



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares



Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo

PROPRIEDADES DE LAMINADOS ANGLE-PLY COM DIVERSAS ORIENTAÇÕES DO REFORÇO

**GERSON MARINUCCI
EDUARDO DA SILVA LEITÃO
OSNI DE CARVALHO**

Introdução

- **Avanços tecnológicos e desenvolvimento de novos materiais.**
- **As propriedades mecânicas dos compósitos são fortemente influenciadas pela configuração, pelo tipo de reforço, bem como pela orientação**
- **Resistência e rigidez do compósito podem ser moldadas ao produto**
- **Necessário um amplo domínio da fabricação, do cálculo estrutural e das técnicas de ensaio.**

Sempre que surgem novos materiais, as primeiras interrogações geralmente colocadas são:

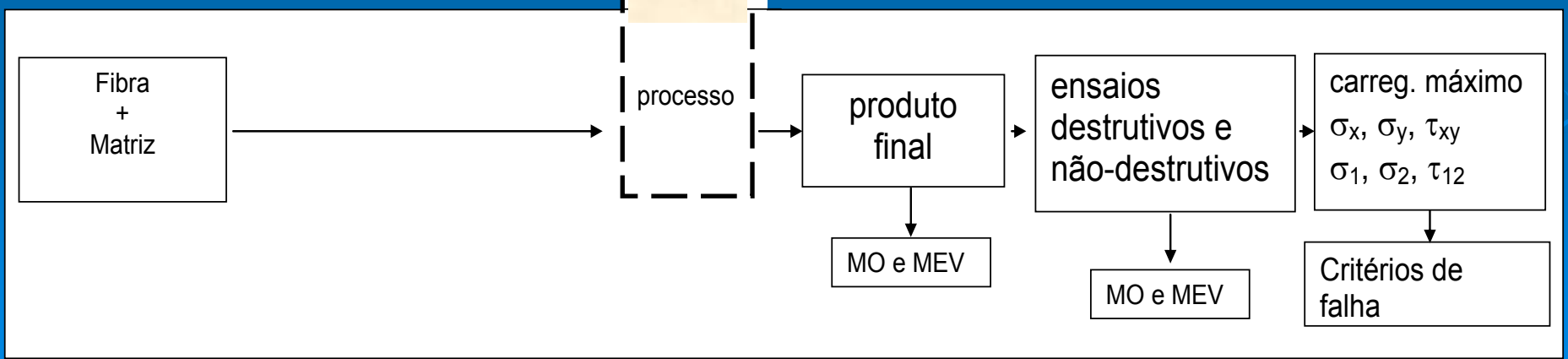
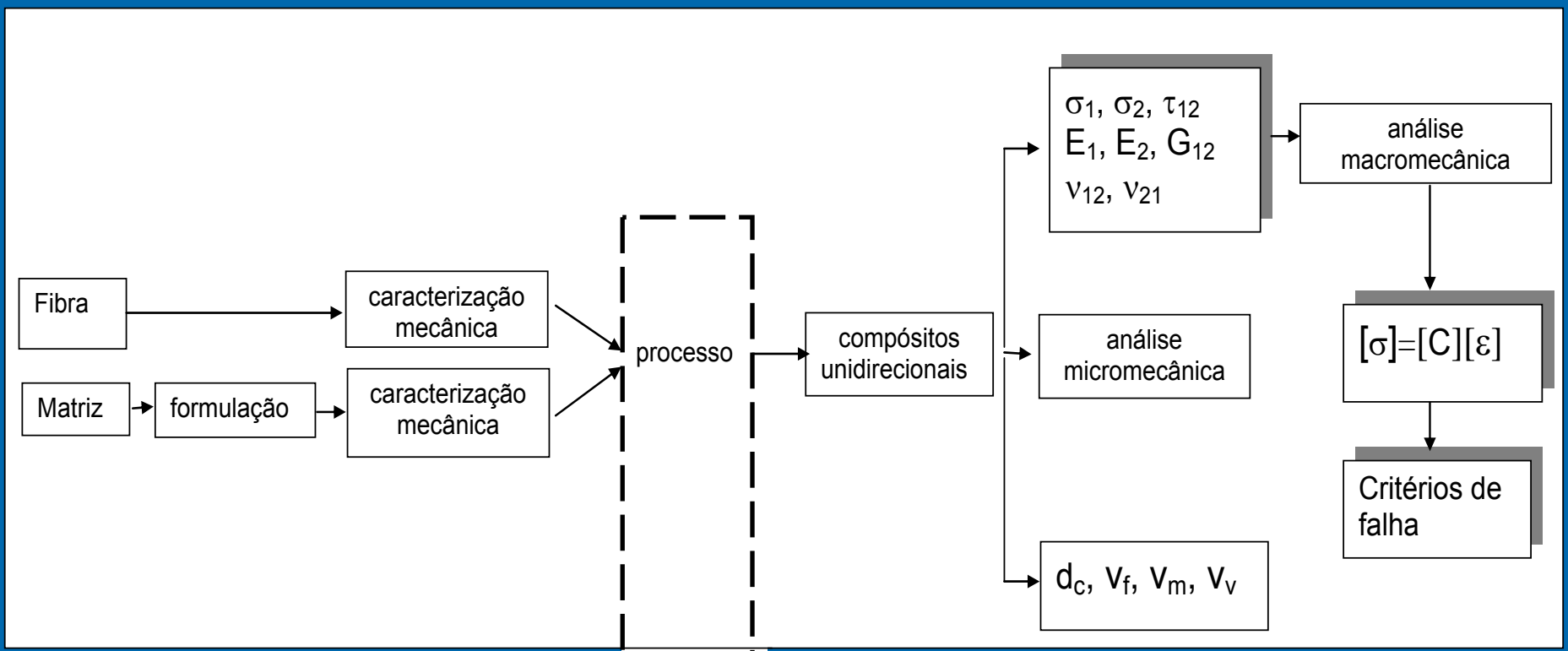
- Quais são suas propriedades?**
- São eles melhores do que os disponíveis no mercado?**

Essas perguntas assumem um papel ainda mais relevante quando se aborda os compósitos poliméricos, dada as inúmeras possibilidades de formação (construção) do material.

- **Tivemos uma infância difícil**
- **Estamos saindo da adolescência**
 - Custos**
 - Processos**
 - Matérias-primas**
 - Confiança do usuário**
- **Estamos na maturidade?**

Fonte: A. Carvalho

Encontro Internacional da ABMACO/2010



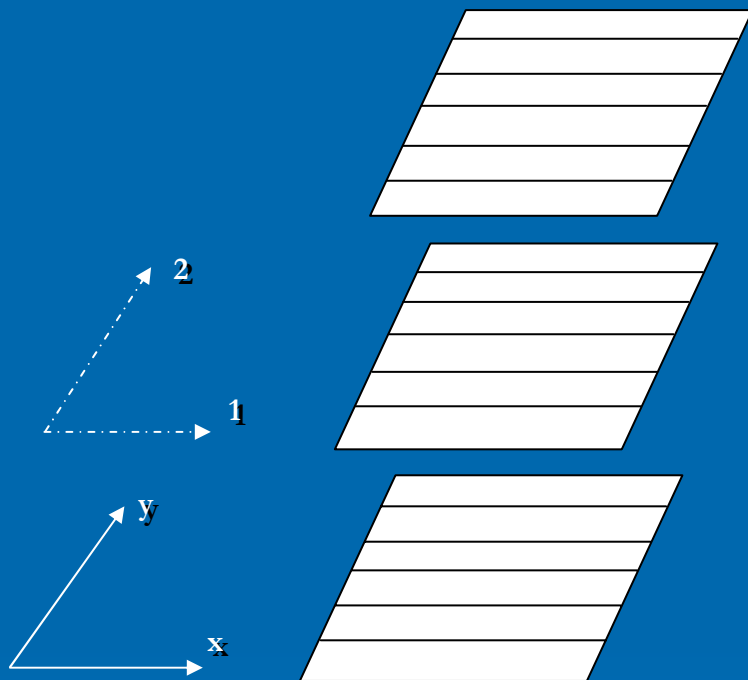


DENOMINAÇÃO DOS LAMINADOS

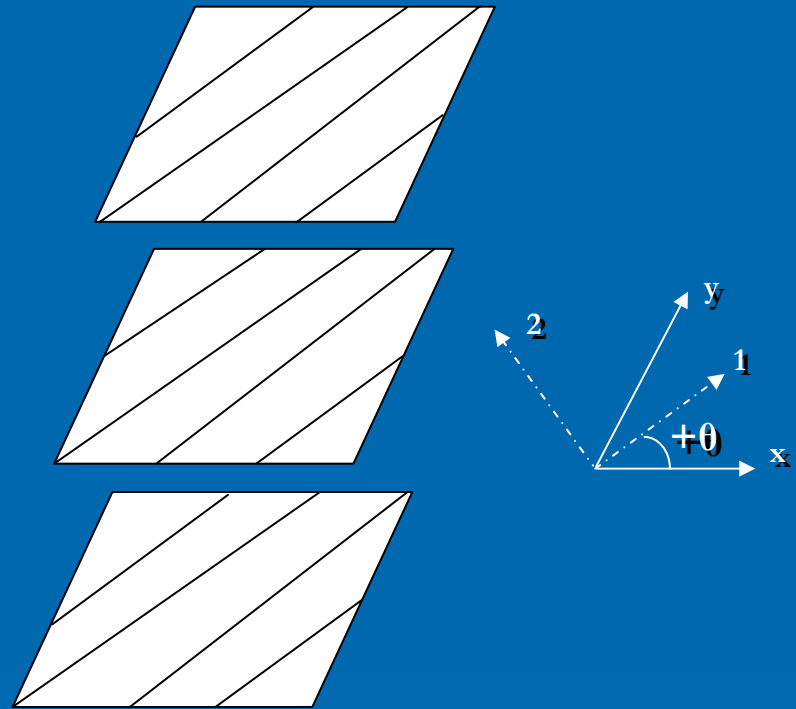
As lâminas diferem basicamente pelo tipo de reforço, orientação e pela sua disposição no laminado.

Os laminados podem ser identificados de acordo com a disposição das lâminas.

- **unidirecionais *on-axis***
- **unidirecionais *off-axis***
- ***angle-ply***
- ***cross-ply***
- **simétricos**
- **anti-simétricos**
- **assimétricos**

