-
"Chopped Strands" 832, 1/4 pol (CS - 1/4")	0 **	0,21	0,36	0,40	0,29	0,42	0,53
	5	1,05	1,49	1,26	0,95	1,38	1,15
	12,5	2,16	3,10	2,85	2,16	2,87	2,28
	25	4,45	6,55	5,23	4,10	5,43	4,51
	40	8,75	13,00	9,28	7,39	10,41	8,09

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

1 : PolyLite 8001

2 : 75% PolyLite 8001 + 25% PolyLite 10069

3 : 50% PolyLite 8001 + 50% PolyLite 10069

4 : PolyLite T-238

5 : 75% PolyLite T-238 + 25% PolyLite 10069

6 : 50% PolyLite T-238 + 50% PolyLite 10069

\*\* resinas puras sem reforço

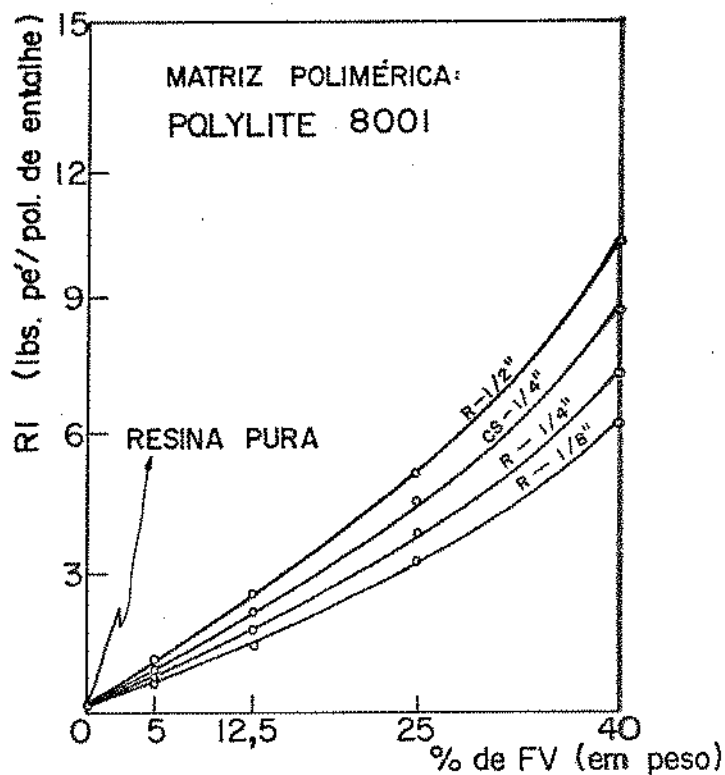


FIGURA 7.1 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI)

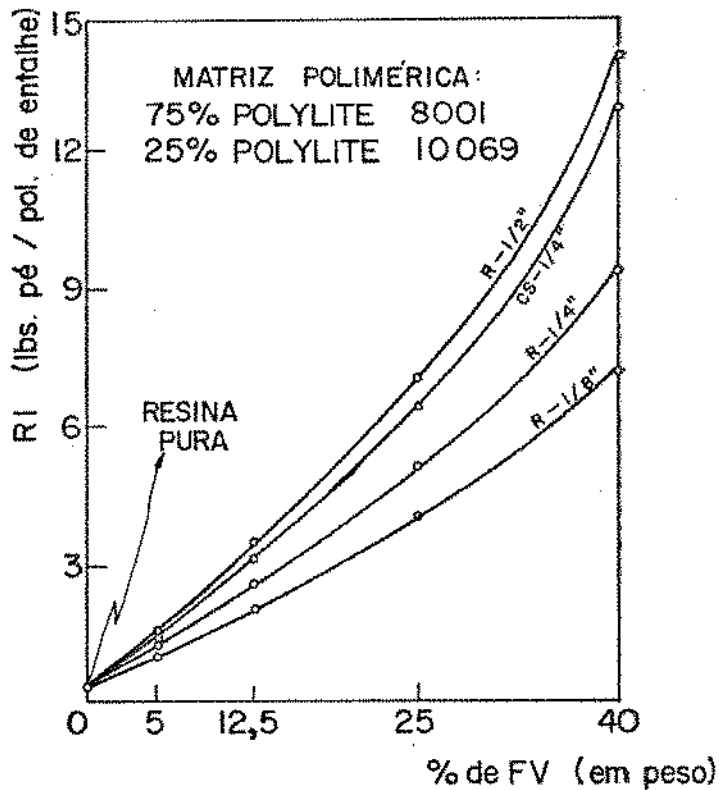


FIGURA 7.2 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI)



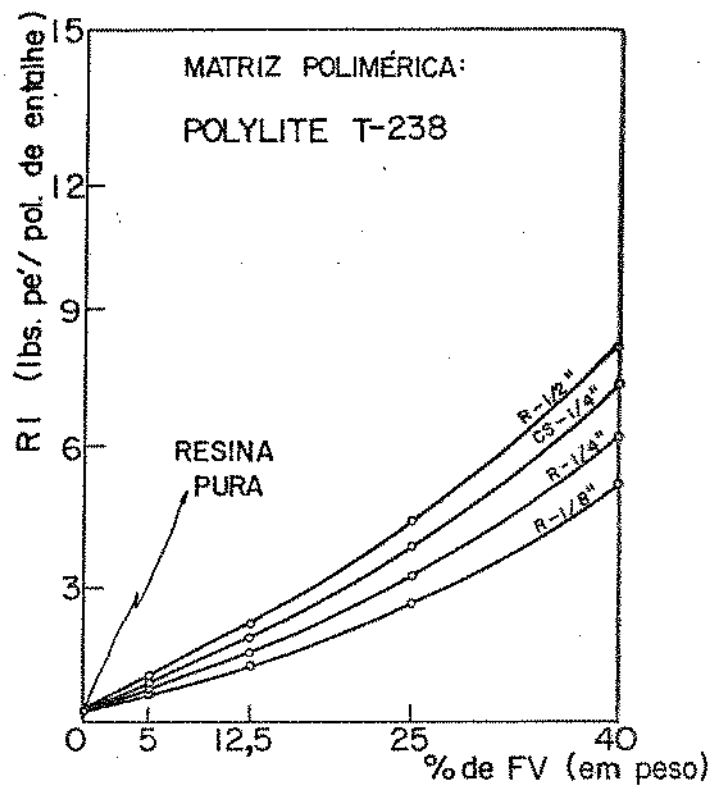


FIGURA 7.3 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI)

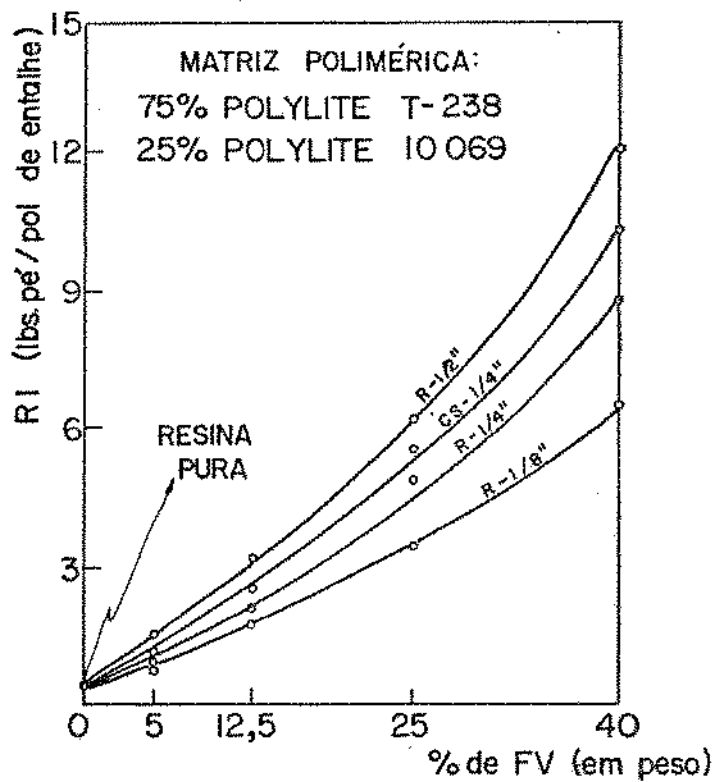


FIGURA 7.4 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI)

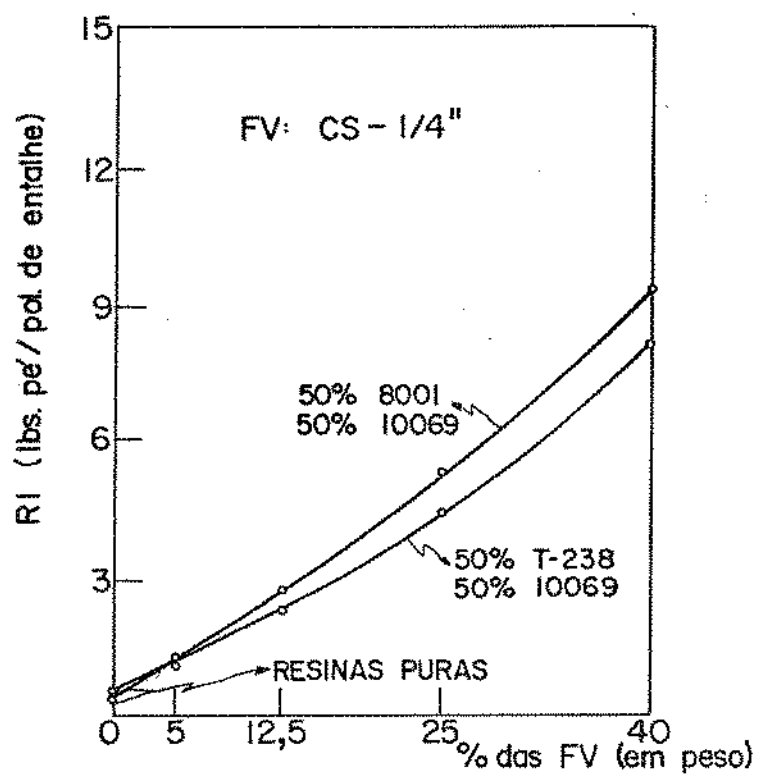


FIGURA 7.5 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência ao Impacto (RI)

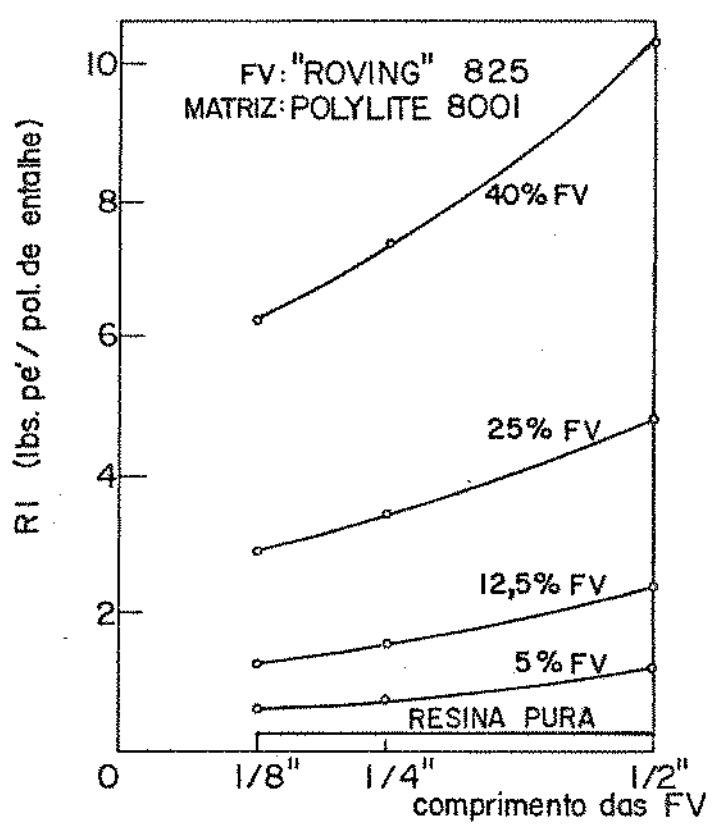


FIGURA 7.6 - Influência do comprimento das FV na Resistência ao Impacto (RI), para diferentes % de reforço

### 7.3 - Ensaio de Flexão

Nos 360 testes de flexão efetuados, os corpos de prova da Figura 6.2 com dimensões de 5 pol X 1/2 pol X 1/4 pol foram submetidos a flexão em três pontos, que consiste de dois apoios localizados a quatro polegadas e carga de flexão aplicada no centro do corpo de prova. Nestes testes foram determinados os valores da tensão de ruptura em flexão ou resistência à flexão a partir da carga de ruptura (P), da distância entre apoios ( $l$ ), e, das características geométricas do corpo de prova, largura (b) e espessura (d), relacionadas pela fórmula:

$$\sigma_{\text{flexão}} = \frac{3 P l}{2 b d^2}$$

onde:  $\sigma_{\text{flexão}}$  é a tensão de ruptura em flexão.

A velocidade destes ensaios é 0,11 polegadas por minuto ou 0,28 milímetros por minuto.

#### Resultado dos Testes de Flexão

A Tabela 7.4 apresenta os valores médios da resistência dos compostos à flexão. Cada valor médio é obtido a partir dos resultados de testes em 5 corpos de prova normalizados.

As Figuras 7.7 a 7.11 ilustram a variação da resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ) com a porcentagem de FV, em função do comprimento e do tipo das FV, e, da matriz polimérica.

Dos resultados obtidos, verificou-se que:

1- A adição da resina *flexível* PolyLite 10069 provocou uma diminuição na resistência à flexão das resinas rígidas 8001 e T-238.

2- As matrizes poliméricas derivadas da resina 8001, pura ou modificada com a resina 10069, apresentaram maiores aumentos relativos na resistência à flexão pelo reforçamento com as FV curtas do que as matrizes derivadas da resina T-238, pura ou modificadas pela resina 10069.

3- Nos compostos reforçados com as FV curtas nos comprimentos 1/2 pol e 1/4 pol ocorreram aumentos da resistência à flexão com aumentos da % de FV. Pelo emprego das FV originadas do "Roving" 825 com comprimento 1/8 pol, observou-se que para a faixa de 0 a aproximadamente 10% em peso de FV houve uma diminuição na resistência à flexão dos compostos, em relação às matrizes poliméricas puras. Nestas % as FV com 1/8 pol de comprimento funcionam como descontinuidades ou impurezas das resinas de poliéster. Para % superiores a aproximadamente 10% em peso, também estas FV provocam aumentos na resistência à flexão dos compostos com aumentos da % das FV curtas.

4- Para as FV com comprimento 1/4 pol originadas do "Roving" 825 ou "Chopped Strands" 832 houve o mesmo comportamento analisado nos ensaios de impacto (ver 7.2).

5- A Figura 7.12 ilustra a variação da resistência à flexão com os comprimentos das FV. Verificou-se o aumento desta propriedade com o aumento do comprimento das FV de 1/8 pol para 1/2 pol, com grande decréscimo para comprimentos inferiores a 1/4 pol.

TABELA 7.4 - Resistência dos compostos à flexão  
(valores médios de 5 testes)

TIPO DE FV	% DE FV EM PESO		RESISTÊNCIA À FLEXÃO, $\sigma_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )					
			Tipos de Matrizes Poliméricas*					
			1	2	3	4	5	6
"Roving" 825, 1/8 pol (R - 1/8")	0	**	869	810	705	835	797	684
	5		782	729	-	718	662	-
	12,5		896	876	-	856	813	-
	25		1032	978	-	957	920	-
	40		1120	1062	-	1024	971	-
"Roving" 825, 1/4 pol (R - 1/4")	0	**	869	810	705	835	797	684
	5		902	840	-	860	820	-
	12,5		1050	958	-	948	928	-
	25		1197	1092	-	1063	1031	-
	40		1292	1210	-	1146	1109	-
"Roving" 825, 1/2 pol (R - 1/2")	0	**	869	810	705	835	797	684
	5		960	883	-	910	866	-
	12,5		1140	1039	-	1069	993	-
	25		1351	1273	-	1238	1156	-
	40		1483	1450	-	1319	1260	-
"Chopped Strands" 832, 1/4 pol (CS - 1/4")	0	**	869	810	705	835	797	684
	5		926	863	739	883	841	713
	12,5		1047	996	838	1002	954	805
	25		1278	1182	931	1133	1085	892
	40		1404	1320	1027	1215	1180	961

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

- 1 : PolyLite 8001
- 2 : 75% PolyLite 8001 + 25% PolyLite 10069
- 3 : 50% PolyLite 8001 + 50% PolyLite 10069
- 4 : PolyLite T-238
- 5 : 75% PolyLite T-238 + 25% PolyLite 10069
- 6 : 50% PolyLite T-238 + 50% PolyLite 10069

\*\* resinas puras sem reforço

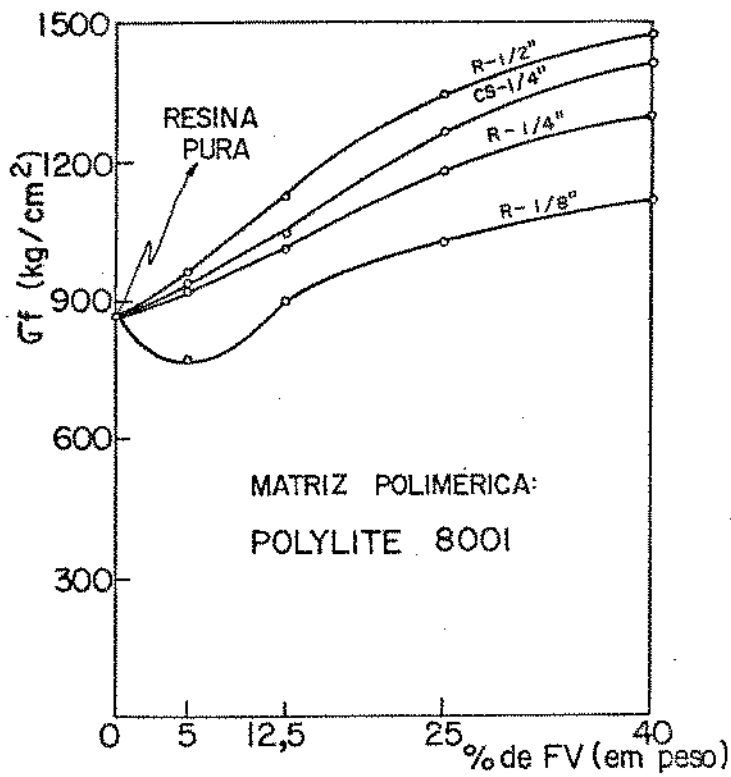


FIGURA 7.7 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ )