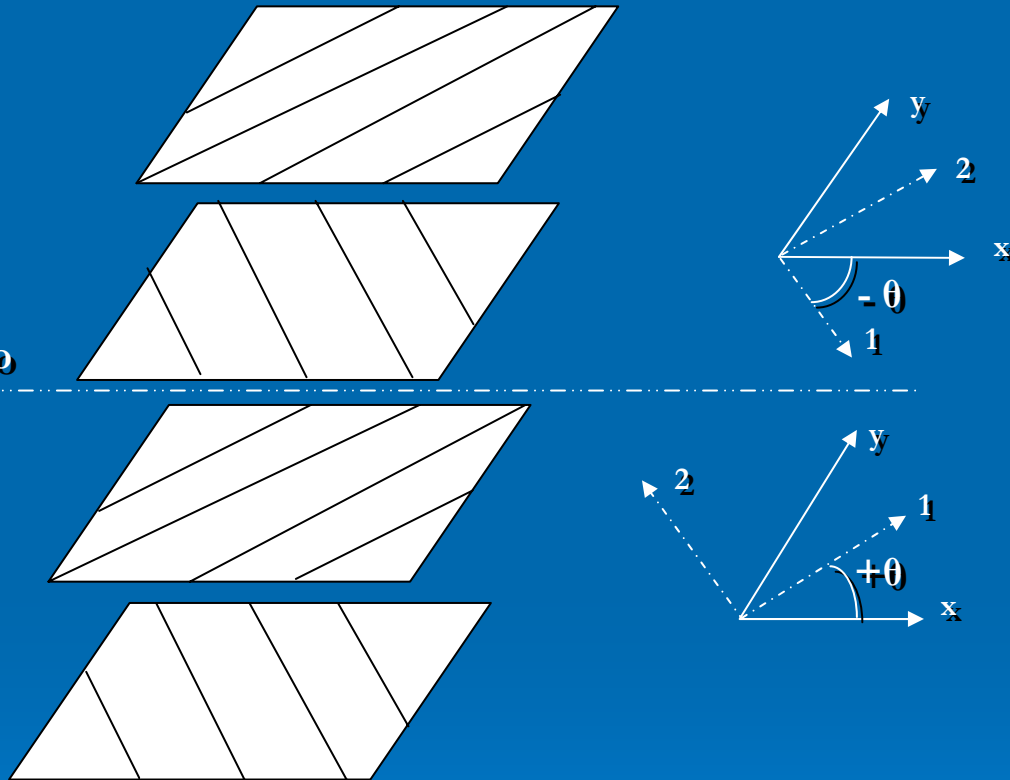


Laminado unidirecional *on-axis*

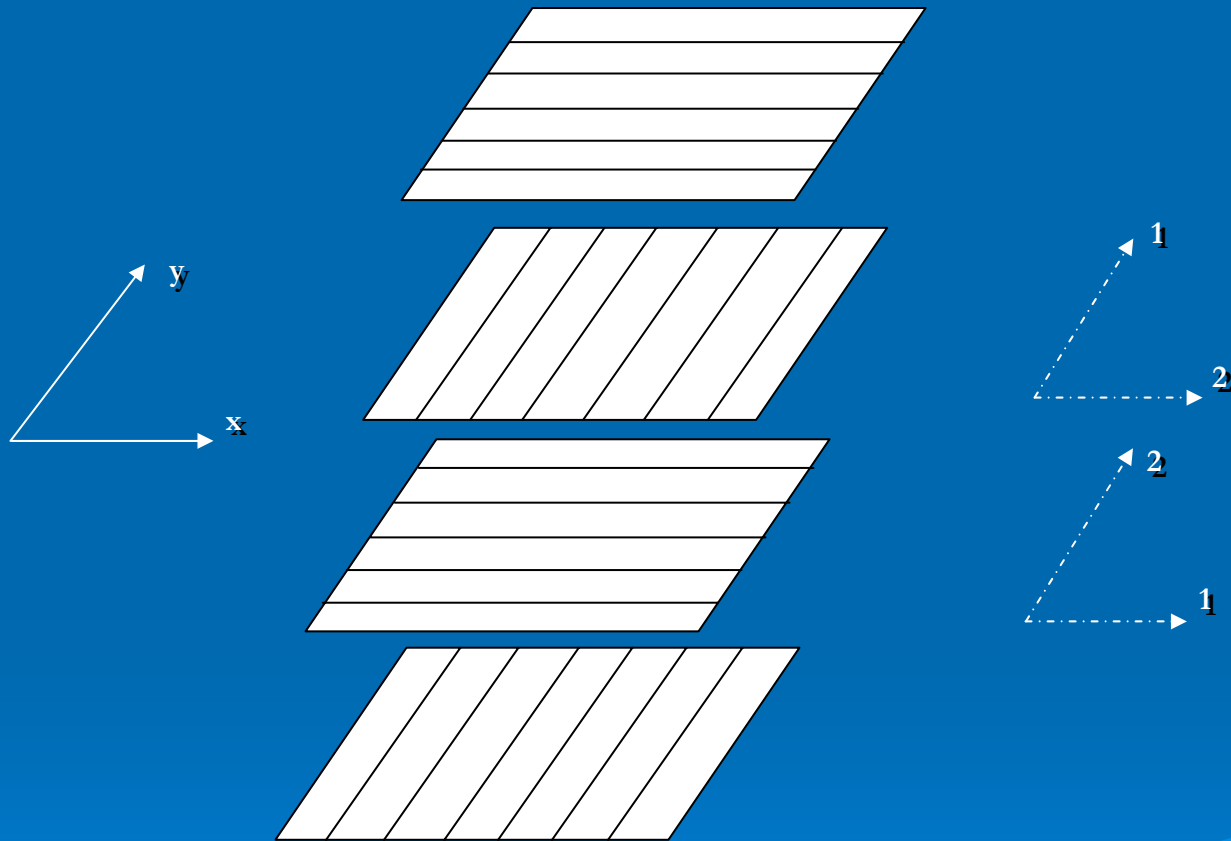


Laminado unidirecional *off-axis*

Plano médio



Laminado *angle-ply*



Laminado *cross-ply*

- Laminados simétricos

$$[+\theta_1 / -\theta_2 / -\theta_2 / +\theta_1]_T \text{ ou } [+\theta_1, -\theta_2]_S$$

$$[+30 / -45 / -45 / +30]_T \text{ ou } [+30 / -45]_S$$

- Laminados anti-simétricos

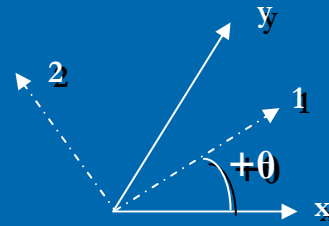
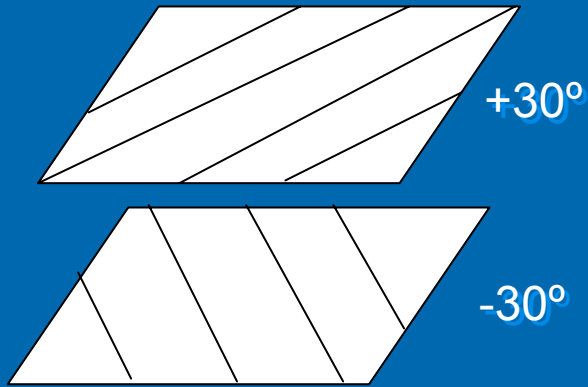
$$[+\theta_1 / -\theta_2 / +\theta_2 / -\theta_1]_T$$

$$[+30 / -45 / +45 / -30]_T$$

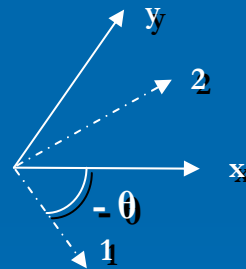
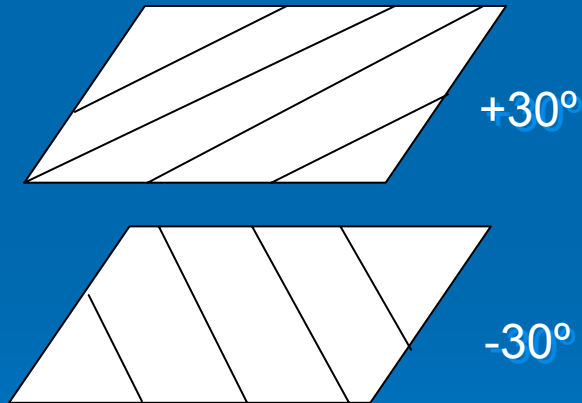
- Laminados assimétricos

$$[+\theta_1 / +\theta_2 / -\theta_2 / +\theta_1 / -\theta_2]_T$$

Laminado *angle-ply*



Plano médio



$$\begin{Bmatrix} N \\ A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

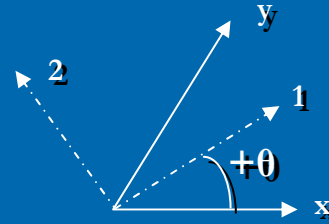
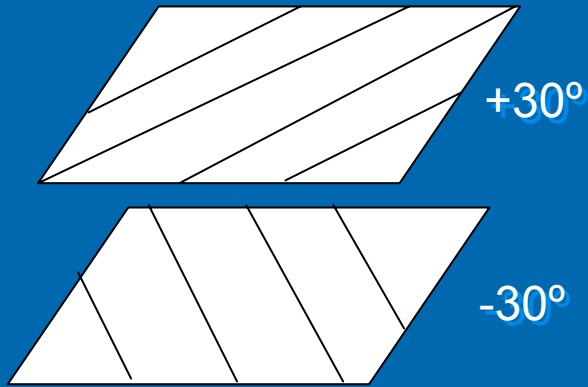
$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{ys} & B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{xs} & A_{ys} & A_{ss} & B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} \\ \hline B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} & D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} & D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{ys} & B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{xs} & A_{ys} & A_{ss} & B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} \\ B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{ys} & D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{xs} & B_{ys} & B_{ss} & D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$N_x = A_{xx}\varepsilon_x^0 + A_{xy}\varepsilon_y^0 + A_{xs}\gamma_{xy}^0 + B_{xx}\kappa_x + B_{xy}\kappa_y + B_{xs}\kappa_{xy}$$

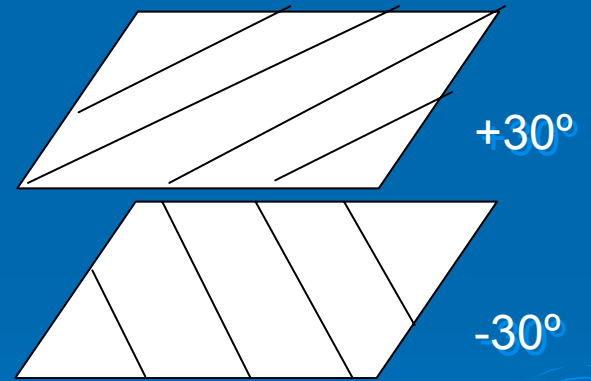
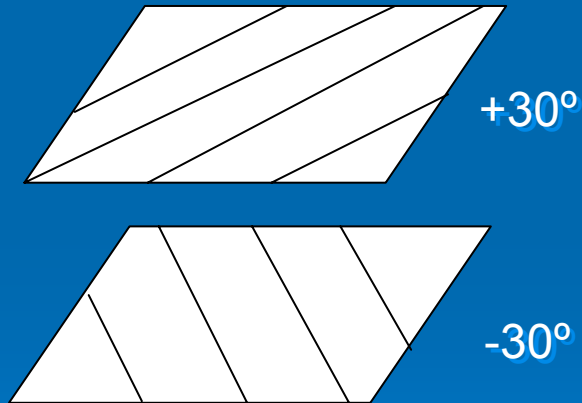
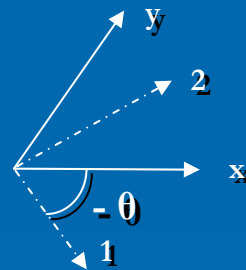
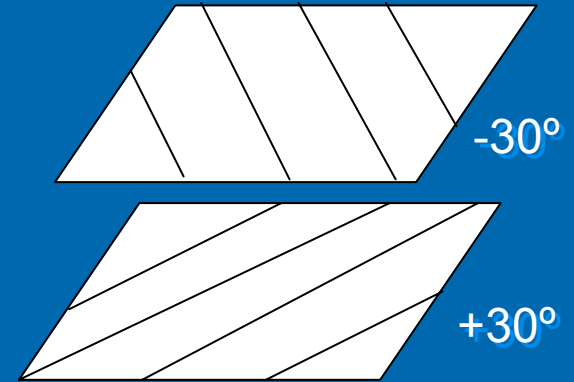
Laminado *angle-ply*

anti-simétrica



Plano médio

simétrica



$$\begin{Bmatrix} N \\ A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

simétrica

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & 0 & 0 & 0 \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{ys} & 0 & 0 & 0 \\ A_{xs} & A_{ys} & A_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ 0 & 0 & 0 & D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ 0 & 0 & 0 & D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$N_x = A_{xx}\varepsilon_x^0 + A_{xy}\varepsilon_y^0 + A_{xs}\gamma_{xy}^0 + 0k_x + 0k_y + 0k_{xy}$$

$$N_x = A_{xx}\varepsilon_x^0 + A_{xy}\varepsilon_y^0 + A_{xs}\gamma_{xy}^0$$

MATERIAIS E MÉTODOS

MATRIZ POLIMÉRICA

- **Classificação dos polímeros em termoplásticos e termofixos**
- **Ligações cruzadas levam ao aumento da rigidez**
- **A resina epóxi é um exemplo de polímero termofixo, possui grande aplicação em compósitos estruturais. Essa resina foi utilizada no presente estudo**
- **A matriz polimérica foi formulada com resina epóxi DGEBA, endurecedor anidrido ácido e acelerador**

FIBRAS

Vários materiais podem ser utilizados como reforço em compósitos poliméricos.

Fibras de vidro: E, S, AR, ECR

Fibras de carbono: HS (HT) , IM, HM

Fibra Aramida

Propriedades mecânicas e propriedades específicas dos principais materiais de engenharia

MATERIAL	ρ (g/cm ³)	σ (MPa)	$\frac{\sigma}{\rho}$	E (GPa)	$\frac{E}{\rho}$
aço (maraging 300)	7,80	1800	231	200	26
alumínio	2,63	620	236	73	28
berílio	1,82	1700	934	300	165
titânio	4,61	1900	412	115	25
f. vidro-E	2,54	3400	1339	72	28
f. vidro-S	2,48	4800	1935	86	35
f. carb.-HM	1,79	2350	1313	358	202
f. carb.-HS	1,77	3950	2232	238	134
aramida	1,44	2730	1896	62	43
aramida HM	1,44	2730	1896	117	81
peróba	0,66	455	688	94	142



Fibra de carbono T300

Densidade	1,77 g/cm ³
Módulo de elasticidade	238 GPa
Resistência à tração	3400 MPa
Diâmetro do filamento	7 µm
Nº. de filamentos	6000
Densidade linear/Título	400 tex



Fibra de vidro tipo E

Densidade	2,60 g/cm ³
Módulo de elasticidade	73 GPa
Resistência à tração	2400 MPa
Diâmetro do filamento	9 µm
Nº. de filamentos	2000
Densidade linear/Título	1100 tex



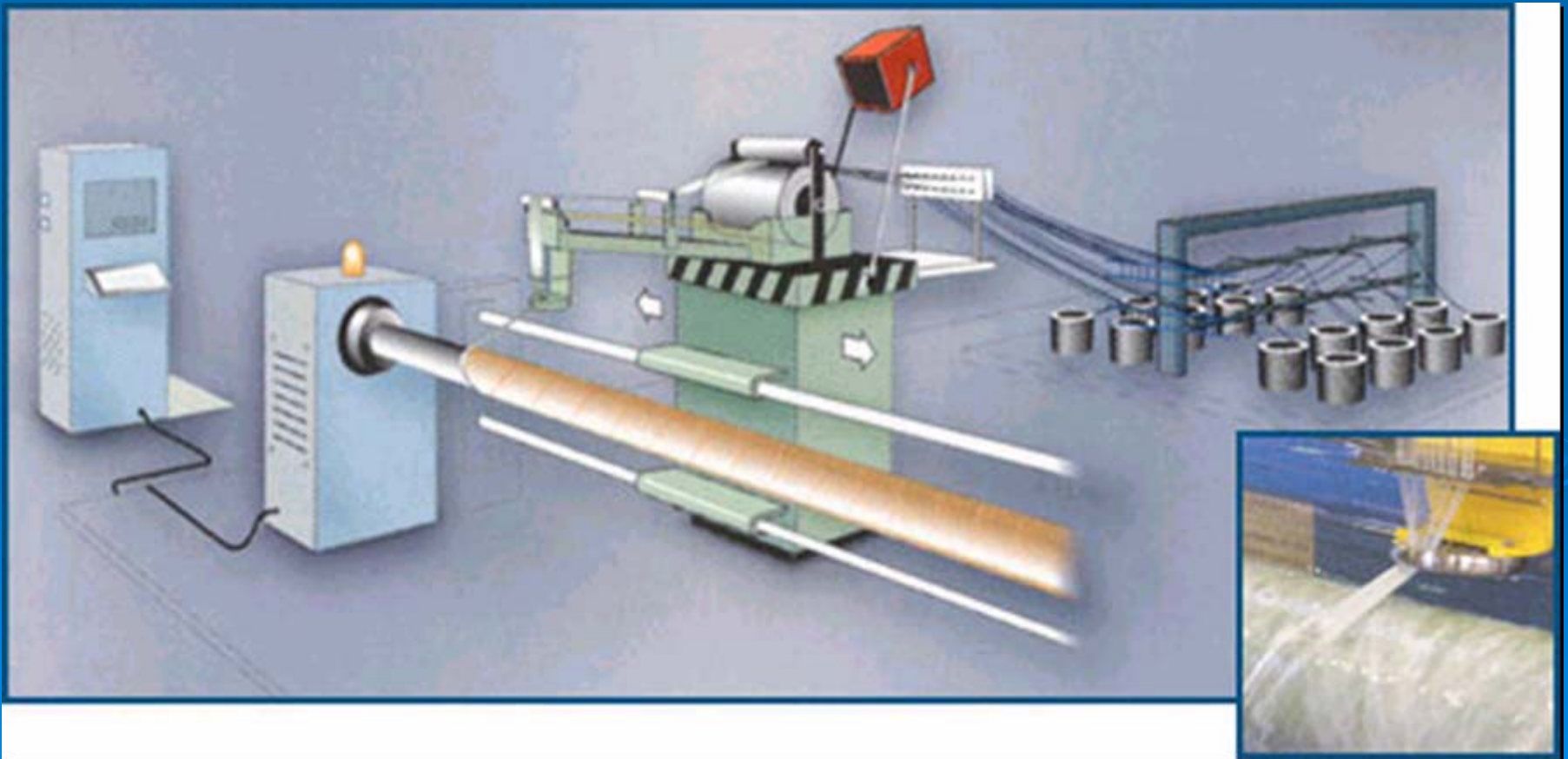
**Qual o processo que deveria ser escolhido
para a fabricação dos corpos-de-prova**

Wet lay-up

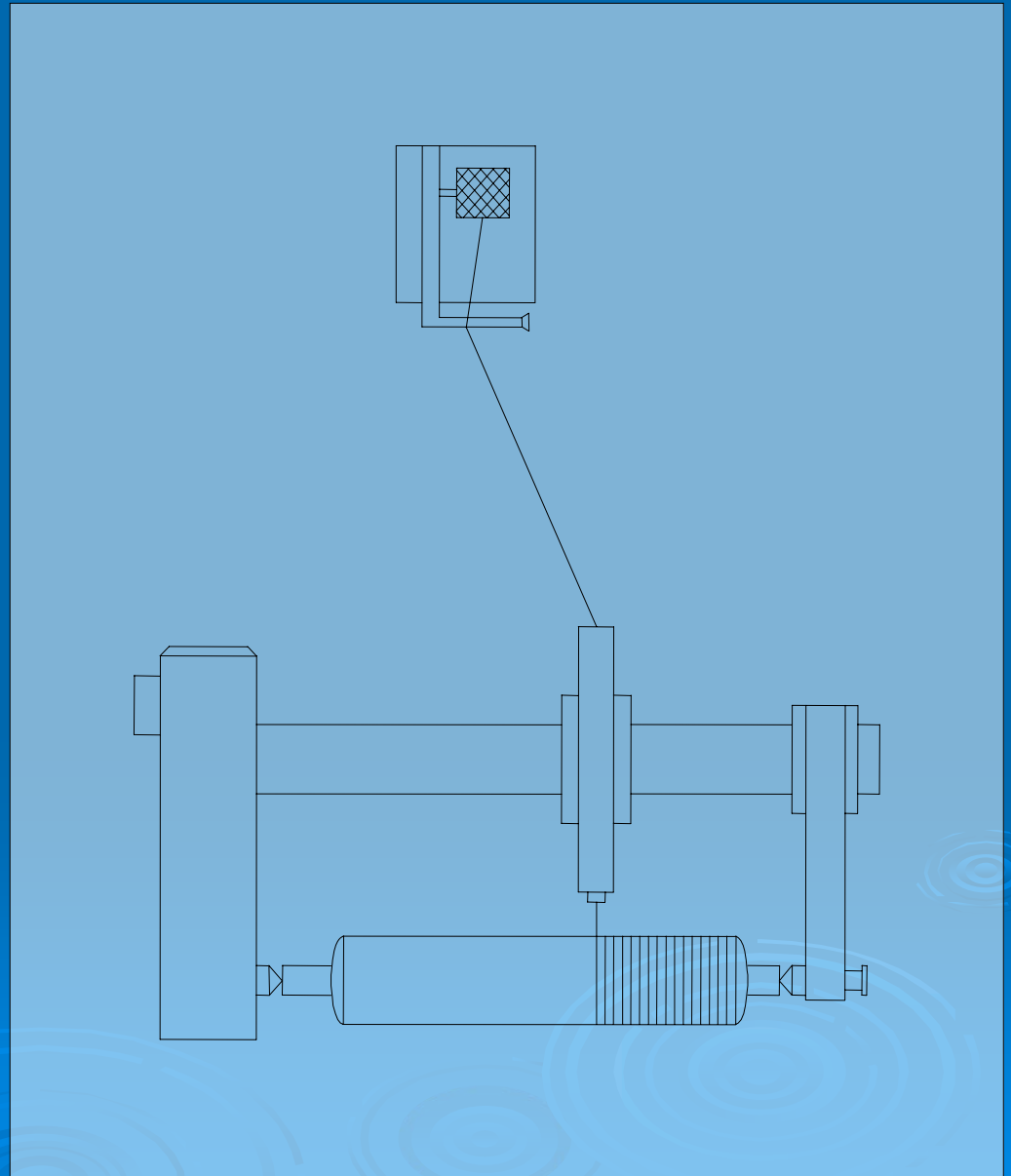
Dry lay-up

ENROLAMENTO FILAMENTAR

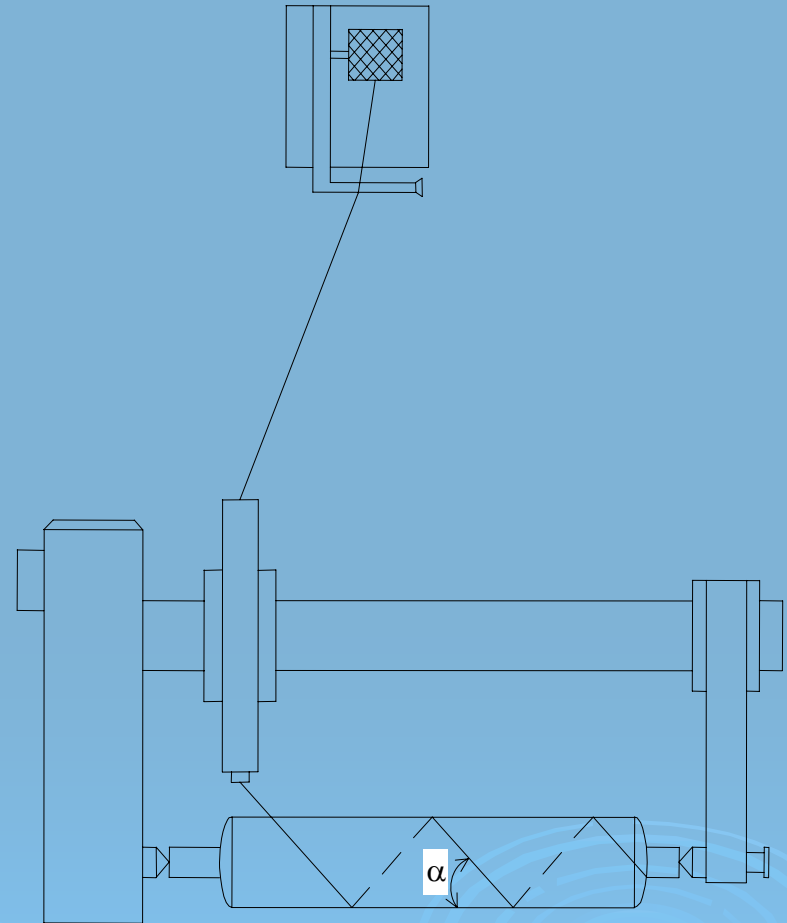
- É um eficiente método de fabricação, sendo normalmente utilizado na fabricação de tubos e estruturas cilíndricas