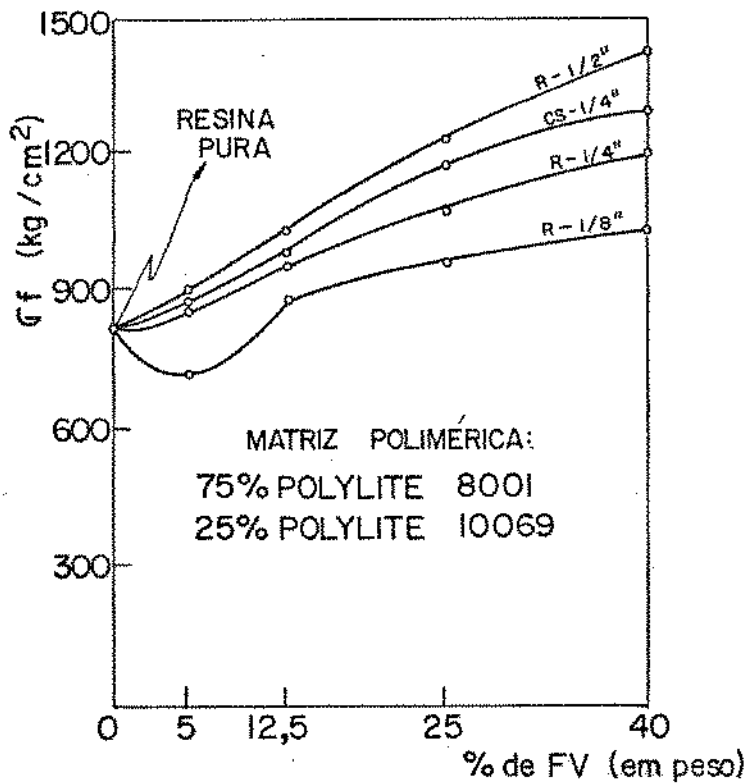


FIGURA 7.8 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ )

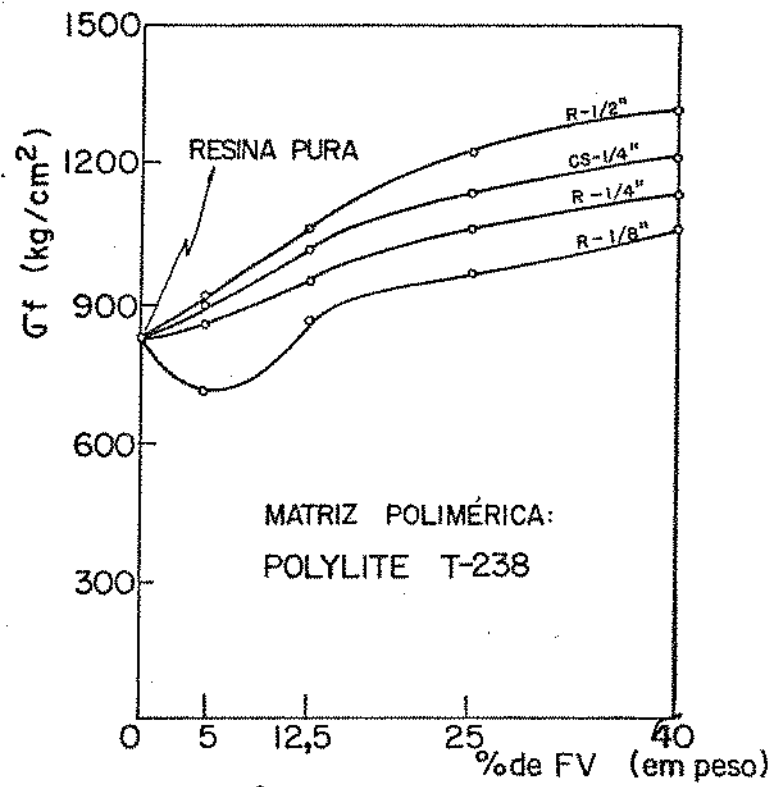


FIGURA 7.9 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ )

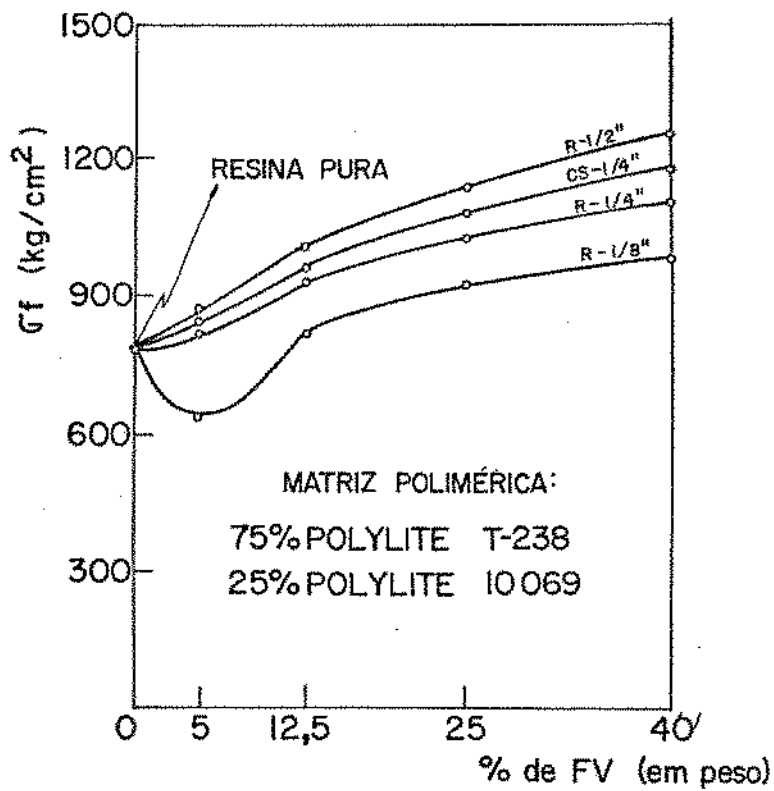


FIGURA 7.10 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ )

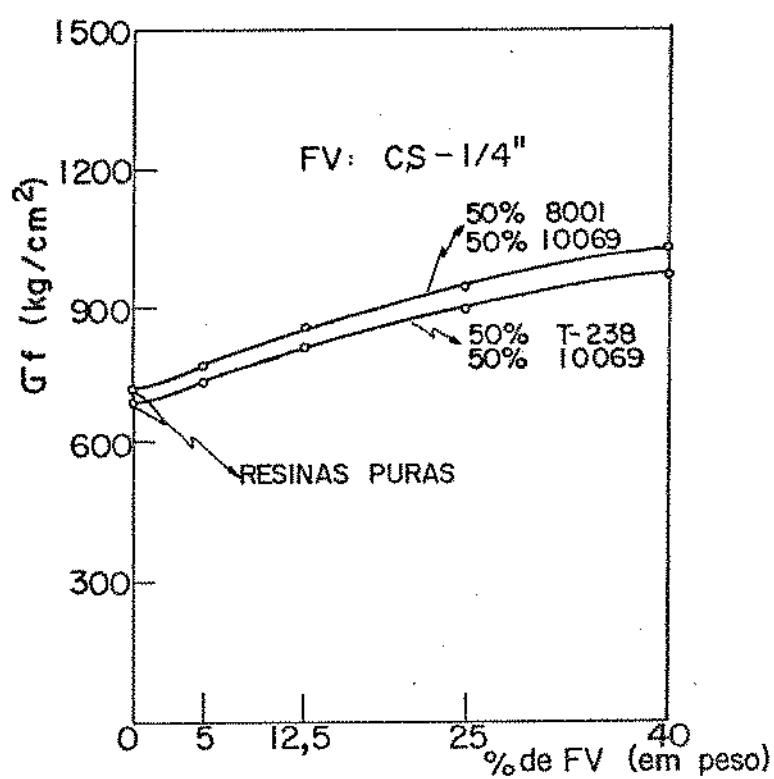


FIGURA 7.11 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ )

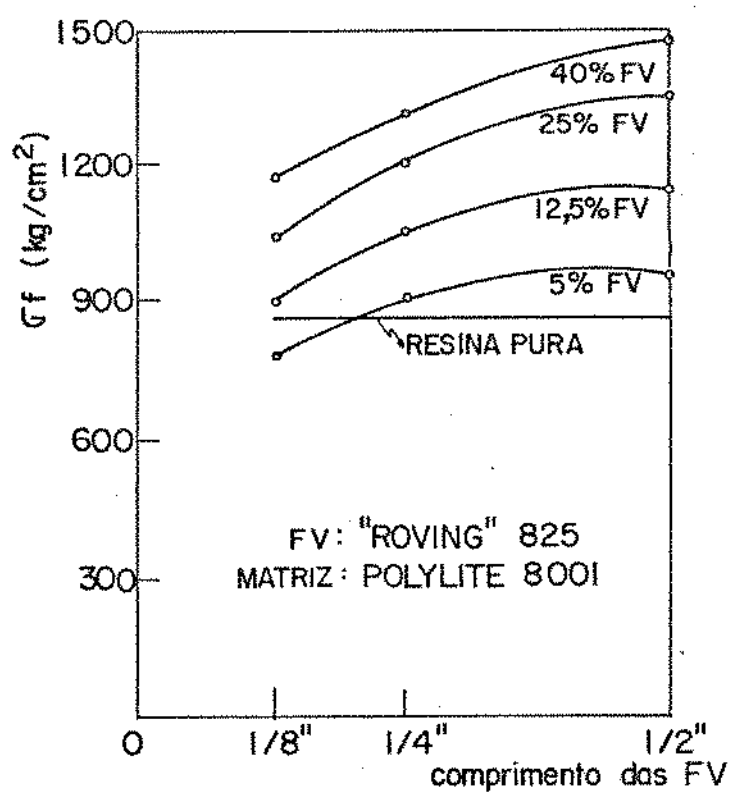


FIGURA 7.12 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Flexão ( $\sigma_f$ ), para diferentes % de reforço



#### 7.4 - Ensaio de Compressão

Para a realização dos 360 testes de compressão foram empregados 2 tipos de corpos de prova, mostrados na Figura 6.2, com as dimensões 1/4" X 1/4" X espessura e 1/2" X 1/2" X espessura. Nos testes realizados de acordo com a ASTM D-695 a uma velocidade de ensaio igual a 0,050 pol/min ou 1,3 mm/min, foram obtidos os valores da tensão de ruptura à compressão ou resistência à compressão através da relação:

$$\sigma \text{ compressão} = \frac{P}{A}$$

onde:  $\sigma$  compressão = tensão de ruptura em compressão

P = carga de ruptura em compressão

A = área inicial da secção transversal do corpo de prova

#### Resultado dos Testes de Compressão

A Tabela 7.5 apresenta os valores médios da resistência dos compostos à compressão. Cada valor médio é obtido a partir dos resultados de testes em cinco corpos de prova normalizados.

As Figuras 7.13 a 7.17 mostram a variação da resistência à compressão ( $\sigma_c$ ) com a % de FV, em função do comprimento e do tipo das FV, e, da matriz polimérica.

Pela análise dos resultados obtidos, verificou-se que:

- 1- Nas resinas poliméricas rígidas Polylyte 8001 e Polylyte

T-238, a inclusão da resina *flexível* PolyLite 10069 provocou decrêscimos na resistência à compressão das matrizes poliméricas. Quanto maiores as % da resina 10069, maiores foram os decrêscimos na resistência à compressão das matrizes e dos compostos.

2- Em relação à influência da incorporação de FV curtas na resistência à compressão dos compostos houve uma eficiência de reforçamento semelhante em todas as matrizes poliméricas.

3- A análise da resistência à compressão dos compostos mostrou um crescimento desta propriedade com o aumento da % em peso das FV, para todos os comprimentos das FV empregadas. A influência do comprimento das FV na faixa de 1/8" a 1/2", ilustrada na Figura 7.18, passa a ser marcante para maiores % de FV em peso. Para baixas % de FV a influência do comprimento das FV na resistência à compressão é mínima.

4- Para as FV com comprimento 1/4" originadas do "Roving" 825 ou "Chopped Strands" 832, houve o mesmo comportamento comentado nos ensaios de Impacto (ver 7.2).

TABELA 7.5 - Resistência dos compostos à compressão.  
(valores médios de 5 testes)

TIPO DE FV	% DE FV EM PESO		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, $\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )					
			Tipos de Matrizes Poliméricas*					
			1	2	3	4	5	6
	0	**	1460	1270	1020	1390	1210	970
"Roving" 825,	5		1510	1310	-	1438	1248	-
1/8 pol	12,5		1630	1426	-	1552	1330	-
(R - 1/8")	25		1881	1654	-	1791	1516	-
	40		2192	1904	-	2093	1754	-
	0	**	1460	1270	1020	1390	1210	970
"Roving" 825,	5		1545	1364	-	1469	1274	-
1/4 pol	12,5		1744	1530	-	1658	1426	-
(R - 1/4")	25		2160	1911	-	2055	1743	-
	40		2680	2333	-	2556	2148	-
	0	**	1460	1270	1020	1390	1210	970
"Roving" 825,	5		1578	1405	-	1498	1302	-
1/2 pol	12,5		1860	1625	-	1757	1521	-
(R - 1/2")	25		2440	2165	-	2300	1995	-
	40		3168	2783	-	2986	2560	-
	0	**	1460	1270	1020	1390	1210	970
"Chopped Strands"	5		1565	1395	1120	1487	1295	1059
832, 1/4 pol	12,5		1815	1615	1312	1720	1498	1243
(CS - 1/4")	25		2335	2107	1710	2210	1926	1615
	40		2985	2686	2167	2827	2459	2046

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

- 1 : Polylyte 8001
- 2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte 10069
- 3 : 50% Polylyte 8001 + 50% Polylyte 10069
- 4 : Polylyte T-238
- 5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069
- 6 : 50% Polylyte T-238 + 50% Polylyte 10069

\*\* resinas puras sem reforço

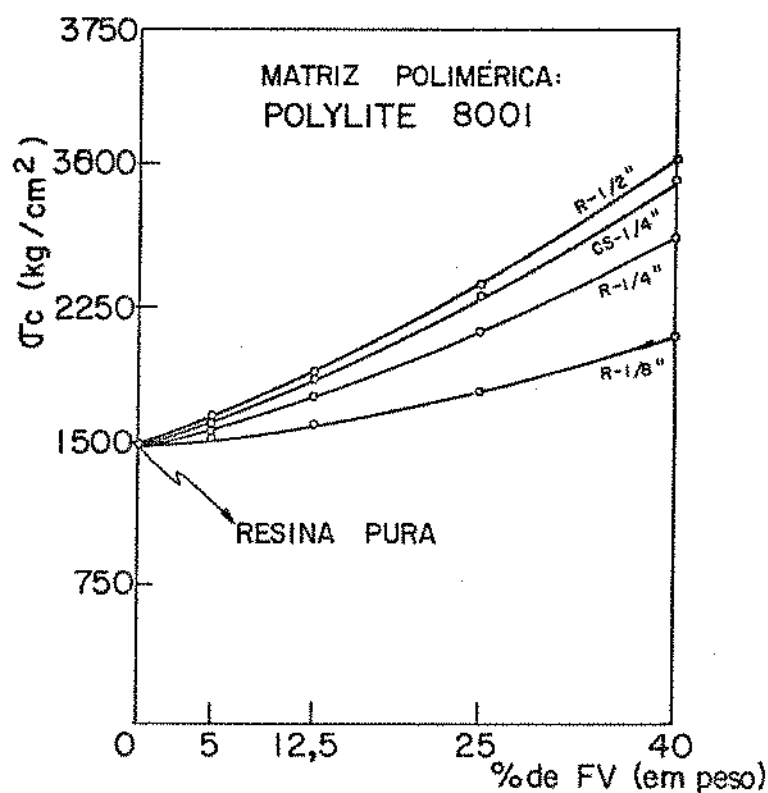


FIGURA 7.13 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ )

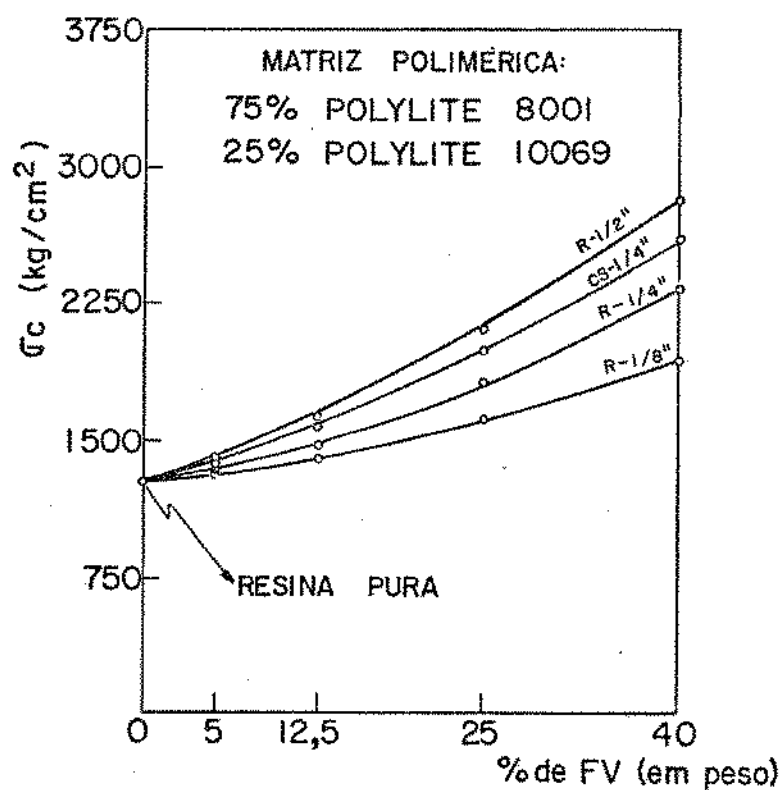


FIGURA 7.14 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ )

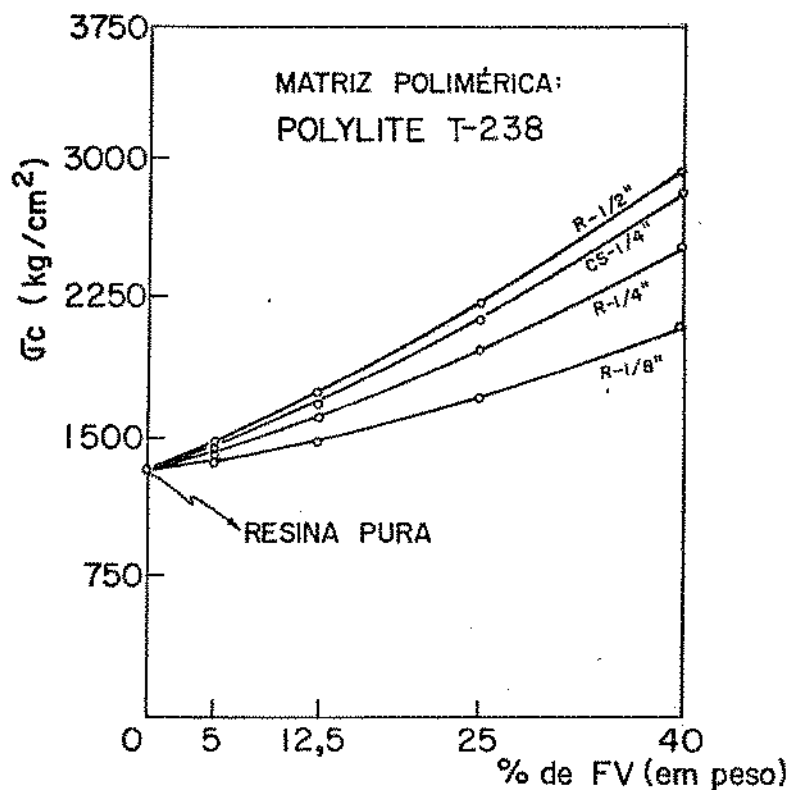


FIGURA 7.15 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ )