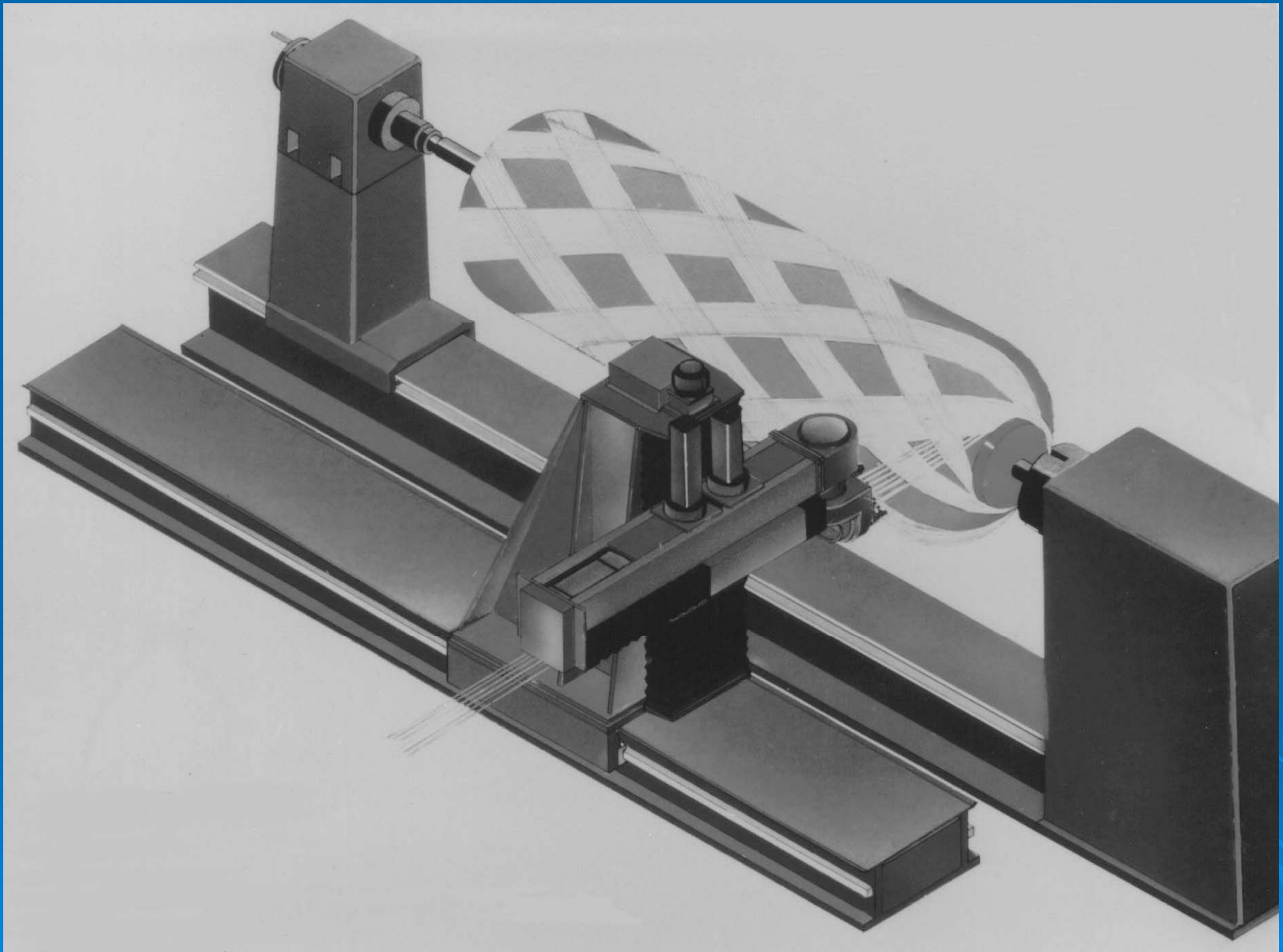


ENROLAMENTO/BOBINAMENTO CIRCUNFERENCIAL



ENROLAMENTO/BOBINAMENTO HELICOIDAL





Fonte: Josef Baer Maschinenfabrik

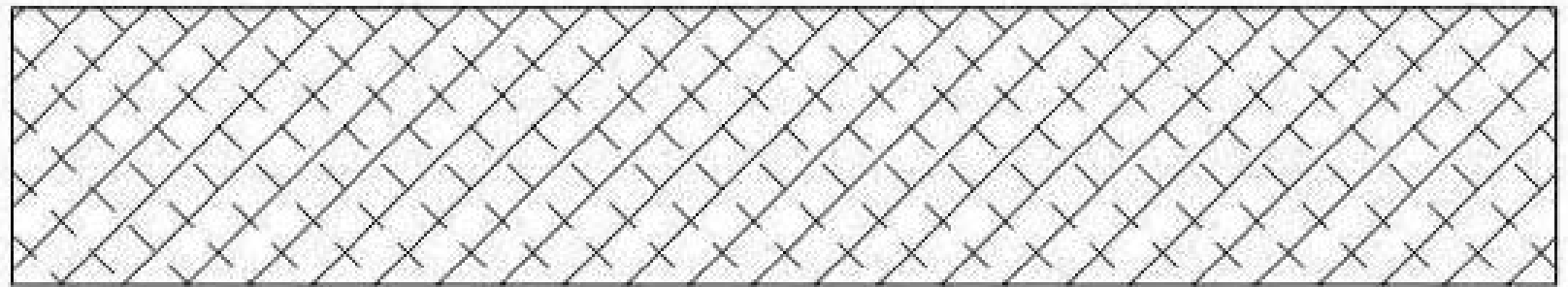
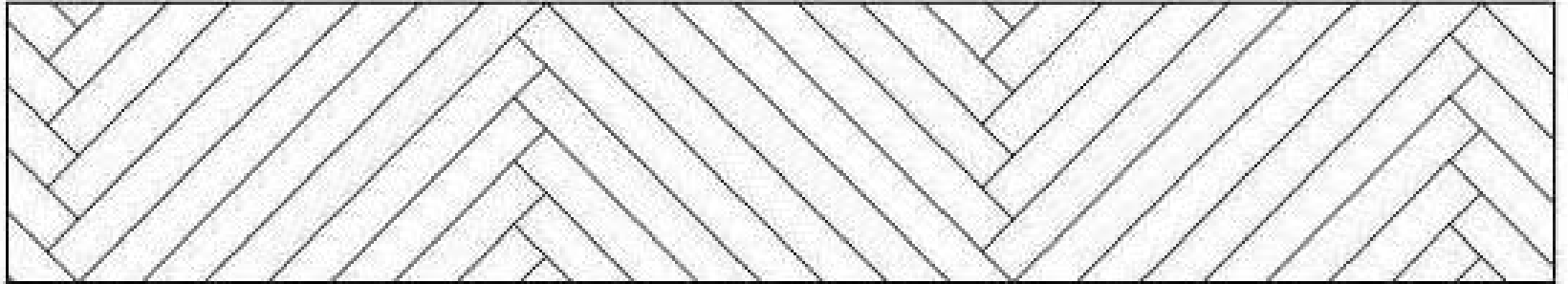
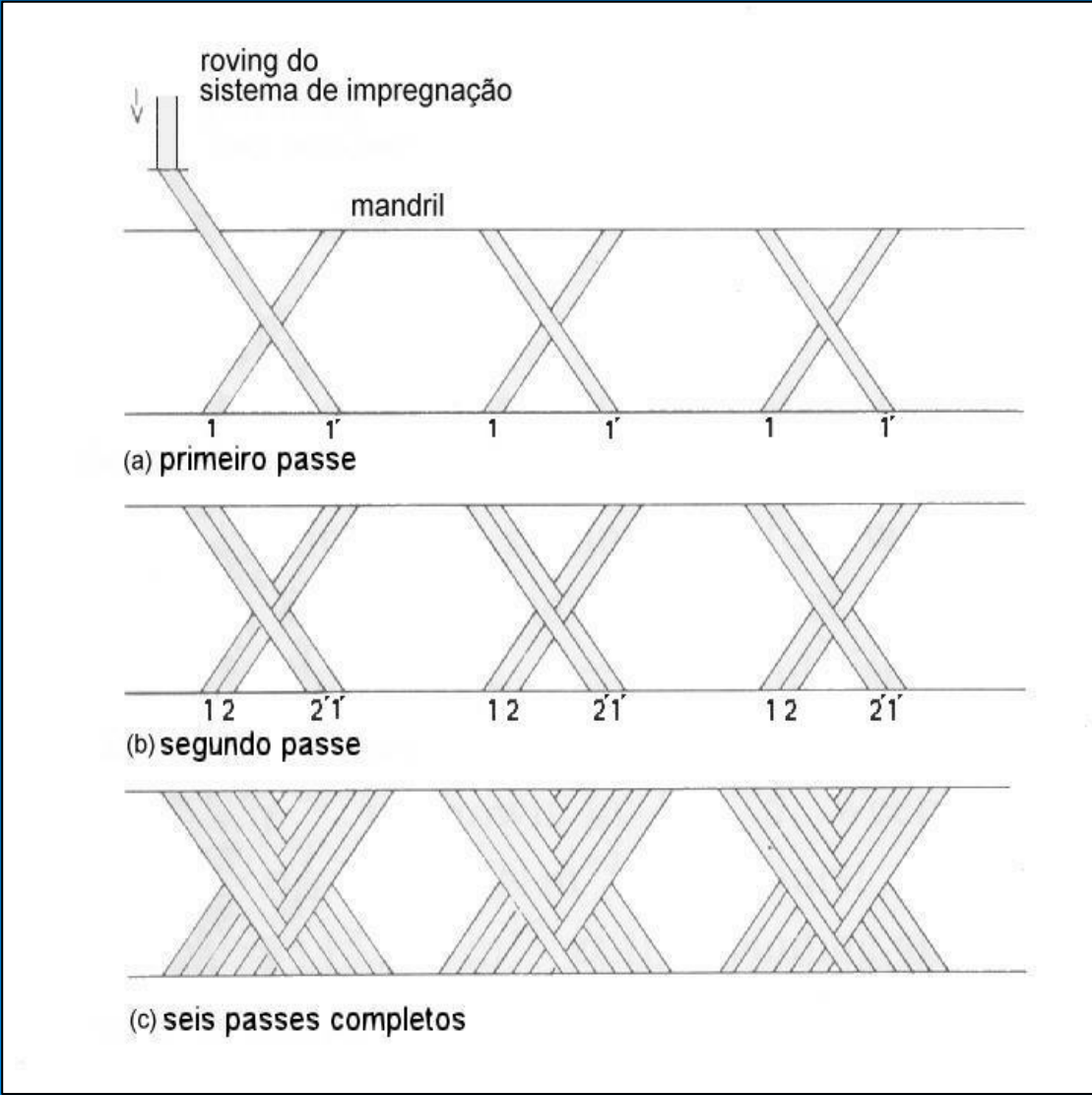
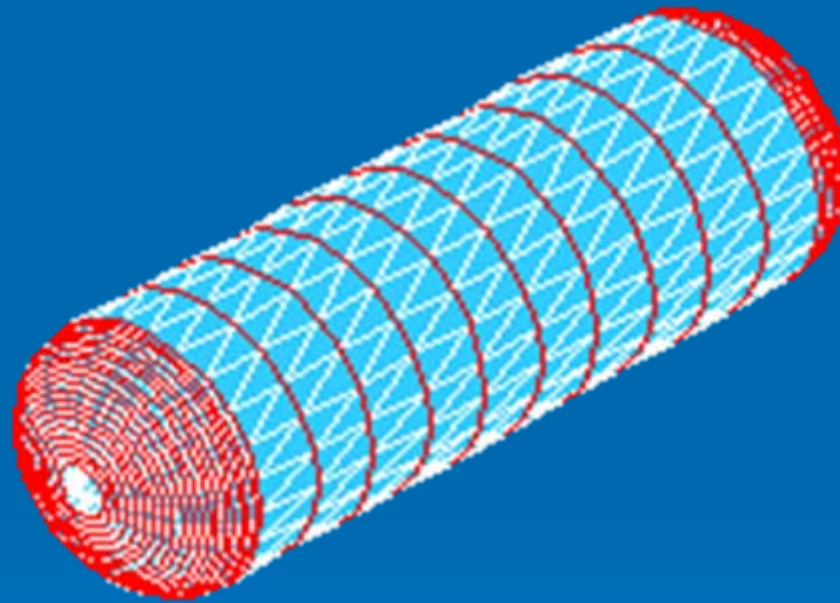
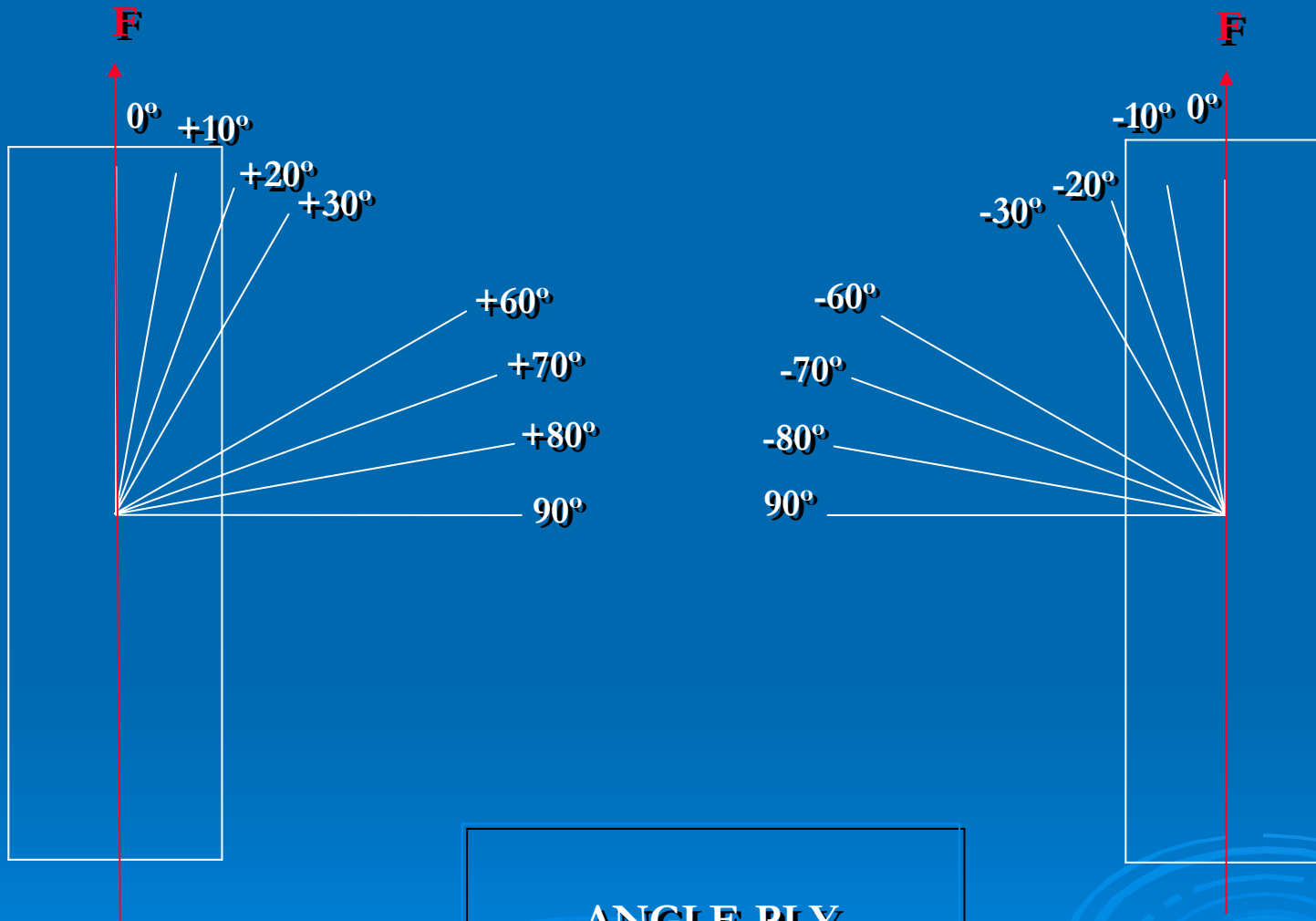


Ilustração da bobinagem cruzada (*interweaving*)



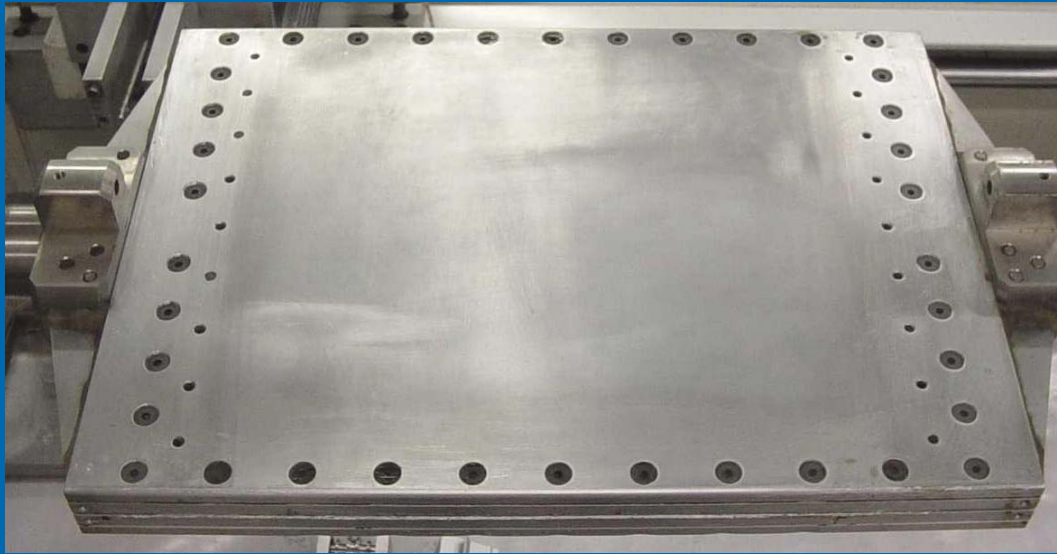


Corpos-de-prova obtidos de placas de acordo com a ASTM 3039

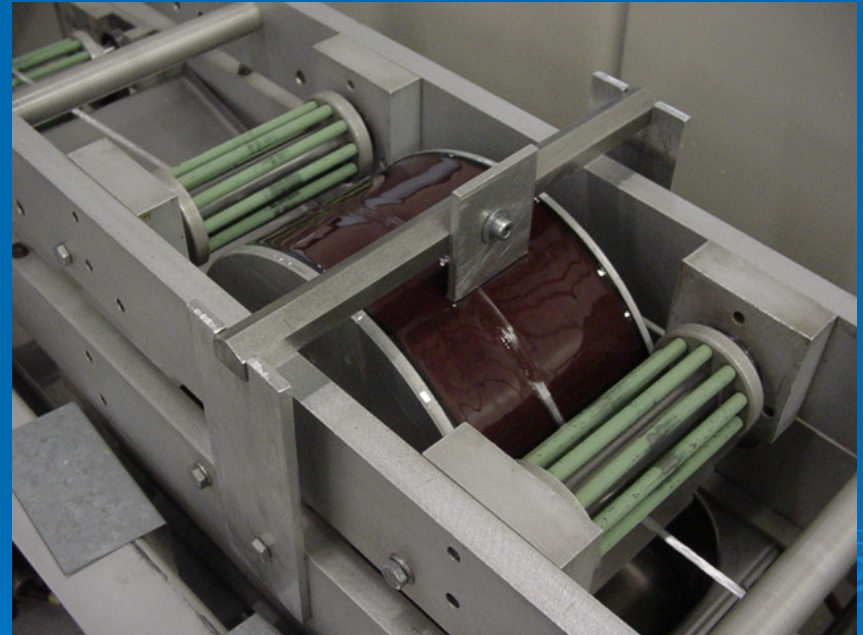
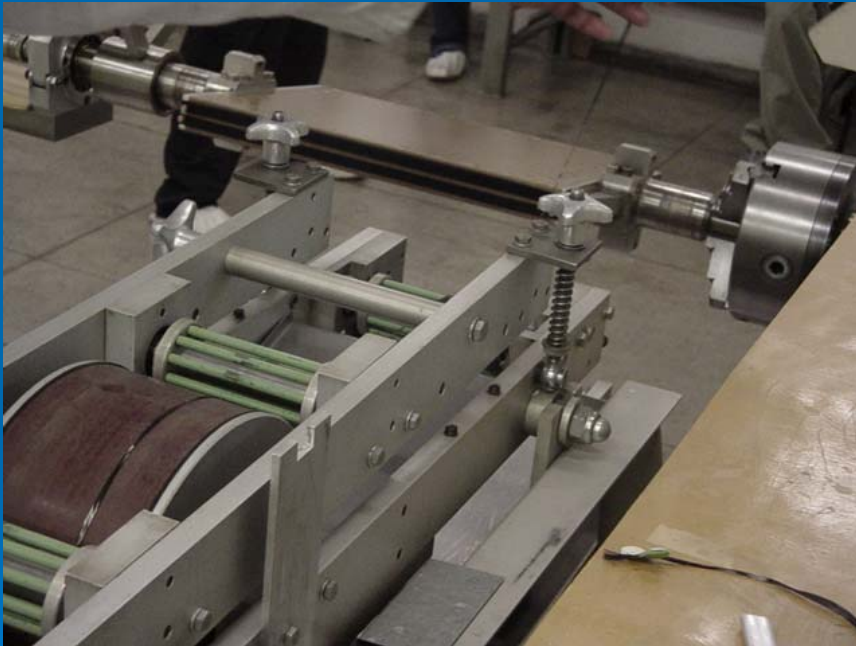


ANGLE-PLY

Um dos desafios do trabalho foi fabricar placas *angle-ply* pelo método de enrolamento filamentar formando camadas sem a presença de domos

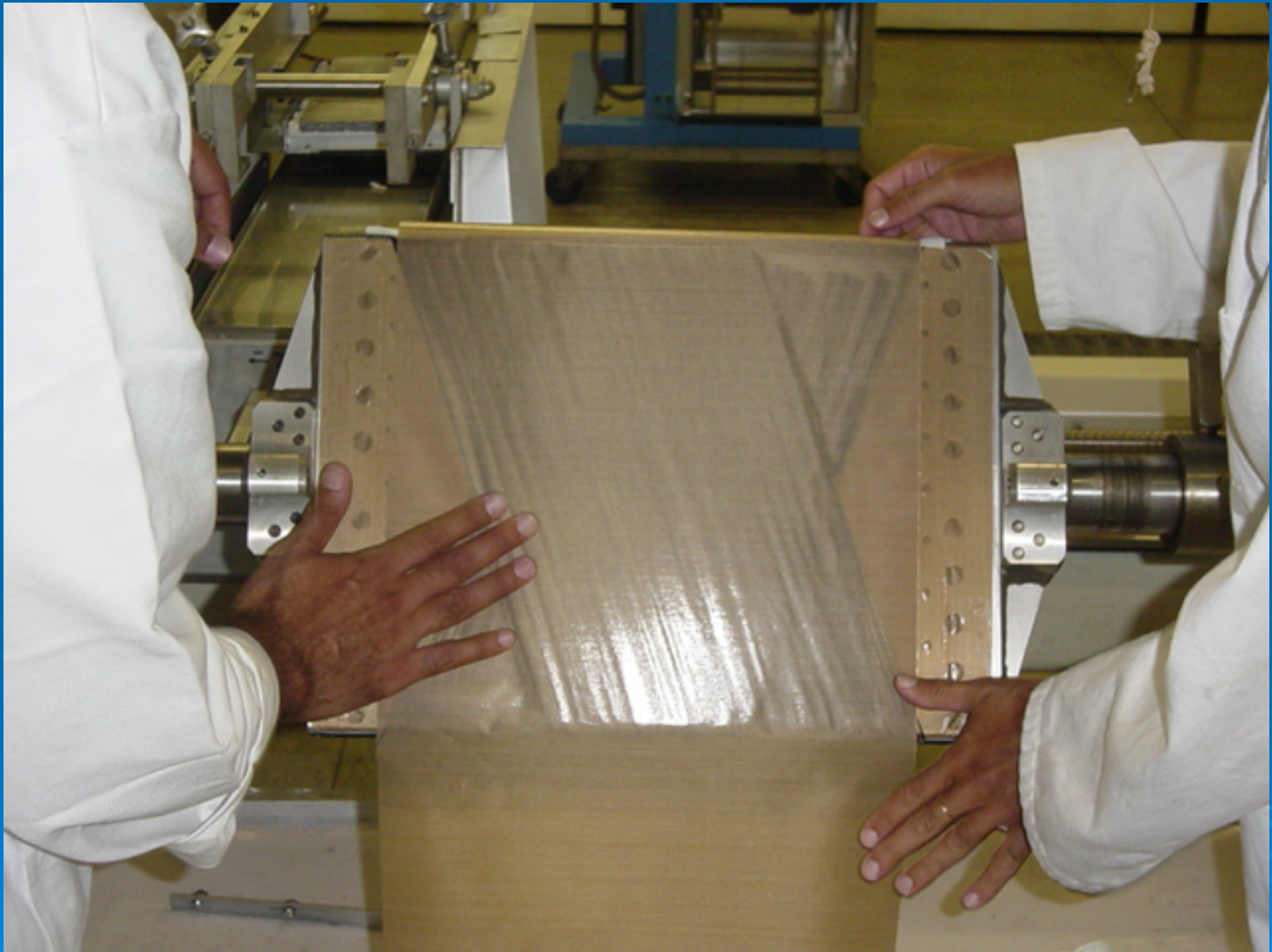


Fabricação dos compósitos

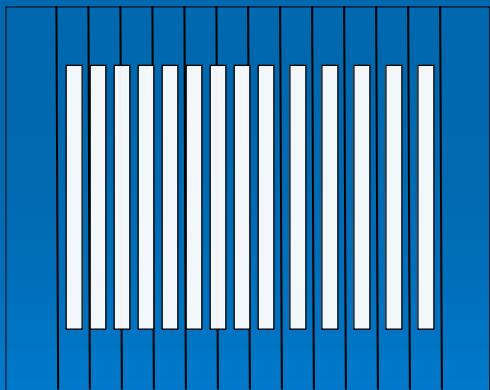
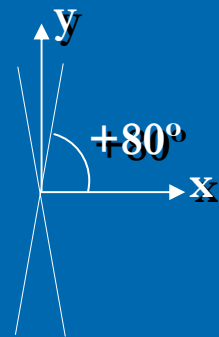
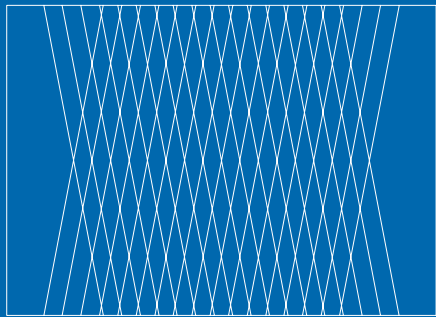




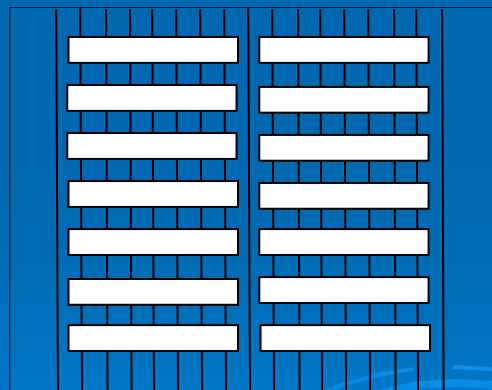




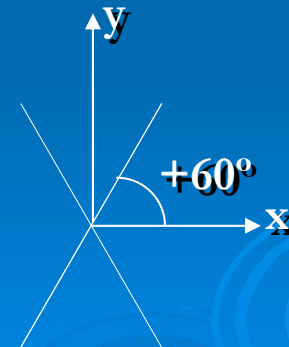
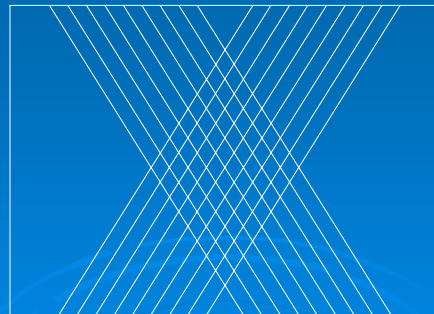
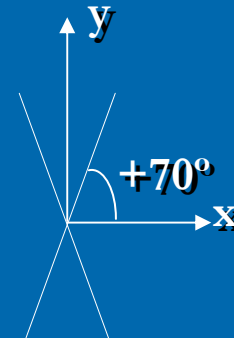
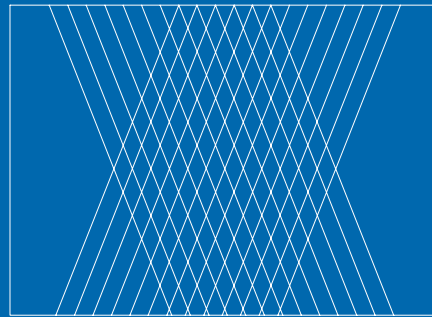
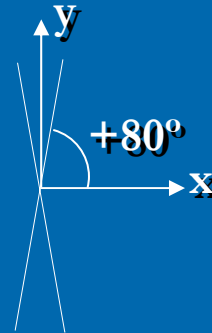
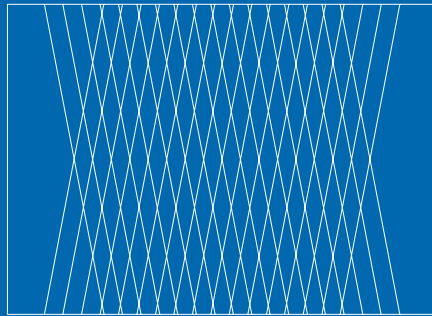