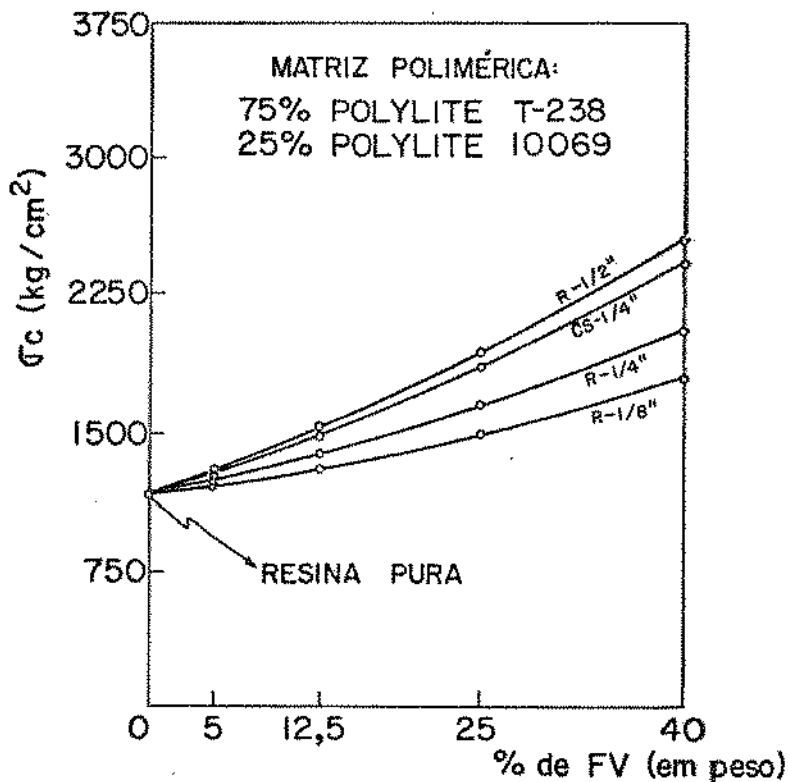


FIGURA 7.16 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ )

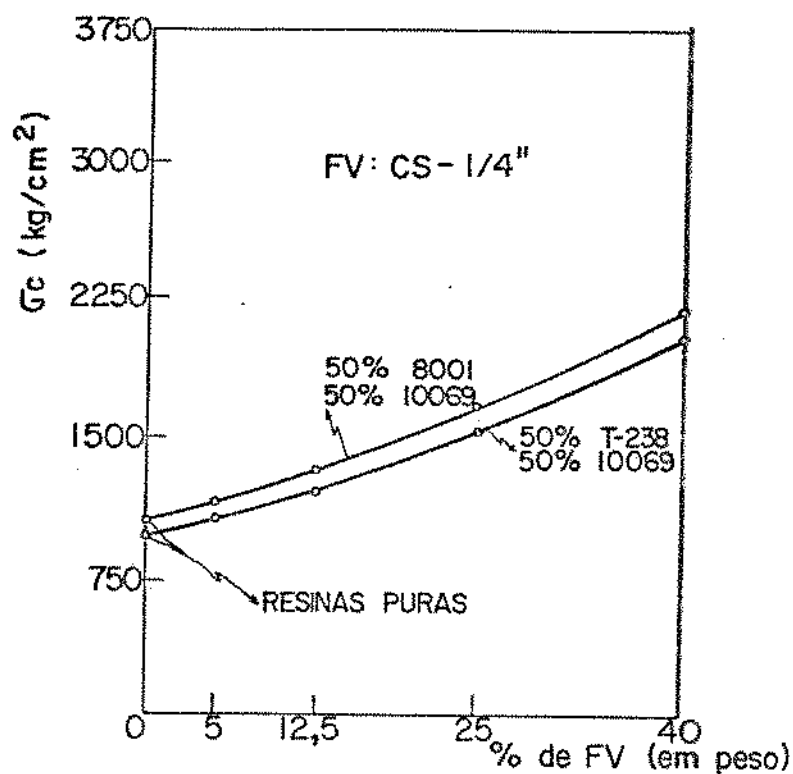


FIGURA 7.17 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ )

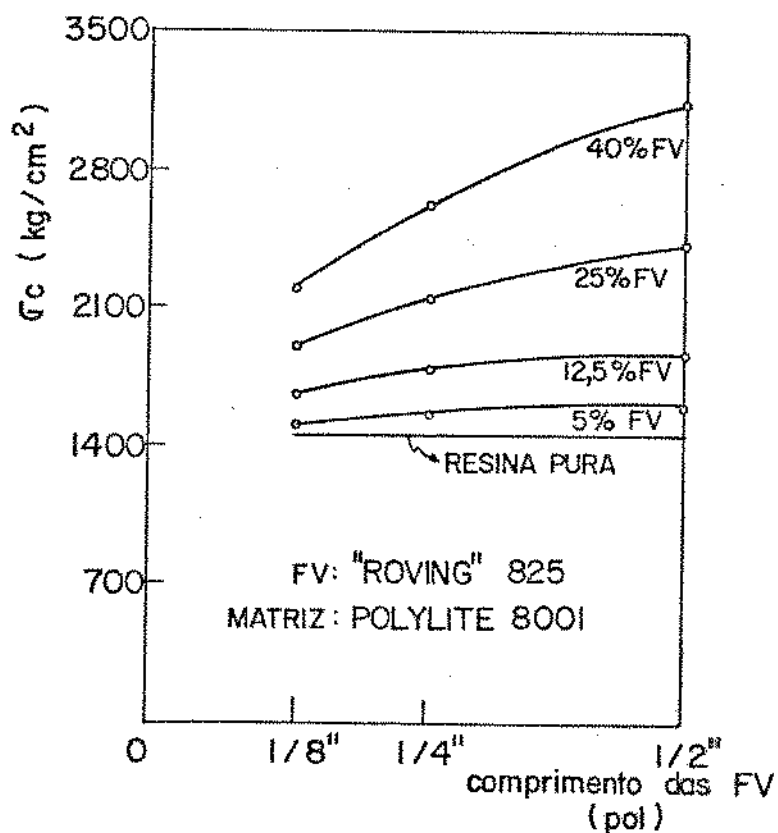


FIGURA 7.18 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ), para diferentes % de reforço

## 7.5 - Ensaíos de Tração

Em cada um dos 360 testes de tração, executados a uma velocidade de 0,5 cm/min com corpos de prova ASTM D-638 mostrados na Figura 6.2, foram determinados os valores descritos a seguir:

- Tensão de ruptura à tração (resistência à tração)

$$\sigma \text{ tração} = \frac{P}{A_0}$$

onde: P = carga de ruptura em tração, e

A<sub>0</sub> = área inicial da secção transversal do corpo de prova.

- Módulo de elasticidade em tração (Módulo de Young, E = gradiente da curva tensão X deformação na região linear, podendo nesta região ser calculado por:

$$E = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l}$$

onde: l<sub>0</sub> = comprimento inicial entre marcas.

F = carga de tração que causa uma deformação Δl entre marcas.

A<sub>0</sub> = área inicial da secção transversal do corpo de prova.

## Resultados dos testes de Tração

As Tabelas 7.5 e 7.6 apresentam respectivamente os valores médios da resistência e do módulo de elasticidade dos compostos à tração. Cada valor médio é obtido a partir dos resultados de testes

em 5 corpos de prova normalizados.

As Figuras 7.19 a 7.23 ilustram a variação da resistência à tração ( $\sigma_t$ ) com a % de FV, em função do comprimento e da qualidade das FV, e, da matriz polimérica. Para o módulo de elasticidade à tração ( $E$ ) os mesmos tipos de gráficos são mostrados nas Figuras 7.24 a 7.28.

Dos resultados obtidos para a resistência e módulo de elasticidade à tração pode-se constatar que:

1- Estas duas propriedades mecânicas das matrizes rígidas Polylite 8001 e Polylite T-238 sofreram decréscimos com a adição da resina flexível Polylite 10069. Para maiores % da resina 10069, maiores foram os decréscimos nestas propriedades das matrizes e dos compostos.

2- Em relação a influência da incorporação das FV curtas na resistência e no módulo de elasticidade à tração dos compostos, as matrizes derivadas da resina 8001 apresentaram uma eficiência de reforçamento ligeiramente superior.

3- As propriedades analisadas cresceram com o aumento da % em peso das FV, para todos os comprimentos das FV empregadas.

4- A variação da resistência à tração dos compostos com o comprimento das FV na faixa de 1/8" a 1/2" é aproximadamente linear, sendo mais acentuada para maiores % do reforço como mostra a Figura 7.29.

5- A Figura 7.30 mostra a influência do comprimento das FV no módulo de elasticidade dos compostos à tração. A influência do comprimento das FV é mais marcante para maiores % do reforço. O módulo



de elasticidade dos compostos sofre maiores decréscimos para as FV com comprimentos inferiores a 1/4".

6- Para as FV com comprimento 1/4" originadas do "Roving" 825 ou "Chopped Strands" 832 houve o mesmo comportamento analisado nos Ensaios de Impacto (ver 7.2).

#### Comparação de Resultados Experimentais e Teóricos:

O gráfico da Figura 7.31 faz uma comparação entre os resultados experimentais do módulo de elasticidade à tração obtidos para a resina PolyLite 8001 reforçada com as FV do "Roving" 825 com 1/2" de comprimento, e, os resultados teóricos do capítulo 5, Teoria de Previsão do Comportamento Mecânico de PIRFV curtas. Estes valores teóricos foram calculados do seguinte modo:

- pela introdução do fator de eficiência do reforçamento (K) sobre a lei das misturas (1,25).

- pelas equações micromecânicas de Puck simplificadas, equações 5.21 (24,50).

Observa-se um comportamento semelhante entre os resultados experimentais e teóricos, sendo mais elevados os valores teóricos do módulo de elasticidade à tração obtidos pelas duas teorias.

TABELA 7.6 - Resistência dos compostos à tração  
(valores médios de 5 testes)

TIPO DE FV	% DE FV em peso		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )					
			Tipos de Matrizes Poliméricas*					
			1	2	3	4	5	6
	0	**	619	478	371	605	452	340
"Roving" 825,	5		628	484	-	613	458	-
1/8 pol	12,5		644	495	-	632	470	-
(R - 1/8")	25		680	527	-	669	501	-
	40		784	620	-	751	562	-
	0	**	619	478	371	605	452	340
"Roving" 825,	5		640	489	-	624	469	-
1/4 pol	12,5		671	502	-	650	490	-
(R - 1/4")	25		722	541	-	701	523	-
	40		828	640	-	792	596	-
	0	**	619	478	371	605	452	340
"Roving" 825,	5		659	504	-	642	483	-
1/2 pol	12,5		706	533	-	686	522	-
(R - 1/2")	25		787	587	-	757	581	-
	40		919	702	-	867	663	-
	0	**	619	478	371	605	452	340
"Chopped Strands"	5		649	496	381	630	475	349
832, 1/4 pol	12,5		688	517	398	666	501	367
(CS - 1/4")	25		747	563	441	723	544	405
	40		854	666	543	822	620	481

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

- 1 : Polylyte 8001
- 2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte 10069
- 3 : 50% Polylyte 8001 + 50% Polylyte 10069
- 4 : Polylyte T- 238
- 5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069
- 6 : 50% Polylyte T-238 + 50% Polylyte 10069

\*\* resinas puras sem reforço

TABELA 7.7 - Módulo de elasticidade dos compostos na tração  
(valores médios de 5 testes)

TIPO DE FV	% DE FV EM PESO		MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO, E (kg/cm <sup>2</sup> )					
			Tipos de Matrizes Poliméricas*					
			1	2	3	4	5	6
"Roving" 825, 1/8 pol (R - 1/8")	0	**	50800	45300	41200	48700	43700	39900
	5		52000	46100	-	49600	44900	-
	12,5		54400	49200	-	52000	46800	-
	25		61900	54900	-	58100	54000	-
	40		76800	68500	-	73200	66700	-
"Roving" 825, 1/4 pol (R - 1/4")	0	**	50800	45300	41200	41200	43700	39900
	5		54500	48500	-	51700	46200	-
	12,5		60300	54000	-	56600	49500	-
	25		72000	64800	-	66800	62400	-
	40		92000	82600	-	87300	79900	-
"Roving" 825, 1/2 pol (R - 1/2")	0	**	50800	45300	41200	48700	43700	39900
	5		57600	50400	-	53600	48800	-
	12,5		67700	58300	-	61100	53900	-
	25		84900	72700	-	76000	69300	-
	40		109000	92500	-	99500	89100	-
"Chopped Strands" 832, 1/4 pol (CS - 1/4")	0	**	50800	45300	41200	48700	43700	39900
	5		56200	49200	43600	52800	47300	41200
	12,5		63100	56100	48100	59000	51800	44500
	25		77500	68800	58000	71000	66000	53100
	40		98000	86800	77800	91600	84100	71700

\* Tipos de Matrizes Poliméricas:

- 1 : Polylyte 8001
- 2 : 75% Polylyte 8001 + 25% Polylyte 10069
- 3 : 50% Polylyte 8001 + 50% Polylyte 10069
- 4 : Polylyte T-238
- 5 : 75% Polylyte T-238 + 25% Polylyte 10069
- 6 : 50% Polylyte T-238 + 50% Polylyte 10069

\*\* resinas puras sem reforço

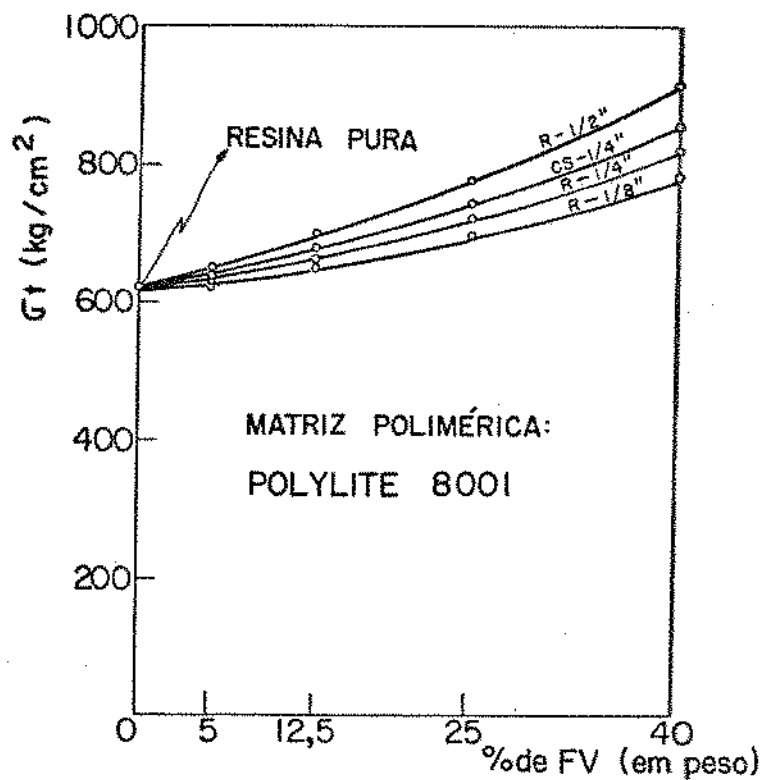


FIGURA 7.19 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à tração ( $\sigma_t$ )

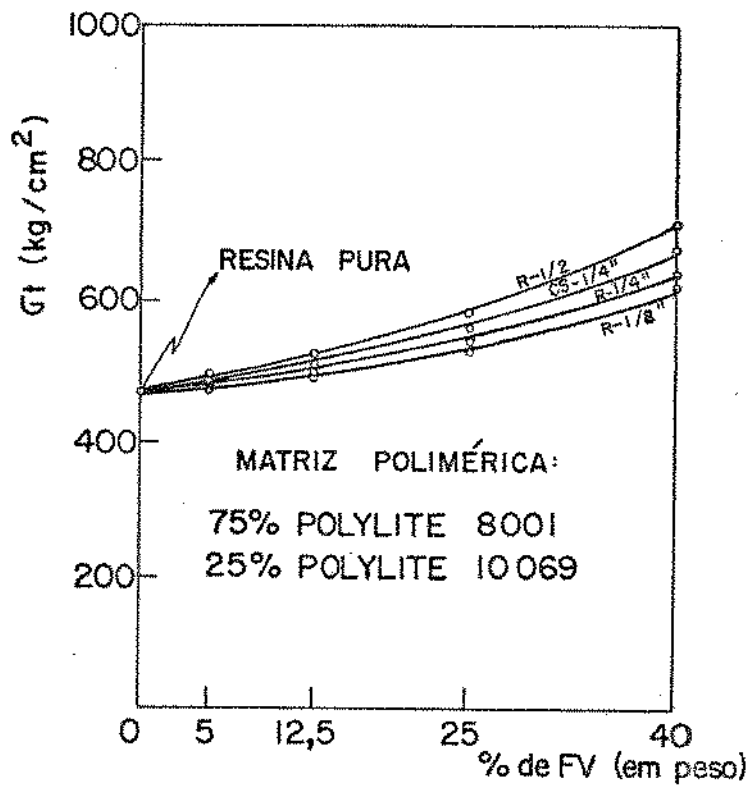


FIGURA 7.20 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à tração ( $\sigma_t$ )

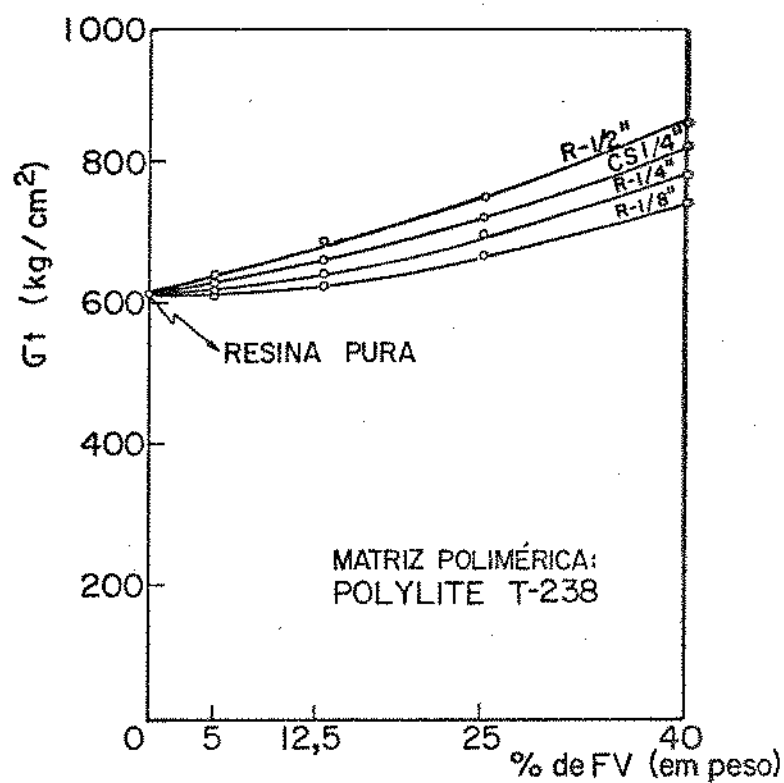


FIGURA 7.21 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à tração ( $\sigma_t$ )

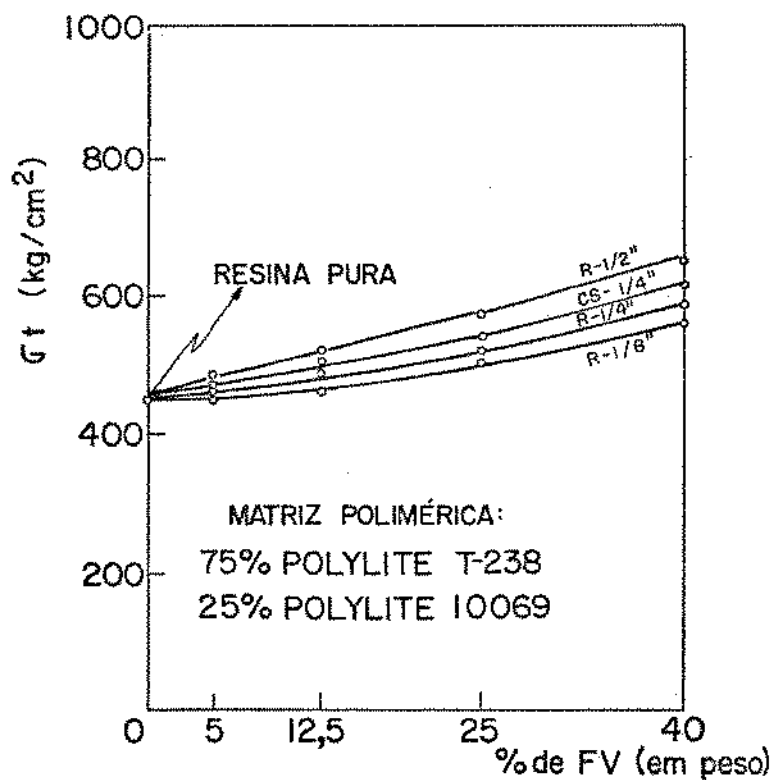


FIGURA 7.22 - Influência do comprimento e da % das FV na Resistência à tração ( $\sigma_t$ )

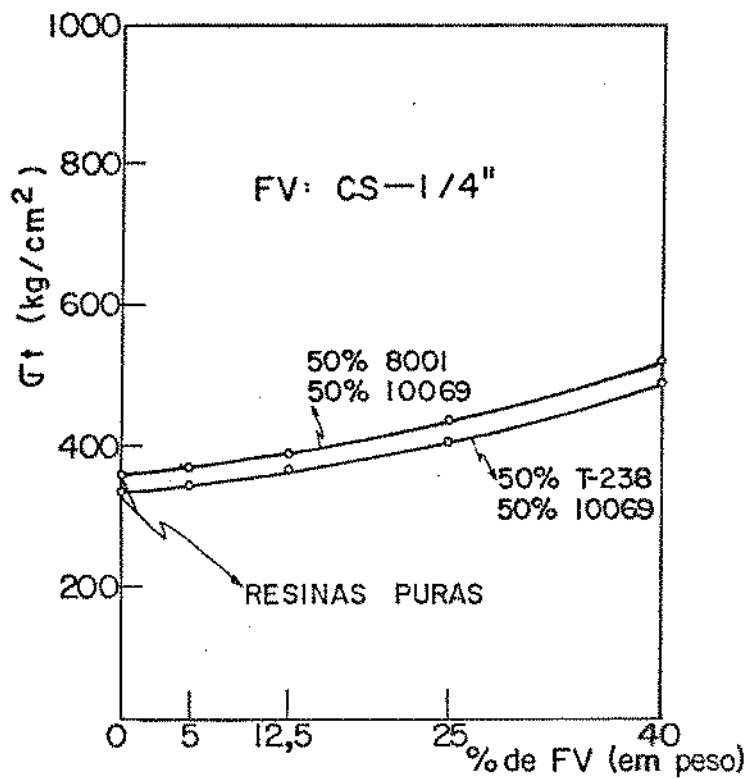


FIGURA 7.23 - Influência do tipo de matriz e da % das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_t$ )

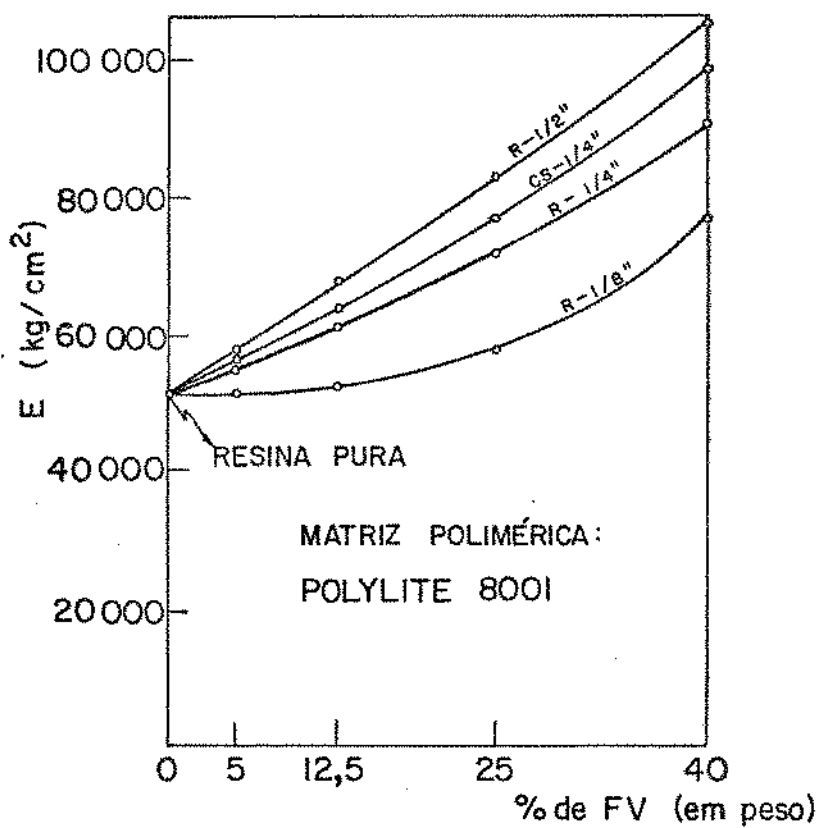


FIGURA 7.24 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ )

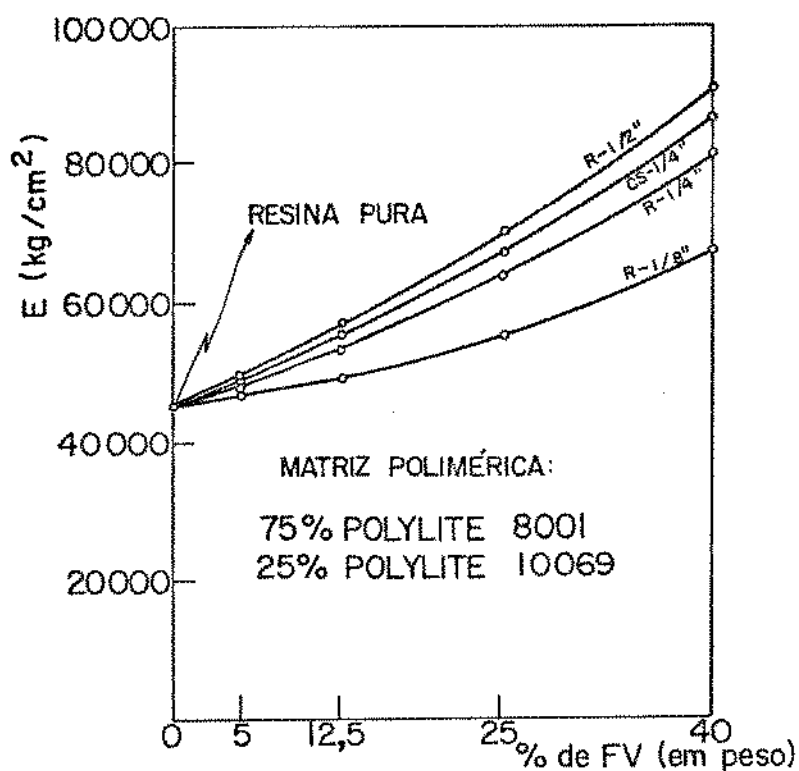


FIGURA 7.25 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração (E)

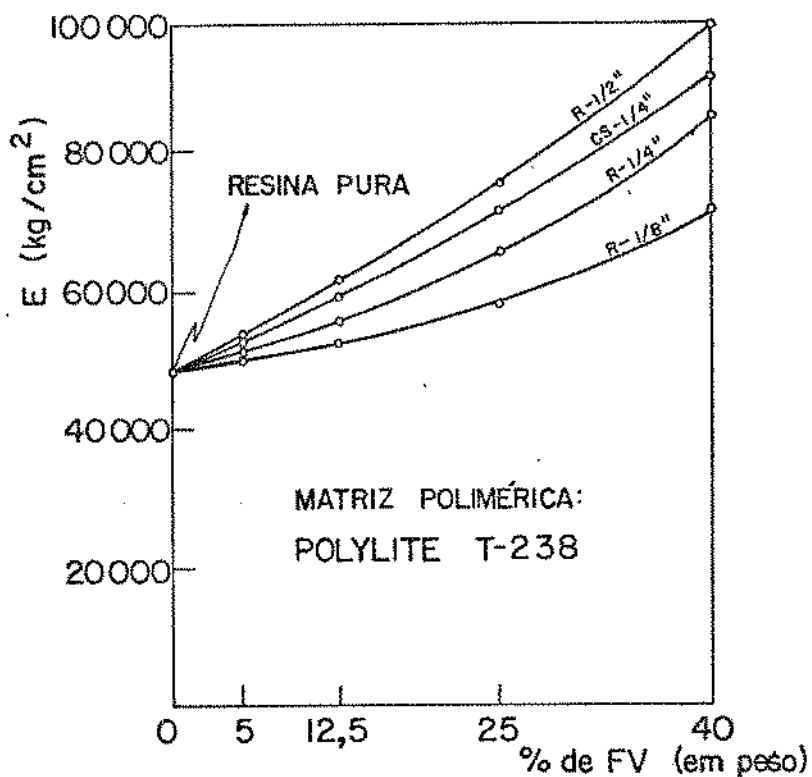


FIGURA 7.26 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração (E)

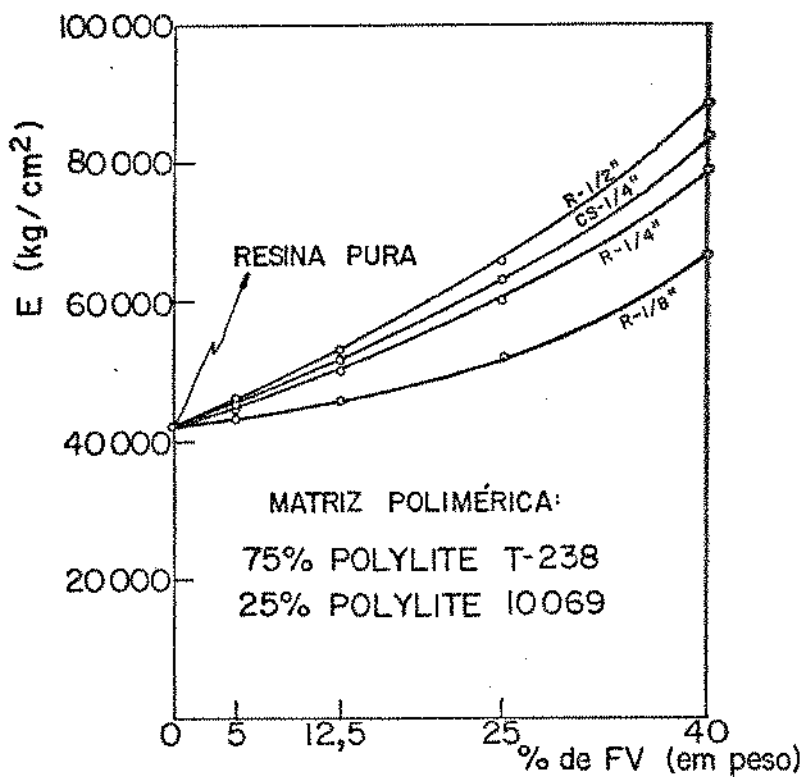


FIGURA 7.27 - Influência do comprimento e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração (E)

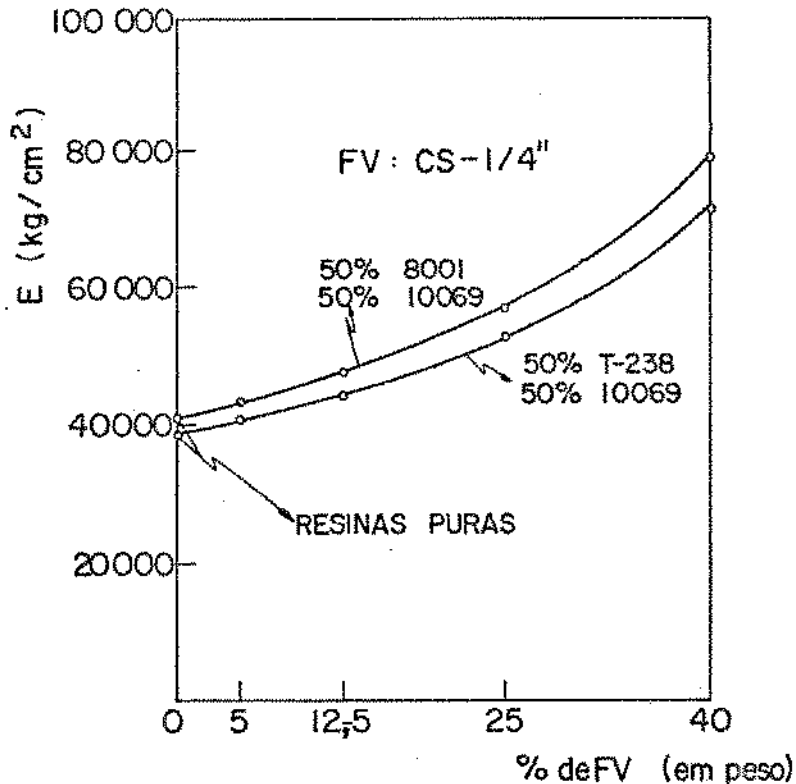


FIGURA 7.28 - Influência do tipo de matriz e da % das FV no Módulo de Elasticidade à Tração (E)



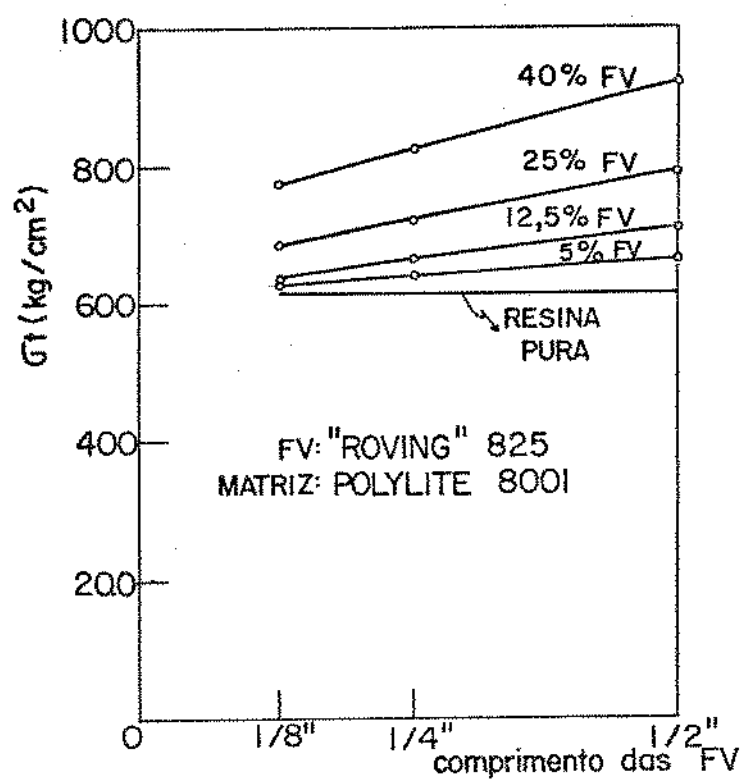


FIGURA 7.29 - Influência do comprimento das FV na Resistência à Tração ( $\sigma_T$ ), para diferentes % de reforço

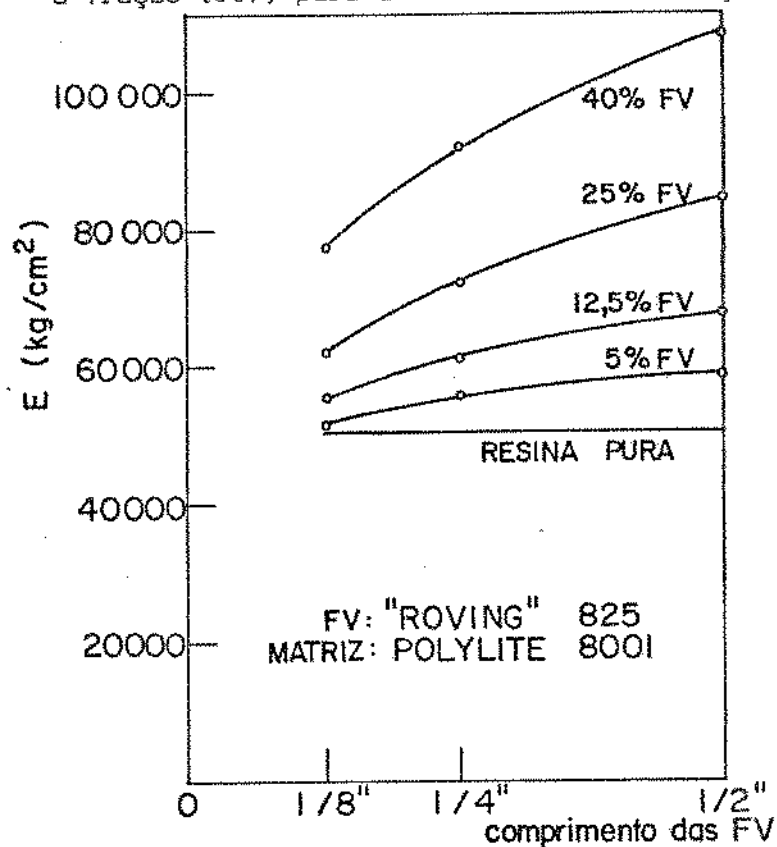


FIGURA 7.30 - Influência do comprimento das FV no Módulo de Elasticidade à Tração ( $E$ ), para diferentes % de reforço