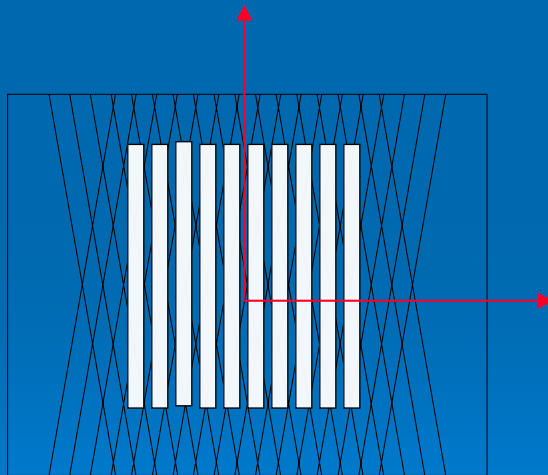
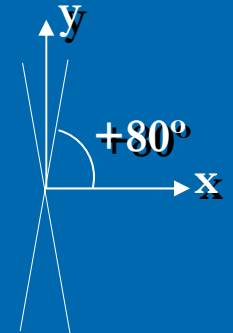
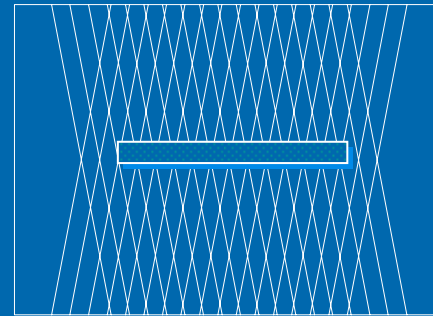
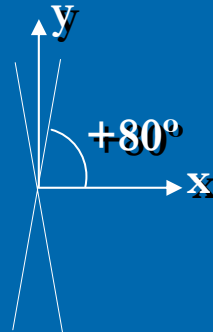
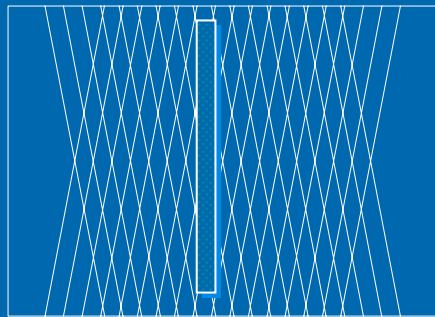


0°

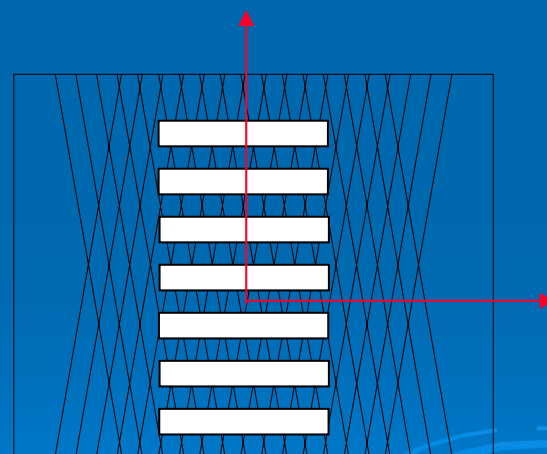


90°

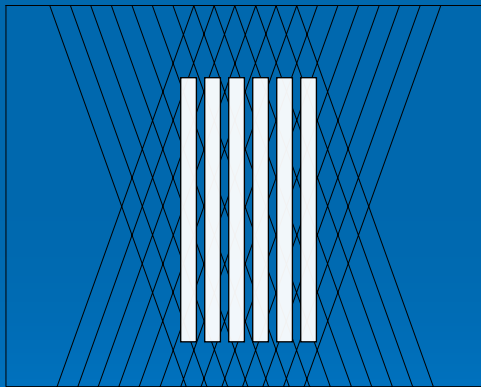
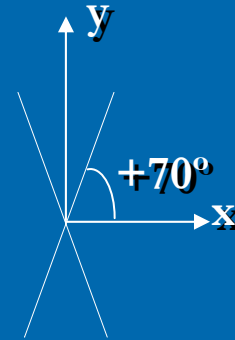
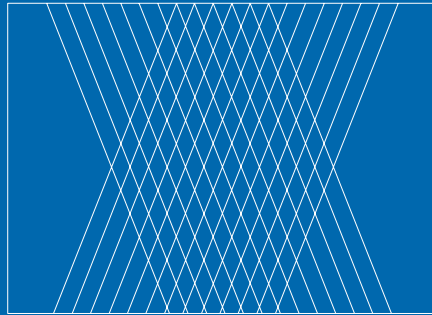




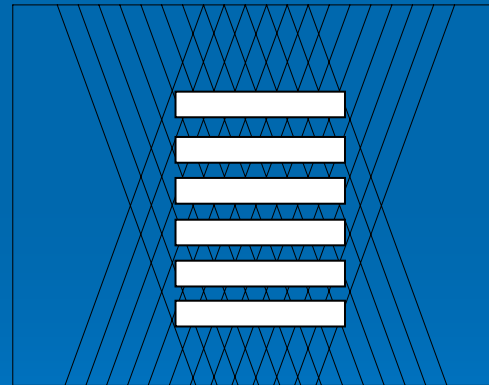
10°



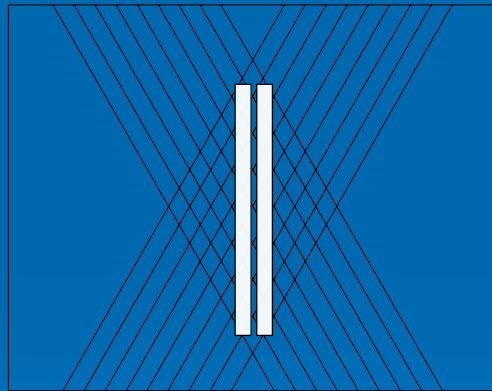
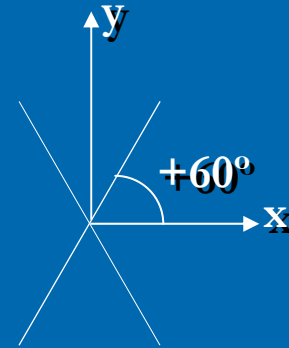
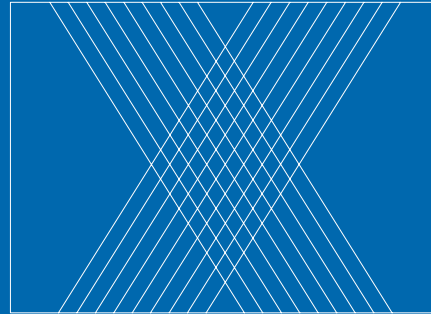
80°



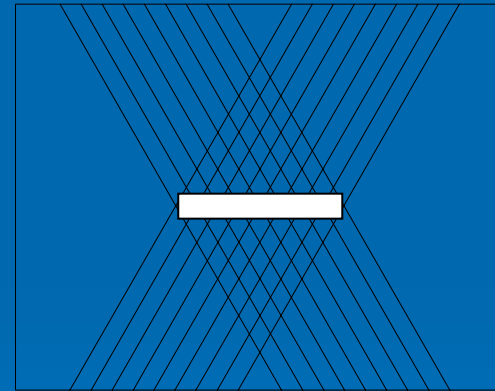
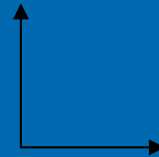
20°



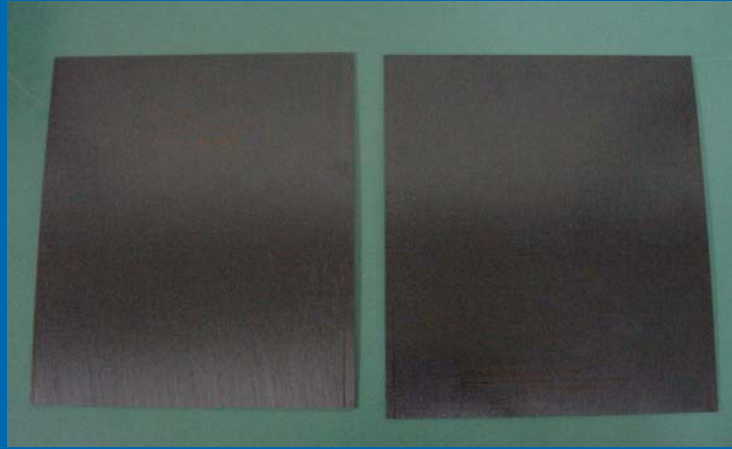
70°



30°



60°



90°

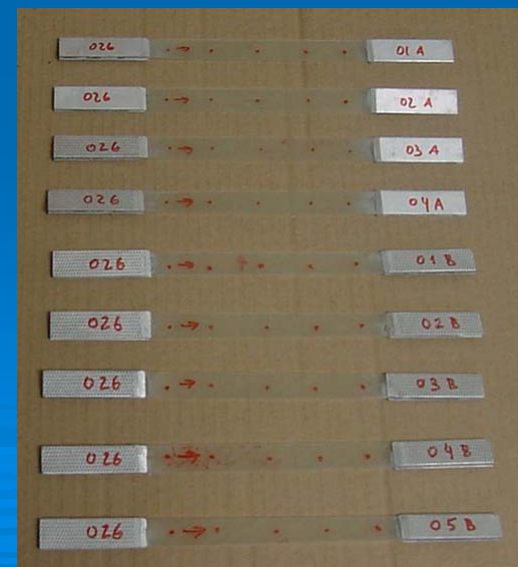
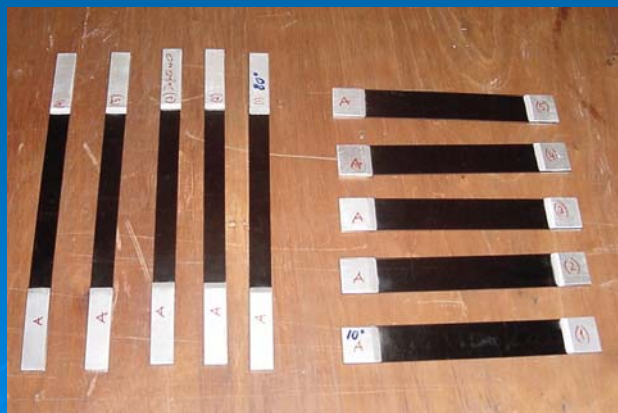
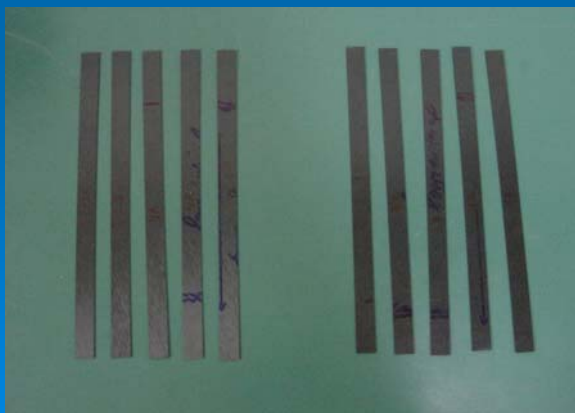
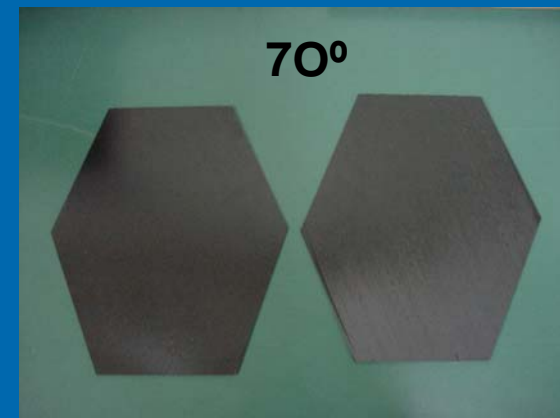
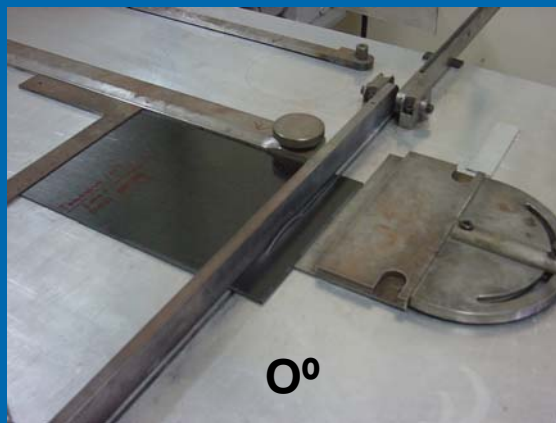