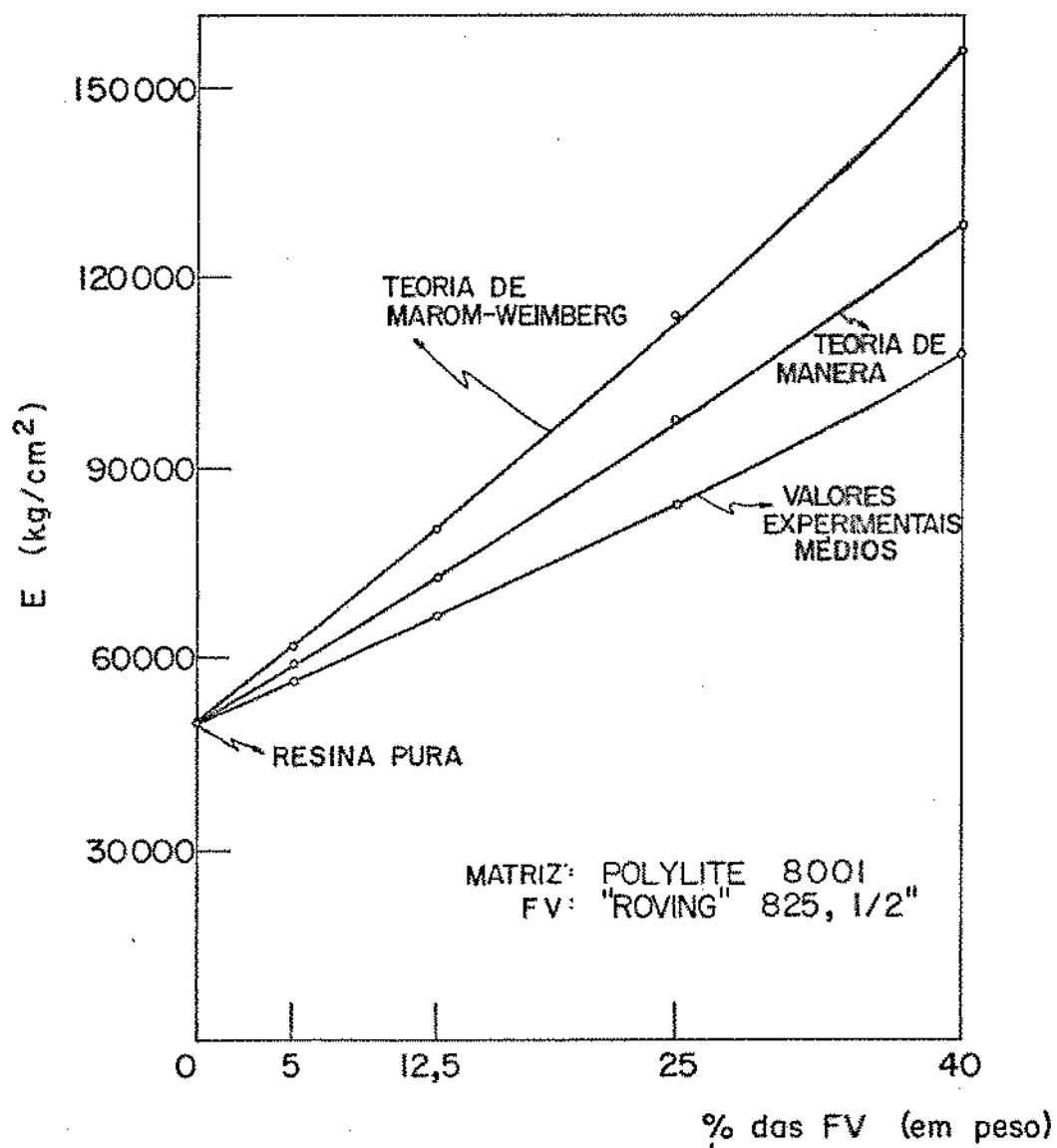


FIGURA 7.31 - Módulo de Elasticidade à Tração (E) em função da % das FV - valores experimentais e teóricos

## 7.6- Análise Estatística dos Resultados

O Apêndice 2 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas dos compostos PolyLite 8001 reforçados com FV curtas obtidas do "Roving" 825 nos comprimentos 1/8, 1/4 e 1/2 pol. Os compostos com a matriz polimérica 8001 foram escolhidos para esta análise, pois apresentaram o melhor conjunto de propriedades mecânicas.

Utilizando um computador Hewlett-Packard 9805 A, com uma programação de ajustamento de curvas para um conjunto de dados, correlacionados linear ou não linearmente e com o cálculo do coeficiente de correlação, os resultados experimentais de todas as propriedades mecânicas de cada composto foram analisados. Verificou-se que os resultados experimentais apresentavam uma melhor correlação não linear quadrática, sendo determinadas as "melhores parábolas de ajustamento para cada conjunto de dados (Apêndice 2, Gráficos de 1 a 15).

Nas parábolas de equação geral:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

onde:  $y$  = propriedade mecânica e

$x$  = % de FV curtas em peso,

nota-se que os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  dependem do comprimento das FV sendo crescentes com estes.

Os coeficientes da correlação determinados com valores iguais ou muito próximos a 1, indicam que existe uma dependência direta entre as propriedades mecânicas e a % de FV, bem representada pela correlação não linear parabólica.

## 8- CONCLUSÕES

A técnica de moldagem empregada neste trabalho para a obtenção dos compostos poliésteres insaturados reforçados com FV curtas mostrou ser tecnicamente viável. Em laboratório utilizou-se um processo quase inteiramente manual, mas, se o material for empregado na fabricação de peças, a técnica de sua preparação poderá ser inteiramente mecanizada e mesmo automatizada assegurando ainda melhor resultado. A facilidade de moldagem diminui com o aumento da porcentagem das FV, entretanto, com 40% de FV em peso a moldabilidade do composto continua sendo boa.

Na moldagem dos materiais verificou-se que não houve variação no comprimento das FV, ou seja, não houve influência do processamento no comprimento das FV.

Com exceção da resistência à flexão para os compostos com FV de comprimento 1/8 pol em proporções inferiores a aproximadamente 10% em peso, todos os outros apresentaram melhores propriedades mecânicas pelo reforçamento com as FV de comprimento 1/8, 1/4 e 1/2 pol, em quaisquer porcentagens. Esta conclusão está de acordo com os resultados teóricos previstos<sup>(1,24,25)</sup>.

As propriedades mecânicas dos compostos crescem com os aumentos da porcentagem e do comprimento das FV. Concluiu-se que a influência do comprimento das FV é mais marcante para porcentagens mais elevadas do reforço como mostra o histograma da Figura 8.1.

Os compostos poliéster insaturado - fibras de vidro curtas deverão ter um campo de aplicação bastante amplo devido às facilidades de moldagem, às propriedades mecânicas e ao custo, pois podem ser modificados pelo emprego de cargas de baixo custo, e, principal

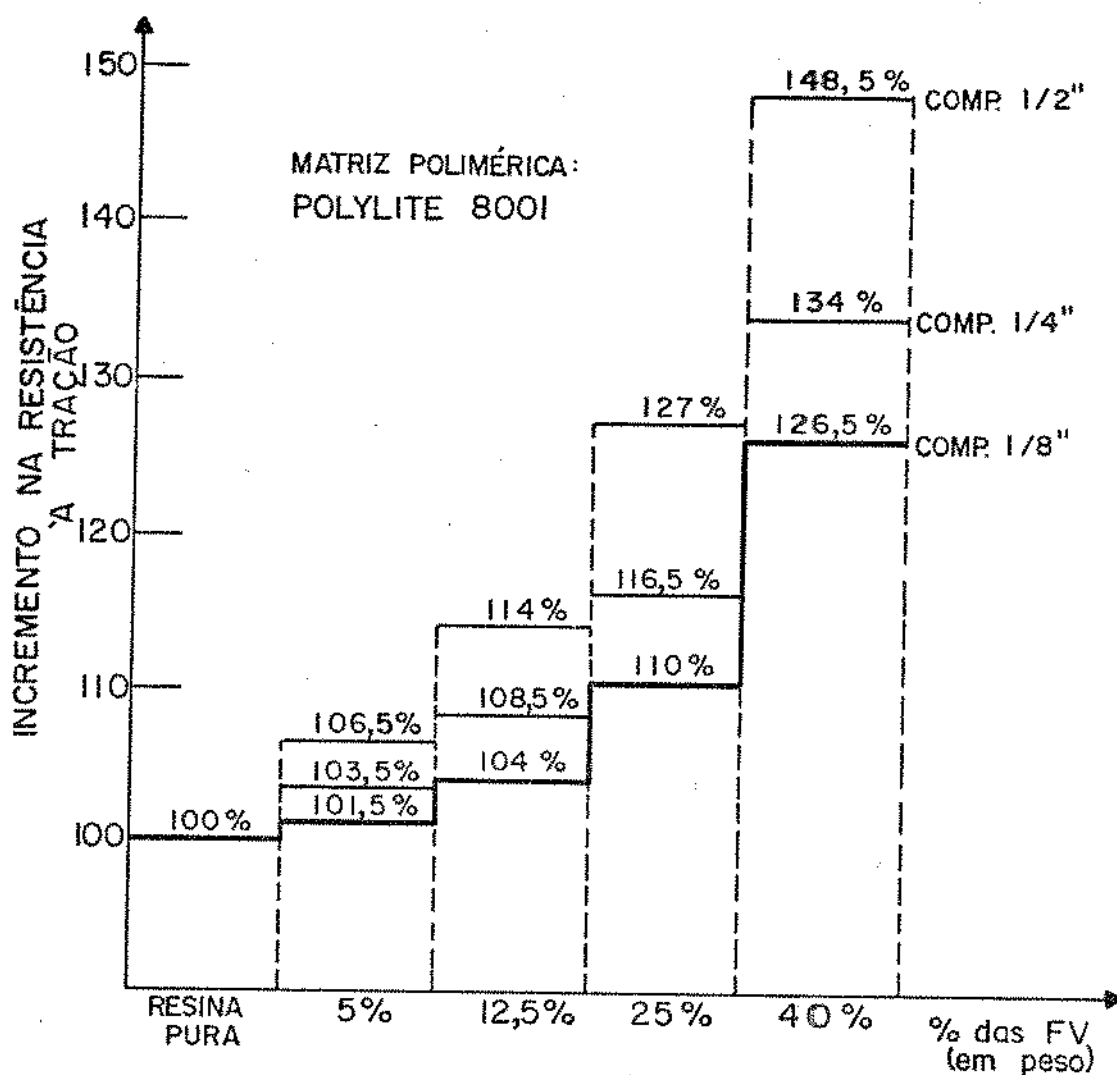


FIGURA 8.1 - Incremento na resistência à tração dos compostos pela incorporação do reforço

mente, podem utilizar FV micropicadas, rejeitadas no processo de fabricação. As fibras empregadas neste trabalho foram cortadas especialmente de fibras contínuas ("roving" comercial), não provieram de material rejeitado. Acredita-se que este último permita a obtenção de fibras de comprimento equivalente e, se submetidos após a micropicagem a um retratamento com agentes de acoplagem (vide 3.4) venham a alcançar os mesmos resultados qualitativos e quantitativos desta pesquisa, senão melhores.

## APÊNDICE 1

Relação entre % em peso e % em volume para as resinas de poliéster insaturado e FV utilizadas:

- Densidade média das matrizes poliméricas =  $1,13 \text{ g/cm}^3$

- Densidade da FV, tipo "E" =  $2,55 \text{ g/cm}^3$

- Fator de divisão para passar da % em peso para % em volume da FV:

$$\frac{\text{densidade da FV}}{\text{densidade média das matrizes}} = \frac{2,55}{1,13} = 2,25$$

- % em peso de FV  $\rightarrow$  % em volume de FV (vf)

% EM PESO	% EM VOLUME (vf)
5	2,2
12,5	5,6
25	11,2
40	17,8

## APÊNDICE 2

Os gráficos de 1 a 15 apresentam as "melhores parábolas de ajustamento" das propriedades mecânicas dos compostos PolyLite 8001 - FV curtas do "Roving" 825 nos comprimentos 1/8, 1/4 e 1/2 pol, em função da % das FV.

Para a equação geral da parábola  $y = Ax^2 + Bx + C$ , estão listados os coeficientes A, B e C, e o correspondente coeficiente de correlação (r) de cada conjunto de dados (ver 7.6).

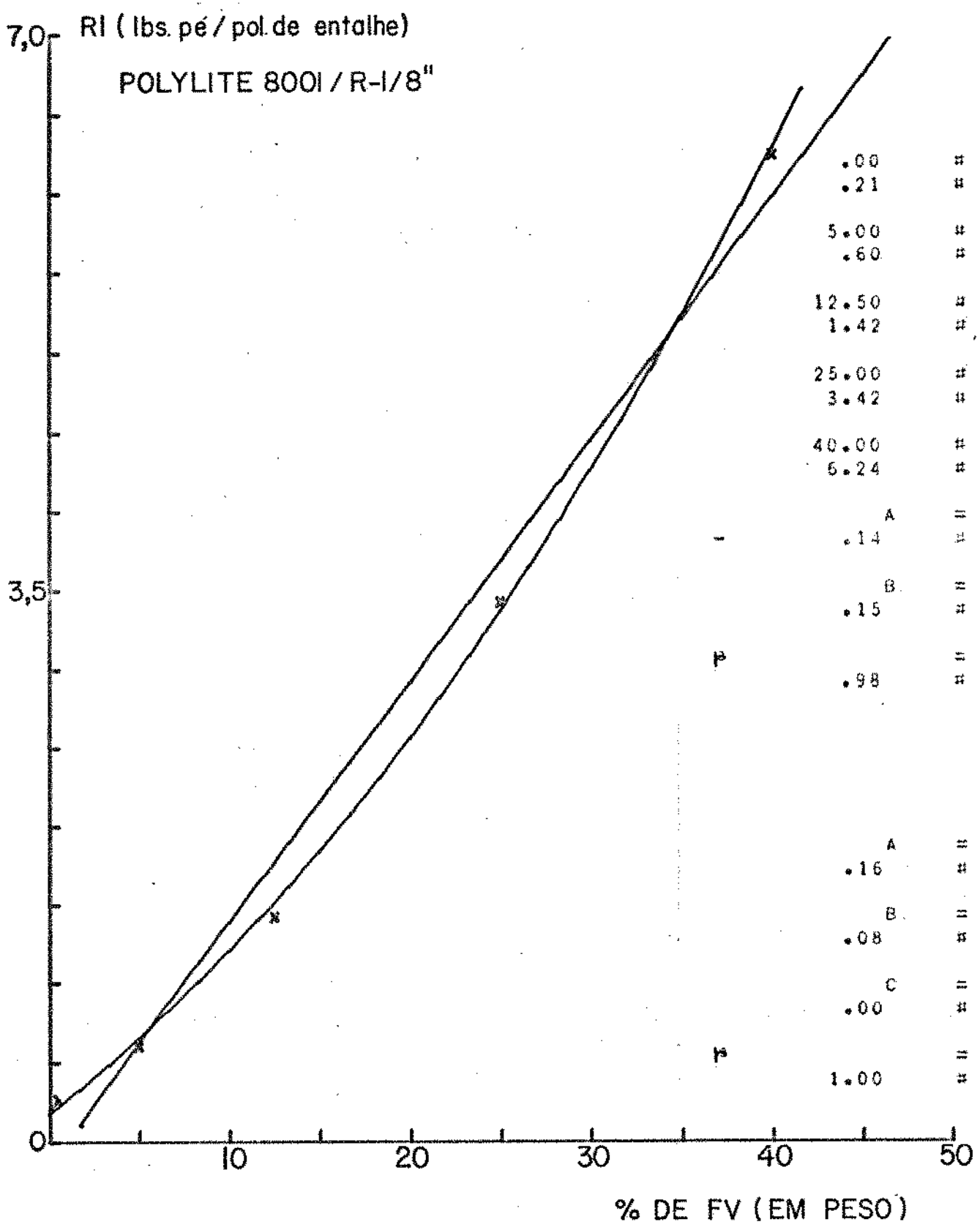
Nos gráficos; RI = resistência ao impacto

$\sigma_f$  = resistência à flexão

$\sigma_c$  = resistência à compressão

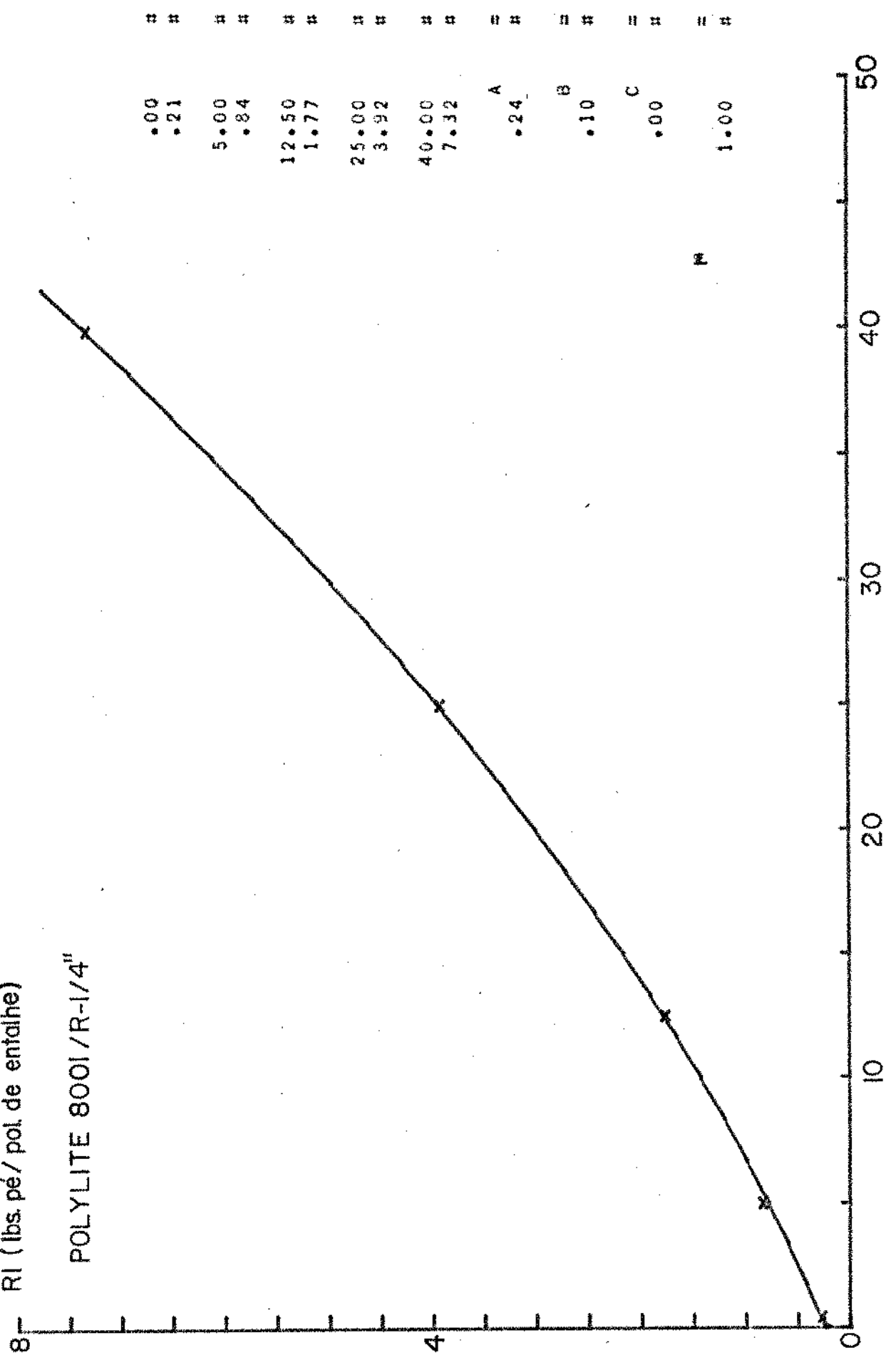
$\sigma_t$  = resistência à tração

E = módulo de elasticidade à tração





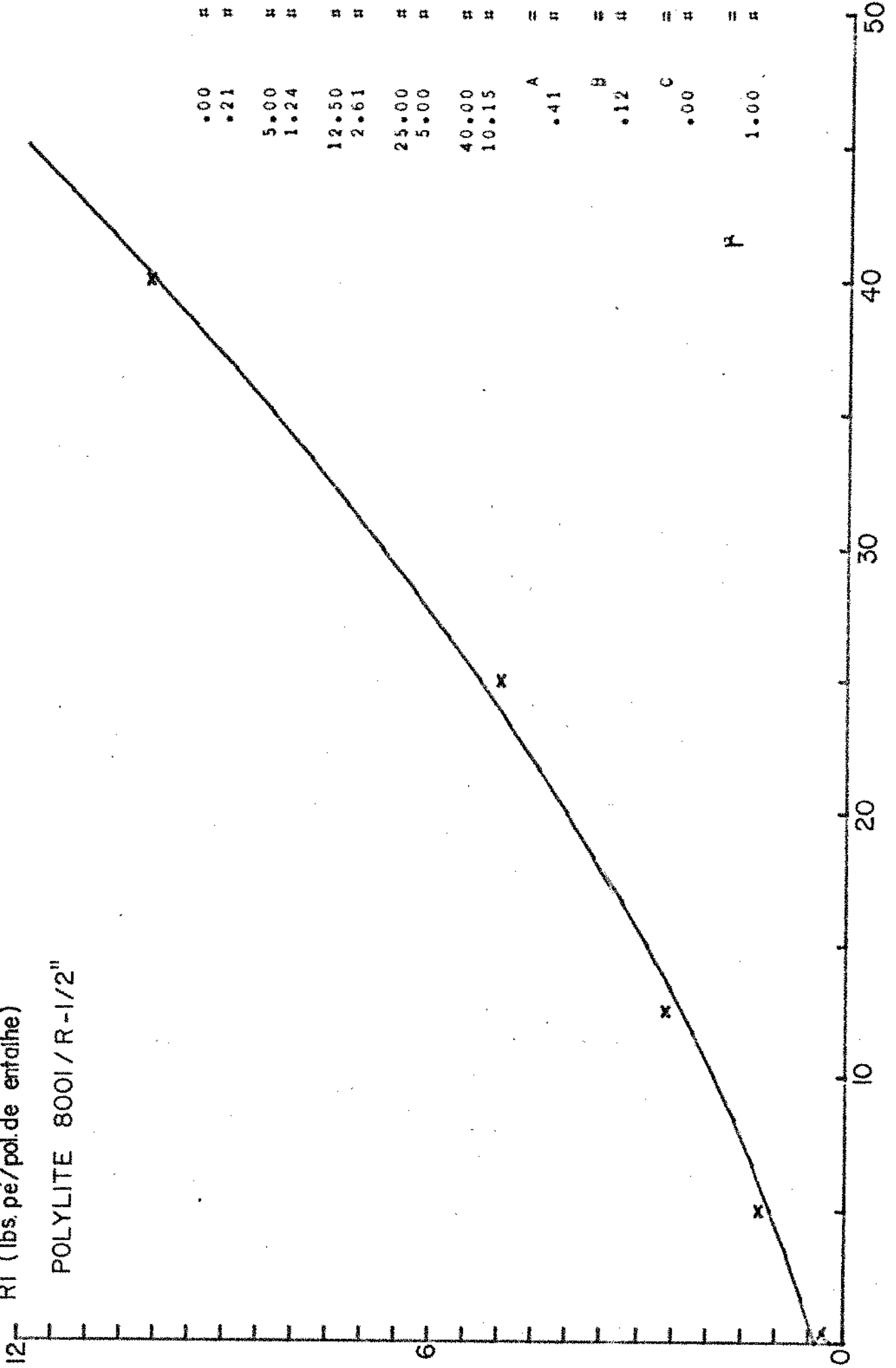
RI ( lbs. pé/ pot. de entalhe)  
POLYLITE 8001/R-1/4"



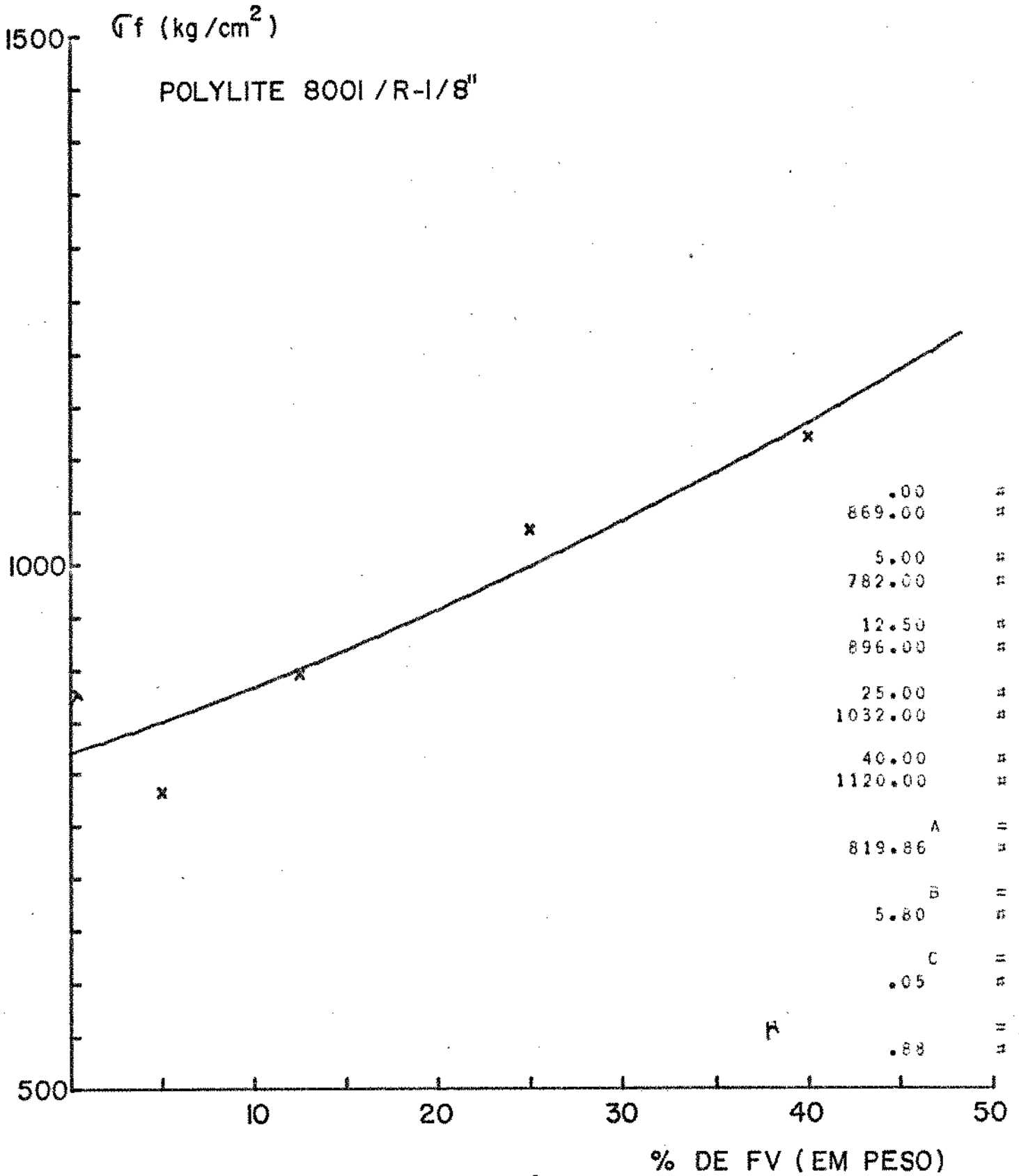
.00	#
.21	#
5.00	#
.84	#
12.50	#
1.77	#
25.00	#
3.92	#
40.00	#
7.32	#
.24	#
.10	#
.00	#
1.00	#

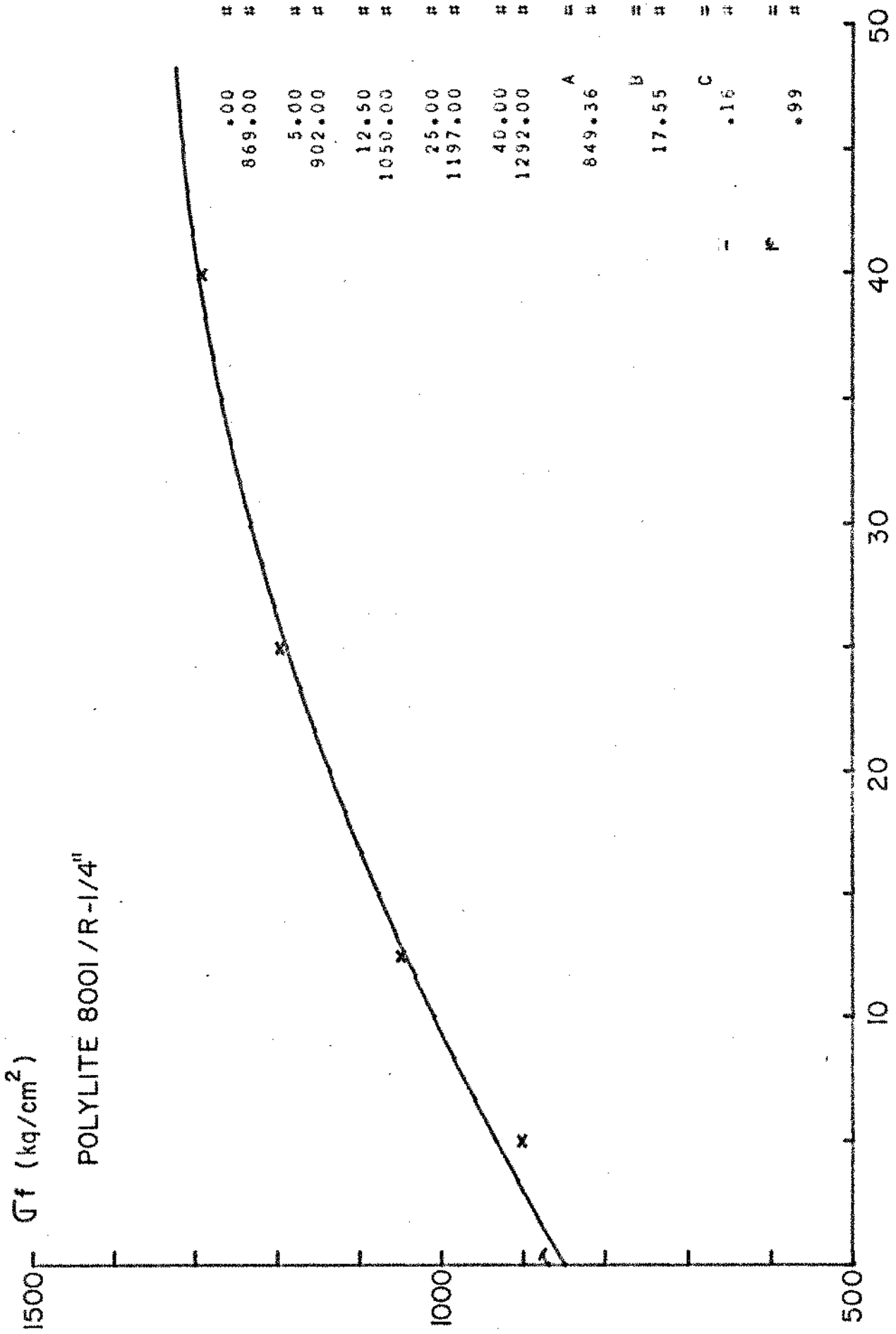
% DE FV (EM PESO)

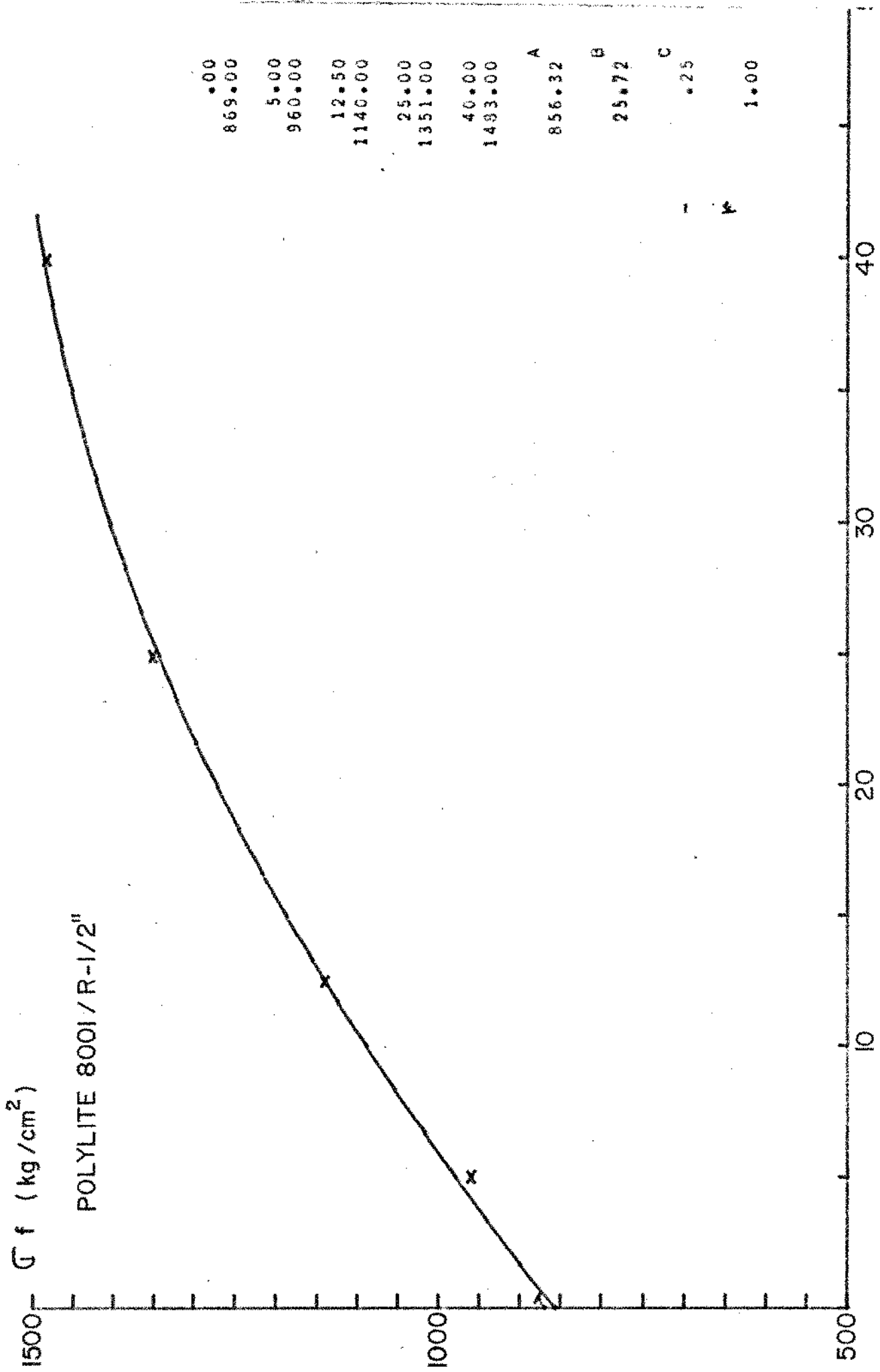
RI (lbs pé/pol.de entalhe)  
POLYLITE 8001/R-1/2"



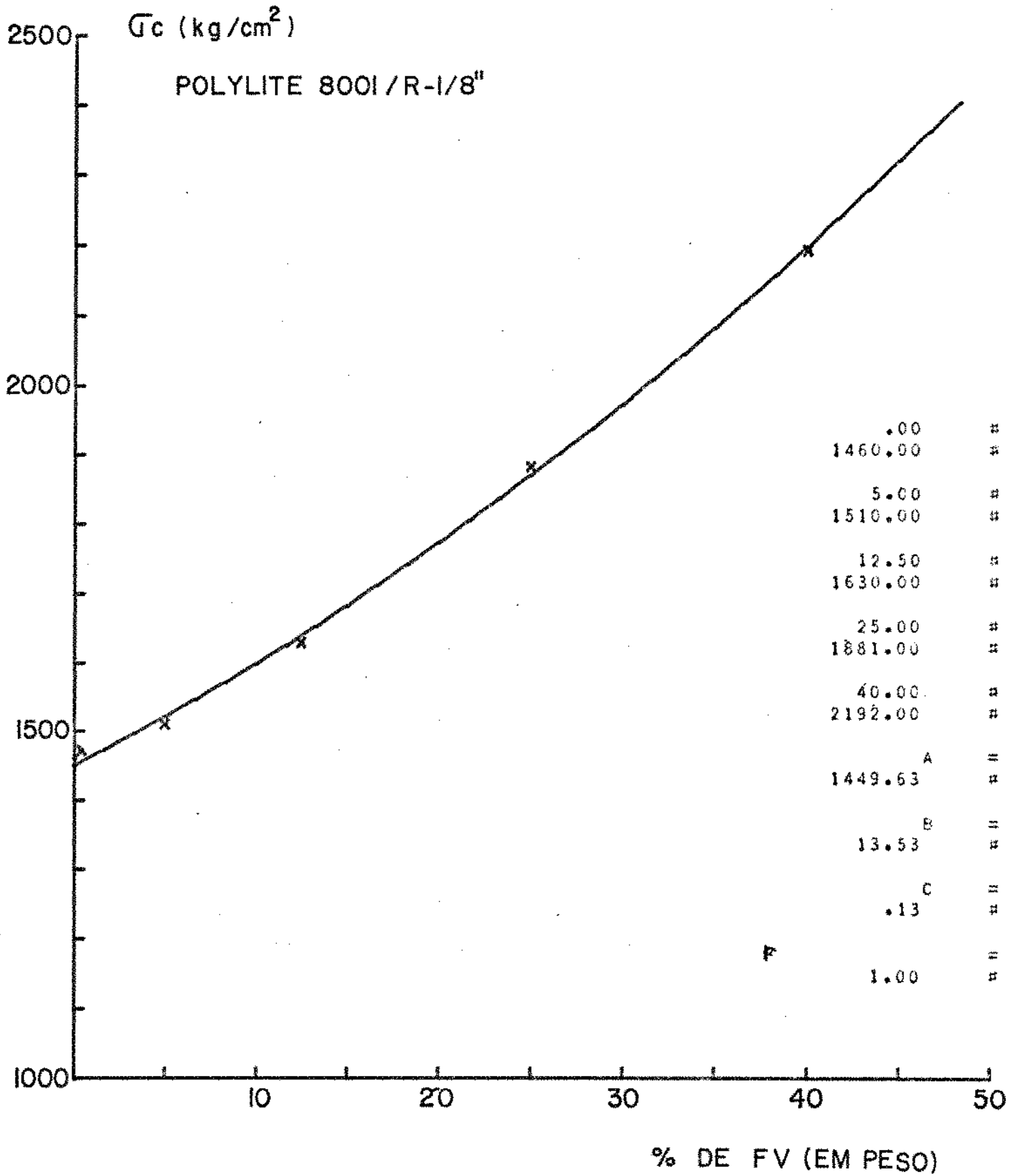
#	.00	#
#	.21	#
#	5.00	#
#	1.24	#
#	12.50	#
#	2.61	#
#	25.00	#
#	5.00	#
#	40.00	#
#	10.15	#
=	A	=
#	.41	#
#	B	#
#	.12	#
=	C	=
#	.00	#
=	F	=
#	1.00	#