80°



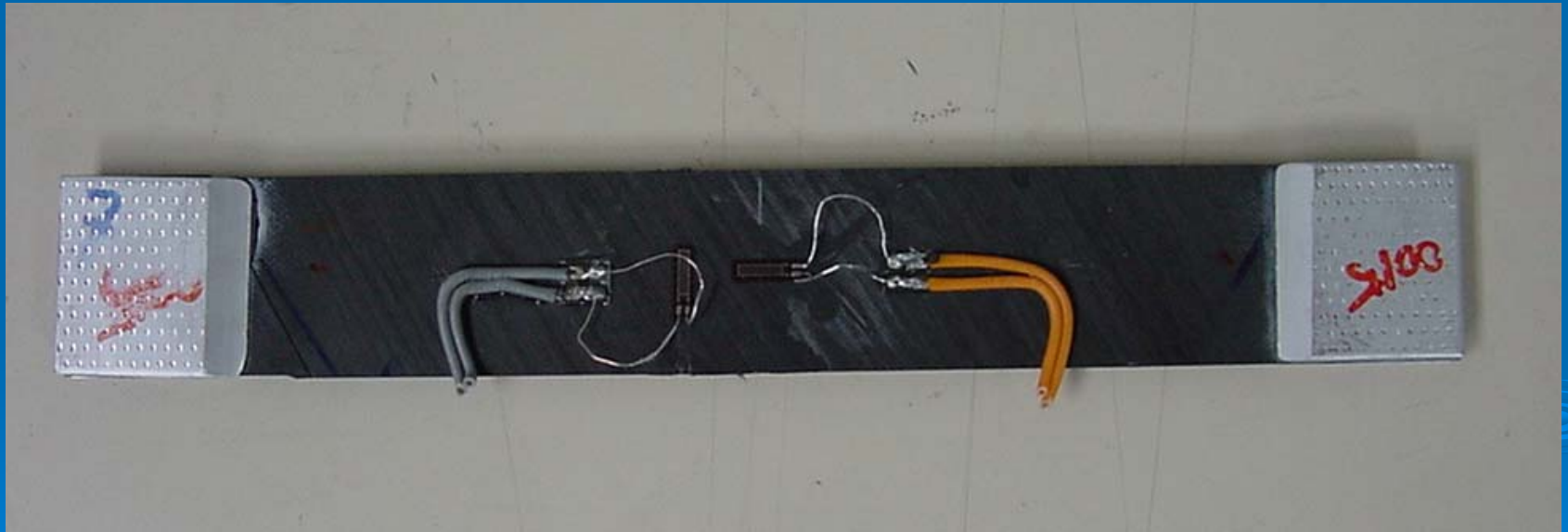
60°

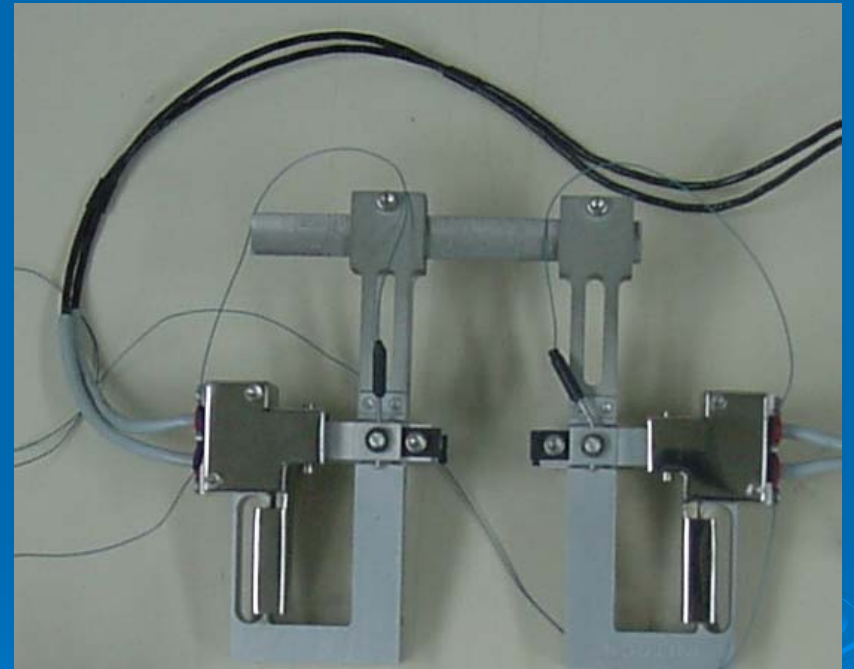
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para a medida das deformações, os ensaios de tração utilizaram extensômetros do tipo *strain gages*, unidirecional e bidirecional.





RESULTADOS

DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS

$$V_f = m_f \cdot \frac{d_c}{d_f}$$

$$V_m = m_m \cdot \frac{d_c}{d_m}$$

$$V_v = 100 - (V_f + V_m)$$

DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS

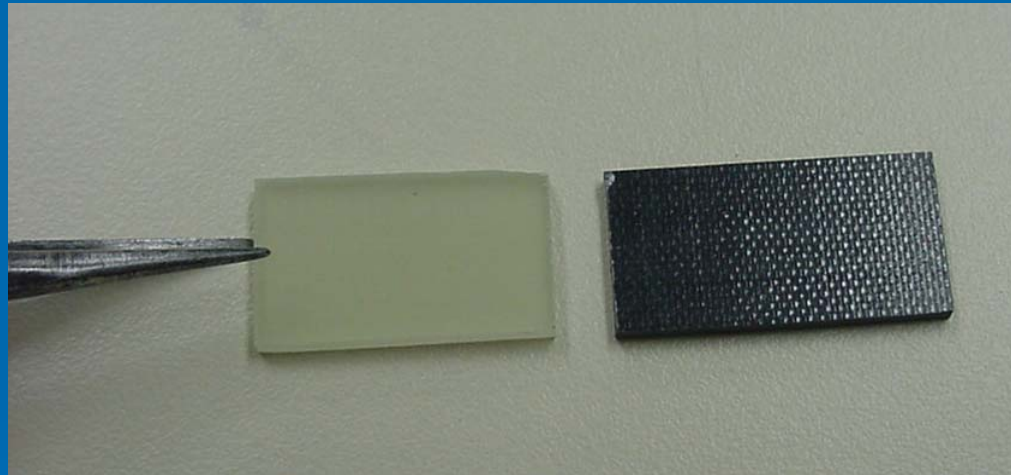


frações de massa



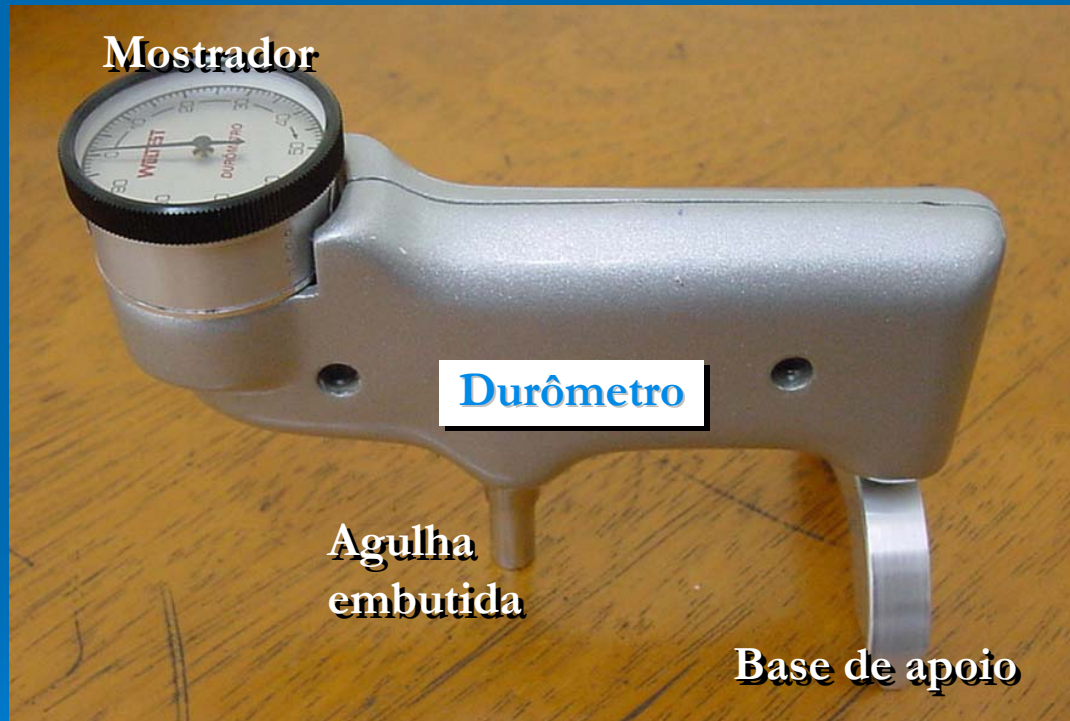
densidade

DETERMINAÇÃO DAS FRAÇÕES DE MASSA



ângulo	densidade g.cm ⁻³		Frações volumétricas (%)			Frações volumétricas (%)		
	f. carbono	f. vidro	vf	vm	v v	vf	vm	v v
0°	1,56	2,11	67,0	31,6	1,4	68,1	28,1	2,6
±10°	1,57	2,13	65,7	33,3	1,0	66,3	33,2	0,5
±20°	1,57	2,12	65,7	33,2	1,1	66,4	32,6	1,0
±30°	1,57	2,12	68,4	29,4	2,2	66,6	32,3	1,1
±60°	1,57	2,11	65,3	33,4	1,3	67,6	29,7	2,7
±70°	1,58	2,13	68,6	29,5	1,9	68,1	29,4	2,5
±80°	1,56	2,12	63,7	35,3	1,0	67,7	29,5	2,0
90°	1,57	2,11	65,4	33,3	1,3	68,1	28,1	2,6

MEDIDA DA DUREZA BARCOL

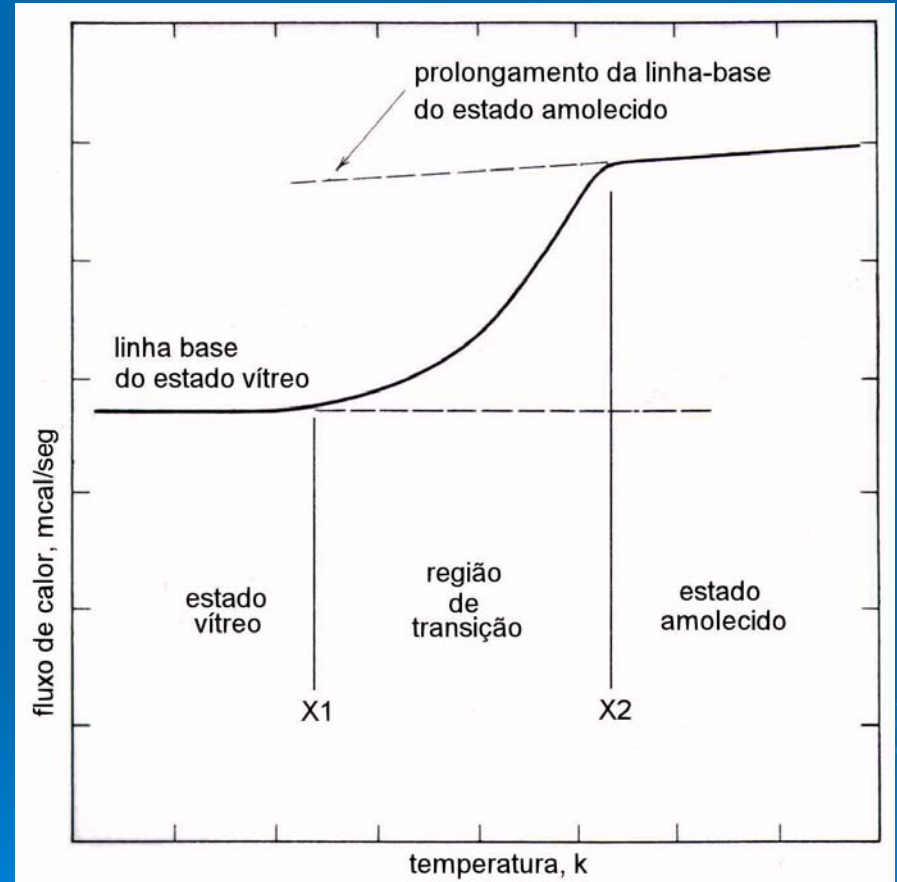


DUREZA BARCOL DAS PLACAS

ângulo	dureza	Barcol
	f. carbono	f. vidro
0°	82,2	83,5
±10°	83,2	83,0
±20°	80,2	83,0
±30°	83,2	82,8
±60°	81,8	83,0
±70°	82,7	83,7
±80°	82,5	82,9
90°	82,3	83,5