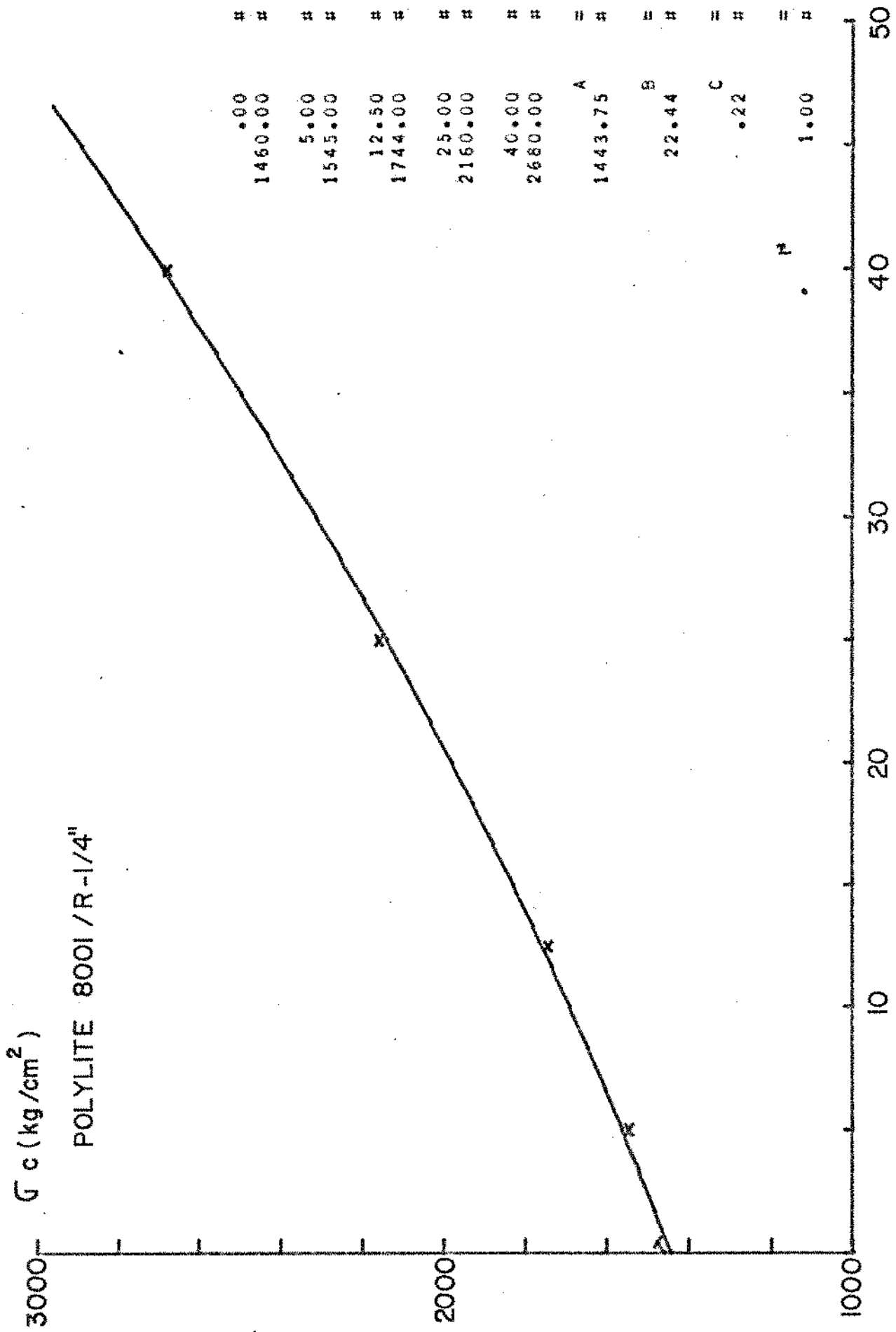


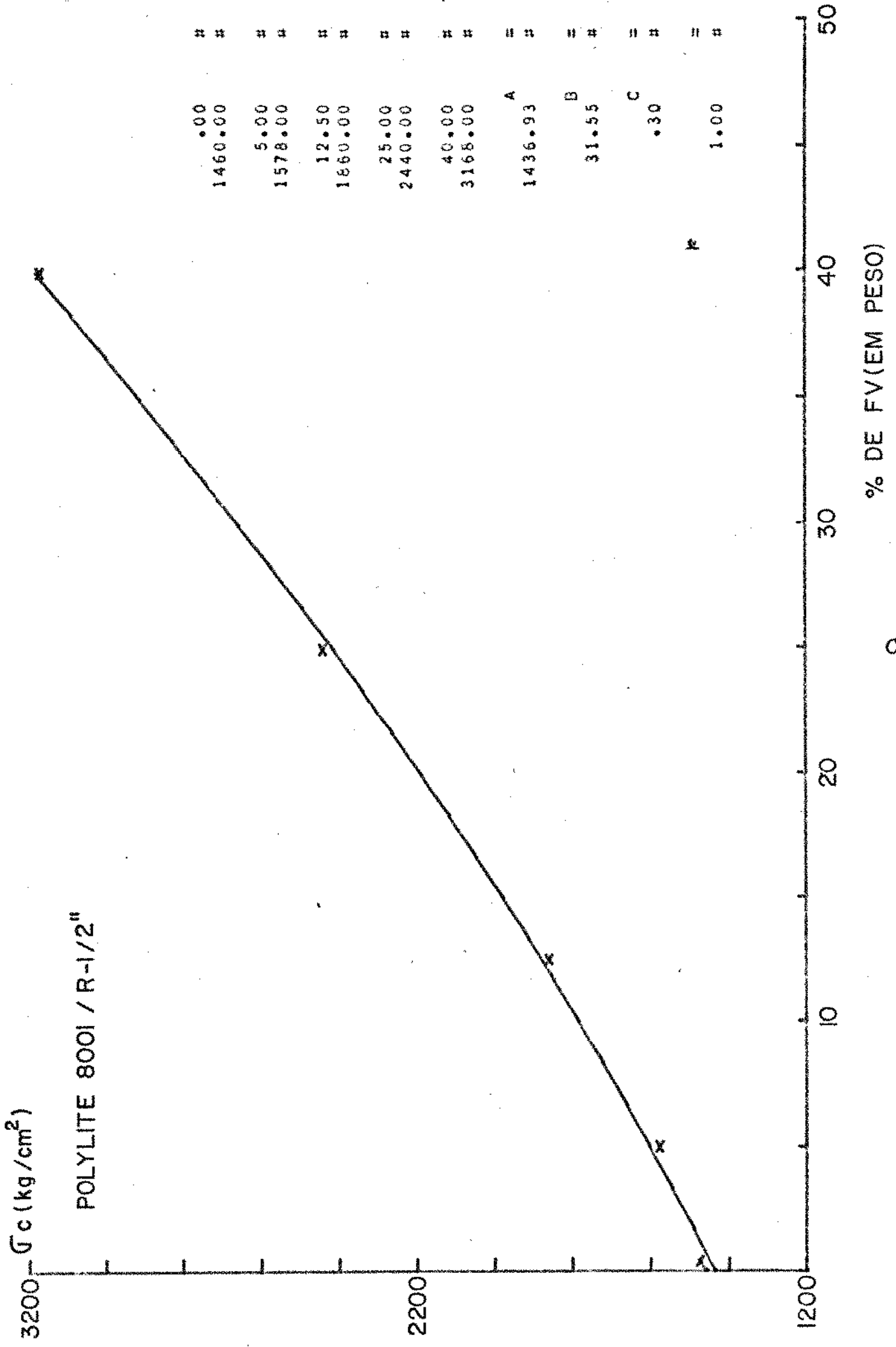




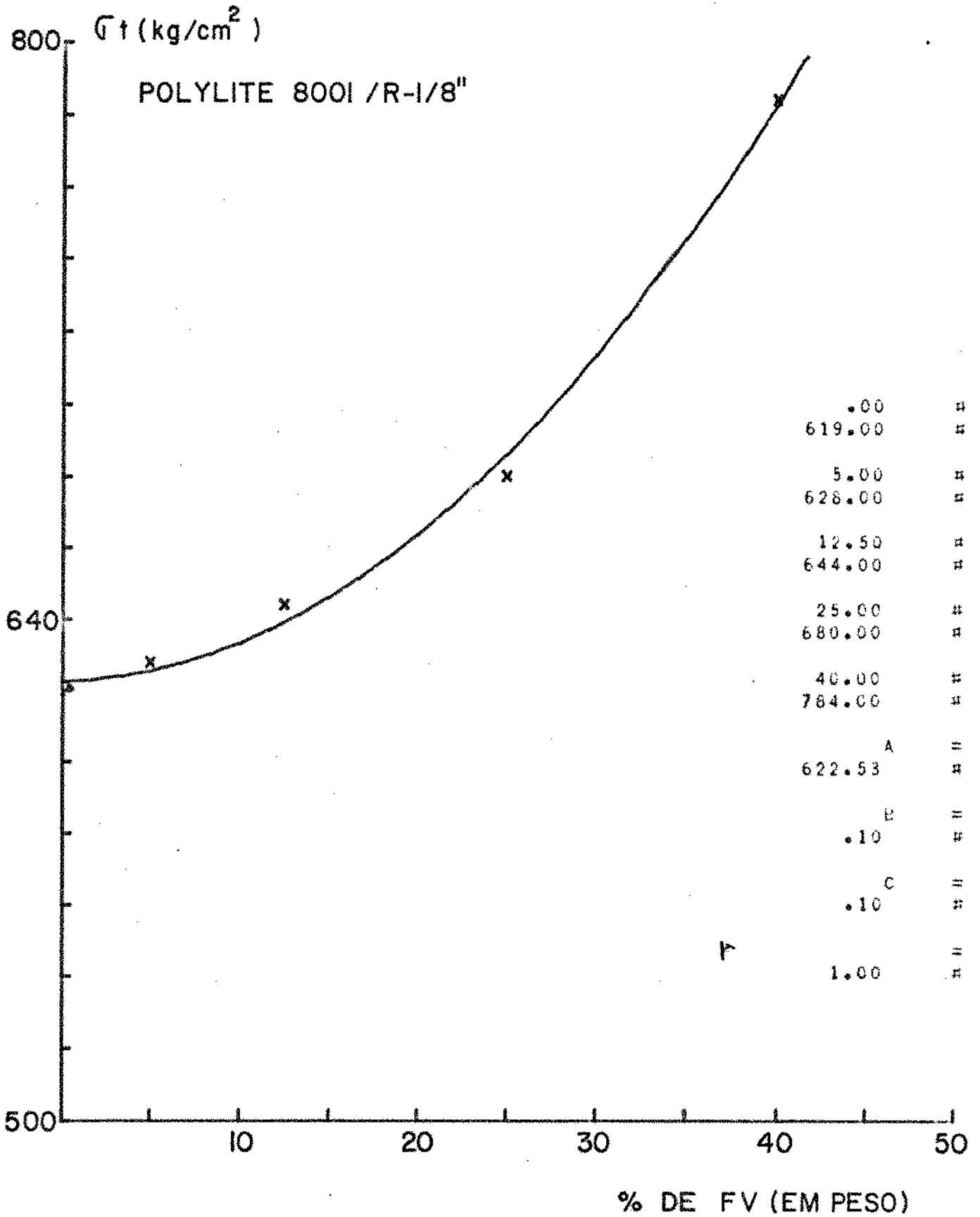
% DE FV (EM PESO)

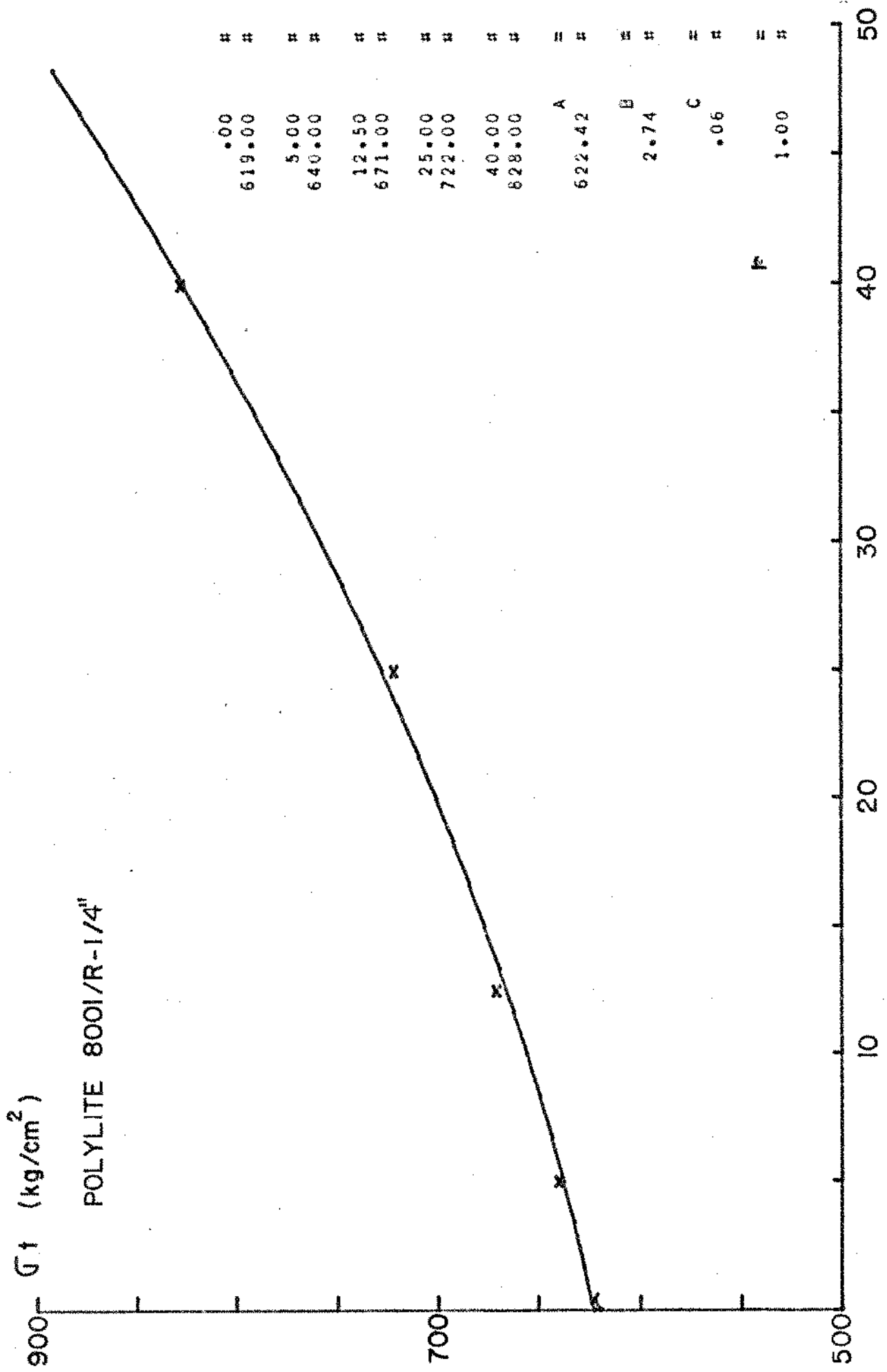






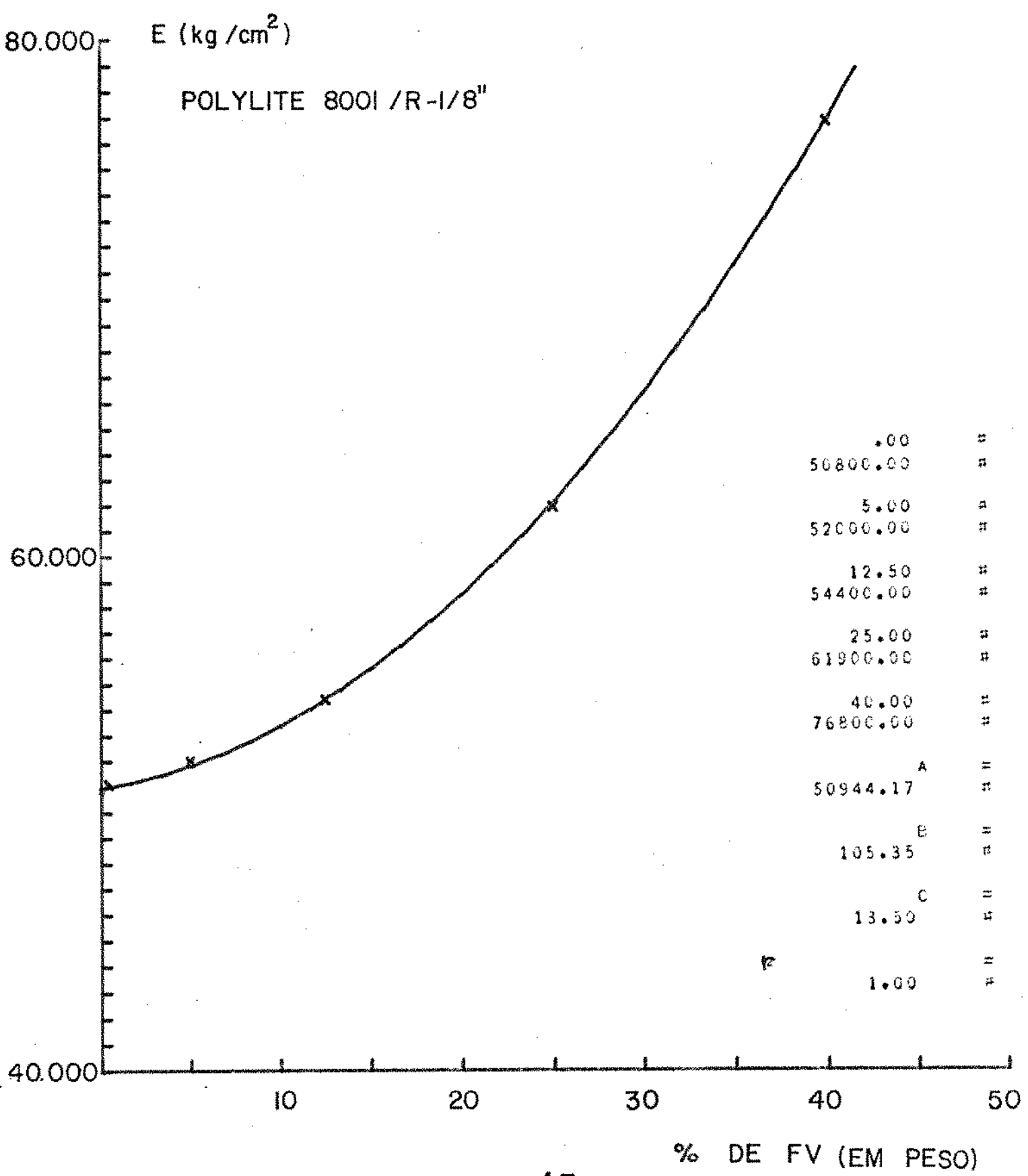


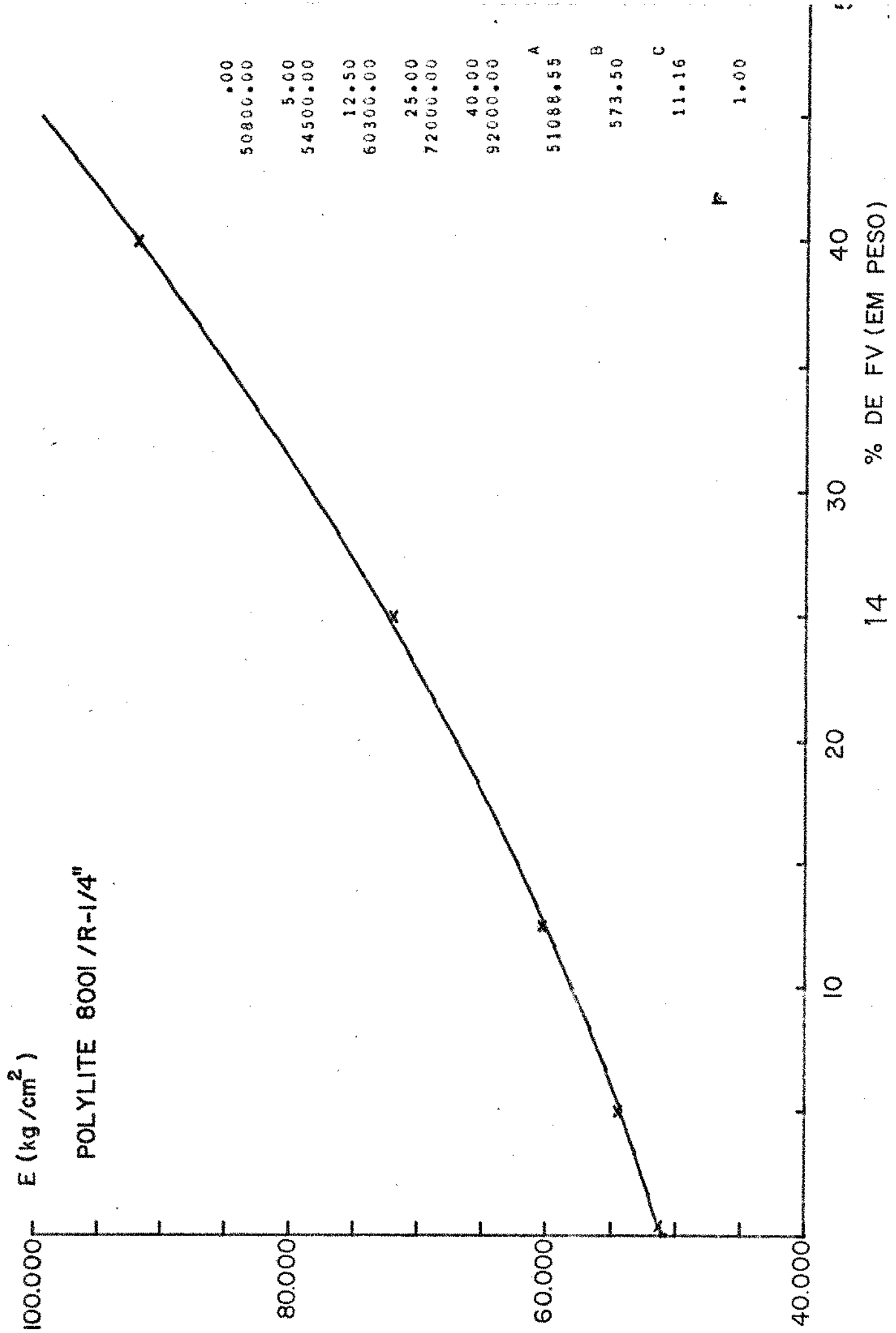




#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
.00	619.00	5.00	640.00	12.50	671.00	25.00	722.00	40.00	628.00	622.42	2.74
A		B		C		F					1.00

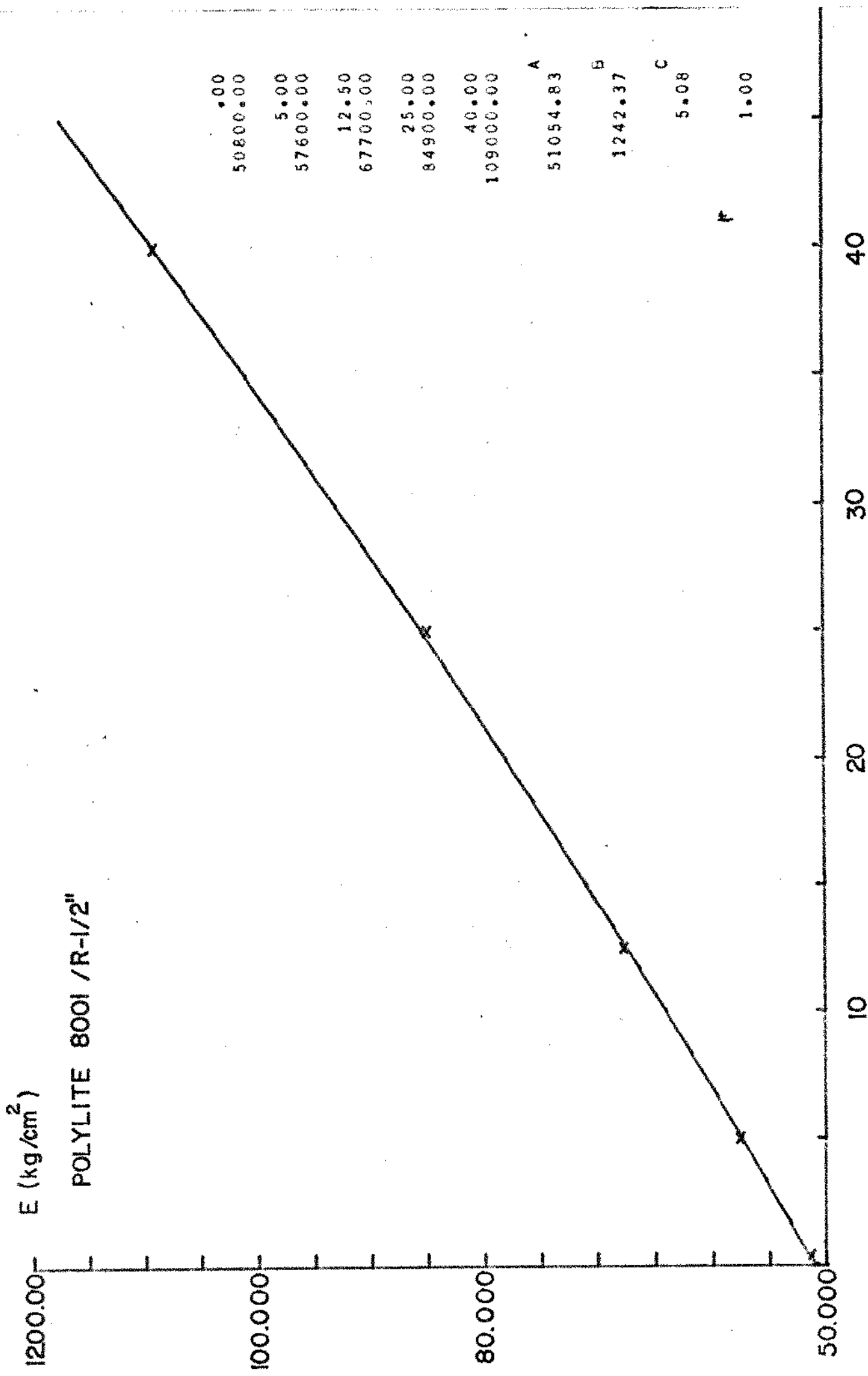






F

E (kg/cm<sup>2</sup>)  
POLYLITE 8001 / R-1/2"



50800.00  
5.00  
57600.00  
12.50  
67700.00  
25.00  
84900.00  
40.00  
109000.00  
A  
51054.83  
B  
1242.37  
C  
5.08  
F  
1.00

% DE FV (EM PESO)

## BIBLIOGRAFIA

- 1- ANDERSON, R. M. & LAVENGOOD, R. E. - Variables Affecting Strength and Modulus of Short Fiber Composites. SPE Journal, USA, 24 (3):20-6, March 1968.
- 2- BAGDA, H. E. - Influence of the size on the adhesion in GRP. Kunststoffe German Plastics, Frankfurt, 67(4):24, 1977.
- 3- BERG, H. & ASCHEN, G. - Mechanical Behaviour of Short Glass-Fibre Reinforced Thermoplastics with Various Reinforcement Degrees. SPI Reinforced Plastics Composites International Annual Conference, Washington, (5-8), Feb. 1974.
- 4- BILLMEYER Júnior, Fred W. - Textbook of Polymer Science. New York, Interscience, c1962.601p.
- 5- BLUMENTRITT, Bruce F.; VU, Ban T. & COOPER, Stuart L. - Mechanical Properties of Discontinuous Fiber Reinforced Thermoplastics - II Random-in-Plane Fiber Orientation. Polymer Engineering and Science, USA, 15(6):428-36, June 1975.
- 6- BROUTMAN, Lawrence J. - Modern Composite Materials. Massachusetts, Addison-Wesley, c1967.581p.
- 7- CHARTERS, C. A. et alii - Designing with plastics - a BMC computer air shroud. Plastic Engineering, USA, 38-9, Dec. 1976.
- 8- DARLINGTON, M. W. & MACGINLEY, P. L. - Fibre orientation distribution in short fibre-reinforced plastics. Journal of Materials Science, London, 10(5):906-10, May 1975.
- 9- D'ARSIE, Duilio - Los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio. 5<sup>a</sup> ed. Buenos Aires, Editorial Americalee, 1976.294p.

- 10- DEW-HUGHES, D. & WAY, J. L. - Fatigue of fibre-reinforced plastics: a review. Composites, Guildford, 4(4):167-73, April 1973.
- 11- DUBOIS, J. Harry & JOHN, F. W. - Plastics. 5<sup>th</sup> Ed. New York, c1974.543p.
- 12- GOLDFEIN, S. - Prediction techniques for mechanical and chemical behaviour. In: SCHMITZ, John V. - Testing of Polymers. New York, Interscience, c1965.v.4.p.121-98.
- 13- GOLDING, Brage - Applications. In:— Polymers and Resins. New York, Van Nostrand Reinhold, c1959.p.680-712.
- 14- GUMENYK, V. S.; LUSCHIK, V. V.; URBANSKII, S. V. - Effect of certain technical and geometric factors on the properties of glass-reinforced plastics. Polymer Mechanics, New York, 3(1):71-3, Jan. 1967.
- 15- KARDOS, J. L. - Ultimate properties of short-fiber reinforced plastics. S.P.E., Greenwich, USA, (7-8):104-16, Oct. 1975.
- 16- KODAMA, M. - Mechanical Dispersion of Crosslinked Polymers Reinforced with Randomly Distributed Short Fiber. Journal of Applied Polymer Science, Chicago, 20(8):2165-82, 1976.
- 17- LAVENDEL, E. E. & KALINKA, Y. A. - Interaction of a Polymer Matrix and Short Reinforcing Fibers. Polymer Mechanics, New York, 7(6):916-20, Nov-Dec. 1971.
- 18- LAWS, V.; LAWRENCE, P. & NURSE, R. W. - Reinforcement of brittle matrices by glass fibers. Journal of Applied Physics, London 6(4):523-37, April 1973.
- 19- LEWLLYN, King - Fiber-Reinforced Plastics Today. Chemical Technology, p.343, June 1976.
- 20- LUBIN, George - Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics



- Composites. New York, Van Nostrand Reinhold, c.1969.894p.
- 21- MAHLER, W. - Influence of glass particle size and shape on the processing abrasion of reinforced thermoplastics. Kunststoffe German Plastics, Frankfurt, 67(4):224-26, 1977.
- 22- MAKHARINSKII, E. G. et alii - A Method of Production of a Pelletised Thermosetting Moulding with Fibrous Filler. Soviet Plastics/RAPRA Translation, England, (4):59-62, 1973.
- 23- MANDY, F. - Glass fibre-reinforced thermoplastics - An Appraisal. Plastics and Rubber, England, 1(3):119-25, June 1976.
- 24- MANERA, M. - Elastic Properties of Randomly Oriented Short Fiber-Glass Composites. Journal of Composite Materials, USA, 11: 235-47, April 1977.
- 25- MAROM, G. & WEIMBERG, A. - The effect of the fibre critical length on the thermal expansion of composite materials. Journal of Materials Science, London, (10):1005-10, 1975.
- 26- McCURUM, N. G. - A Review of the Science of Fibre Reinforced Plastics. London, H. M. Stationery Office, 1971.139p.
- 27- McNALLY, D. & FRED, W.T. - Fiber Glass reinforcement of Poly-(Butylene Terephthalate). Society of Plastics Engineers (SPE) 32<sup>nd</sup> Annual Tech. Cof. (ANTEC), USA, 79-87, 1974.
- 28- MILES, D. C. & BRISTON, J. H. - Tecnologia dos Polímeros./Polymer Technology. Trad. Caetano Belliboni. São Paulo, Polígono, S/A 1975.561p.
- 29- MORLEY, J. & HARRIS, B. - Fracture Mechanisms of Glass-Reinforced Plastics. Journal of Materials Science, London, 10(12):2050-61, Dec. 1975.
- 30- MULLER, C. - The present state of reinforcement with glass fibers. Sprechsaal fuer Keramik, Glass, Email, Silikate, Coburg, 104 (5):193-210, May 1971.

- 31- OGORKIEWICZ, R. M. & MUCCI, P. E. R. - Influence of fillers on the stiffness and strength of a polyester resin. Journal of Materials Science, England, 10(3):393-98, 1975.
- 32- OLIVEIRA PINTO, A. R. - Torção em Barras Cilíndricas de Poliéster Reforçado. São Carlos, EESC-USP, 1972 (Tese de Doutorado)
- 33- OWENS Corning Fiberglass - Owens Corning to market new sheet moulding system. Chemical Week, Chicago, (1):9, Jul. 1975.
- 34- PARKYN, Brian - Glass Reinforced Plastics. London, Iliffe Books 1970.305p.
- 35- PEGORARO, M. et alii - Polipropilene e polipropilene innestato rinforzati con fibre di vetro. Ing. Chem. Ital., Itália, 10 (10):161-67, Outubro 1974.
- 36- Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro na Fabricação de Equipamentos Industriais Resistentes à Corrosão. São Paulo, Alba S.A. Indústrias Químicas, Junho 1975.44p.
- 37- QUÍMICA do Poliéster - Publicações Técnicas da OCFIBRAS. São Paulo, 01-20, Outubro 1975.
- 38- RAEVSKII, V. G. et alii - Effect of Fiber Length on the Strength and Fracture Properties of a Fiber-Filled Silicone Composite. Polymer Mechanics, New York, 7(3):396-99, May-June 1971.
- 39- REINFORCED Plastics - SPI. In: Plastics Engineering Handbook, 3<sup>rd</sup> Ed. New York, Van Nostrand Reinhold, c1960.p.118-35.
- 40- RESINAS Poliéster Não Saturado. Publicações Técnicas da RESANA S.A. Indústrias Químicas, São Bernardo do Campo (SP), 1977.
- 41- RICHARD, T. G. - The Mechanical Behaviour of a Solid Microsphere Filled Composite. Journal of Composite Materials, USA, 9(2): 108-13, April 1975.
- 42- RODRIGUEZ, Ferdinand - Principles of Polymer Systems. USA,

McGraw-Hill Book Co., c1970.560p.

- 43- SCHIK, J. P. - La fabrication économique de pièces de grande surface en polyester non saturé renforcé de fibres de verre par le procédé d'injection sous vide. Verre Text - Past. Renf., França, 14(4):12-7, Avril 1976.
- 44- SCHMIDT, P. - Properties of composite materials made up of chemically resistant elastomers and glass fibre reinforced, unsaturated polyester resins. Chimie et Technique, Frameries, 43(16):914-22, April 1971.
- 45- SCHWARTZ, R. T. & SCHWARTZ, H. S. - Fundamental Aspects of Fiber Reinforced Plastic Composites. New York, John Wiley & Sons, 1968.284p.
- 46- SENDECKYJ, G. P. - Mechanics of Composite Materials. New York, Academic Press, Inc., 1974.503p.
- 47- SEYMOUR, R. B. - Role of fillers and reinforcements in plastics chemistry. In:— Symposium of Organic Coatings & Plastics Chemistry. 3<sup>o</sup>, Chicago, 1973 - Anais. Chicago, ACS, 1973. p. 1-6.
- 48- THOMAS, W. F. - Factors affecting the strength of glass-fibre-reinforced polyester composites. Composites, 4(3):105-10, Mar. 1973.
- 49- TIPOS de Vidro e suas aplicações - Publicações Técnicas da OCFI BRAS. São Paulo, 1-6, Jan. 1976.
- 50- TSAI, S. W. & PAGANO, N. J. - Invariant Properties of Composite Materials. Composite Materials Workshop, USA, Technomic, p.133, 1968.
- 51- WINFIELD, A. G. & WINFIELD, B. L. - Reinforced plastics in low cost housing. In:— SAGAMORE ARMY MATERIALS RESEARCH CONFERENCE, 19<sup>o</sup>, New York, 1972 - Anais. New York, Syracuse University, 1973.

52- WOOLLEY, N. J. - DMC: a bridge in the polymer gap. Plastics,  
Paint and Rubber, 20(12):22, 23, 27, Dec. 1975.

53- WRZESIEN, A. - Improving the impact resistance of glass fibre  
composites. Composites, Guildford, 3(4):172-74, April 1972.