ANÁLISE TÉRMICA-TGA

Tg-Temperatura de Transição Vítre

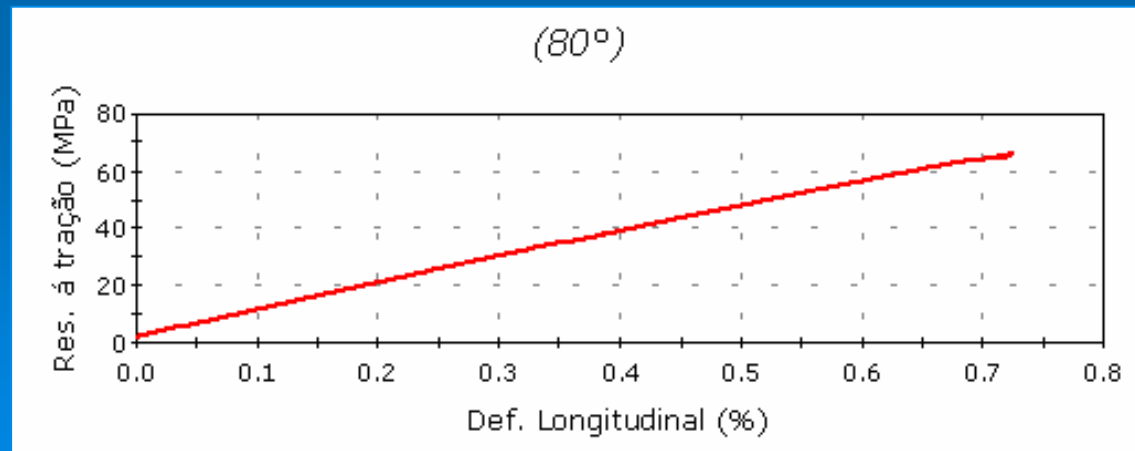
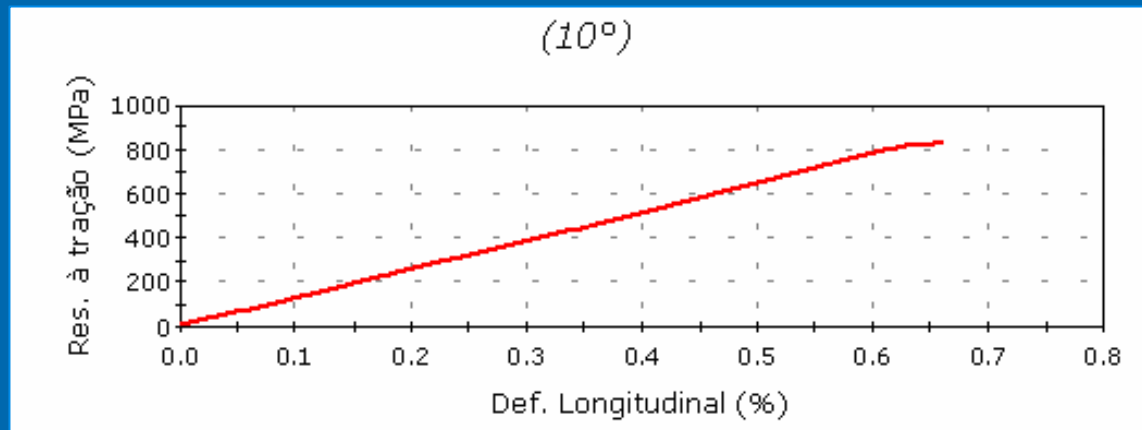


ANÁLISE TÉRMICA

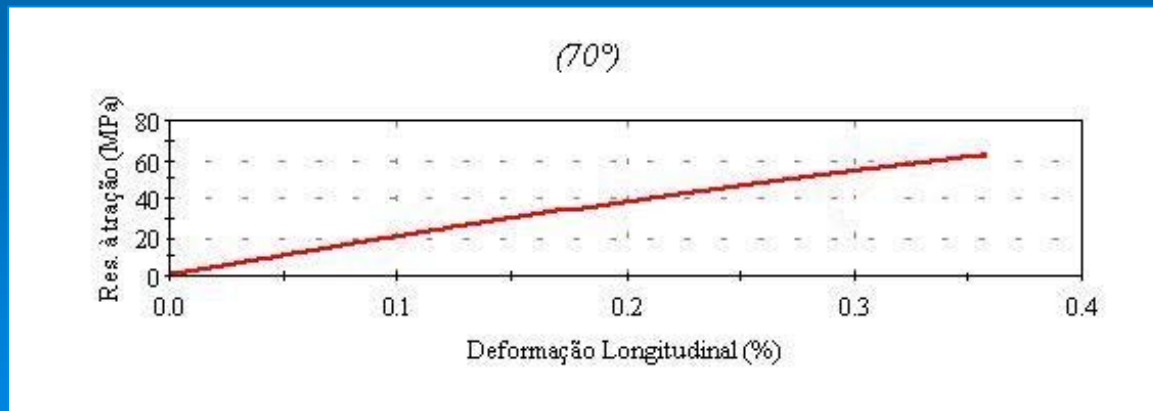
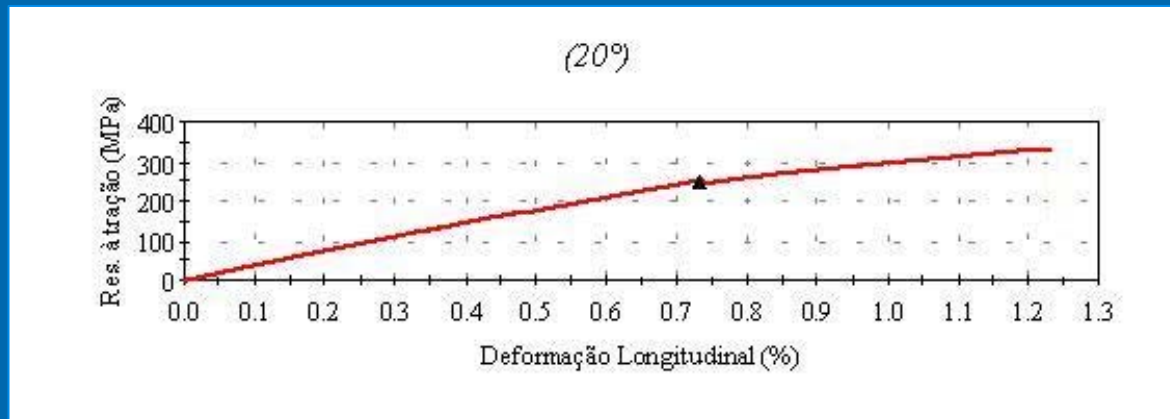
ÂNGULO	Temp. de Transição vítrea (°C)	
	f. carbono	f. vidro
0°	109	122
±10°	108	121
±20°	107	121
±30°	109	123
±60°	110	121
±70°	107	122
±80°	110	119
90°	108	122

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Ensaio de tração de compósitos de fibra de carbono (*Strain gages*)



Ensaio de tração de compósitos de fibra de vidro (Extensômetro bidirecional)



Comparação dos resultados experimentais com os teóricos

FIBRA DE CARBONO

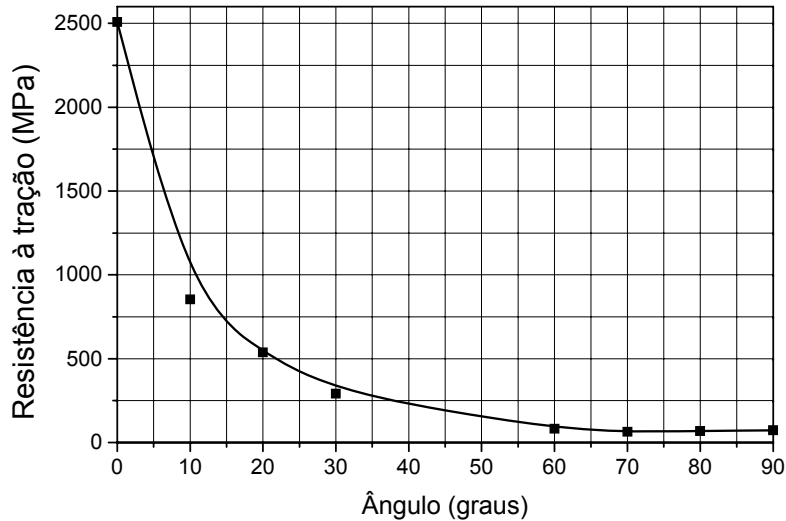
ângulo	Tensão de ruptura (MPa)		Mód. Elast. (GPa)		Coef. Poisson	
	exp.	teórico	exp.	teórico	exp.	teórico
0°	2509	2510	153	153	0,30	0,30
±10°	854	855	134	141	0,60	0,64
±20°	537	536	83	103	1,44	1,23
±30°	292	292	34	57	1,62	1,29
±60°	83	84	11	13	0,48	0,30
±70°	64	57	10	11	0,15	0,14
±80°	68	59	9	11	0,05	0,05
90°	73	73	10	10	0,02	0,02 ₆₁

Comparação dos resultados experimentais com os teóricos

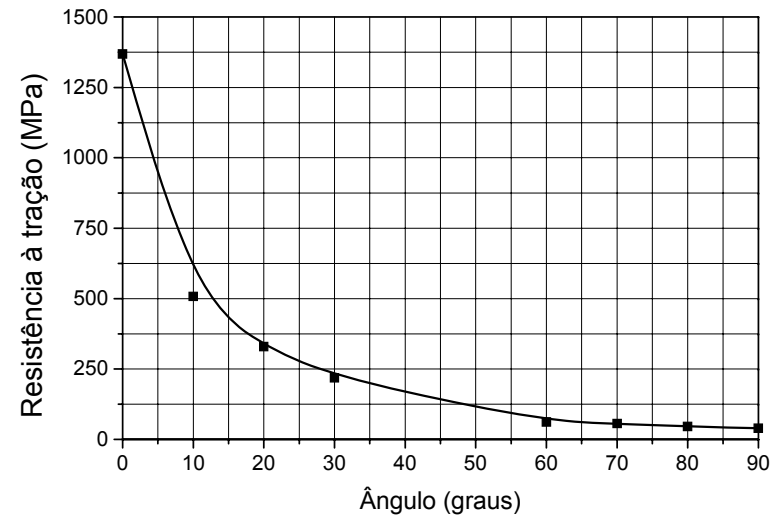
FIBRA DE VIDRO

ângulo	Tensão de ruptura (MPa)		Mód. Elast. (GPa)		Coef. Poisson	
	exp.	teórico	exp.	teórico	exp.	teórico
0°	1369	1370	50	50	0,31	0,31
±10°	508	508	47	47	0,36	0,37
±20°	330	330	36	39	0,58	0,52
±30°	219	220	24	28	0,77	0,64
±60°	62	62	15	15	0,37	0,34
±70°	56	56	16	16	0,22	0,21
±80°	46	45	16	17	0,13	0,13
90°	40	40	17	17	0,11	0,11 ₆₂

Comparação dos resultados experimentais COMPÓSITOS DE CARBONO E FIBRA DE VIDRO

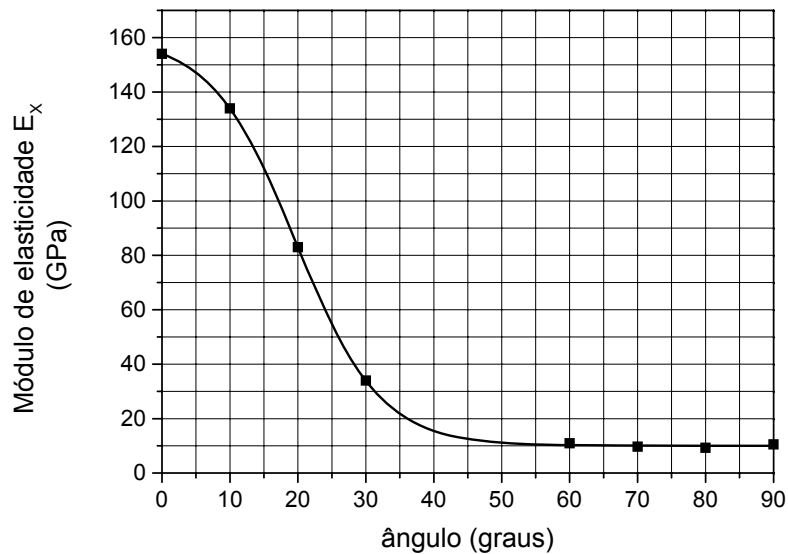


Compósitos de fibra de carbono

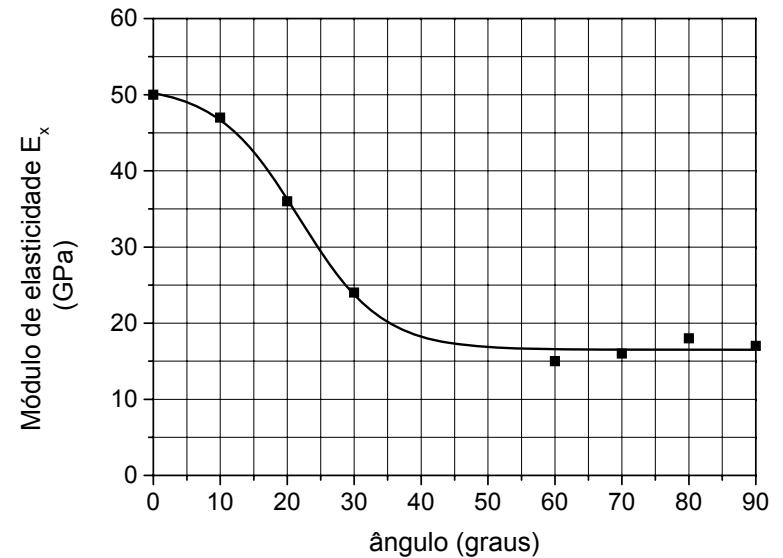


Compósitos de fibra de vidro

Comparação dos resultados experimentais COMPÓSITOS DE CARBONO E FIBRA DE VIDRO

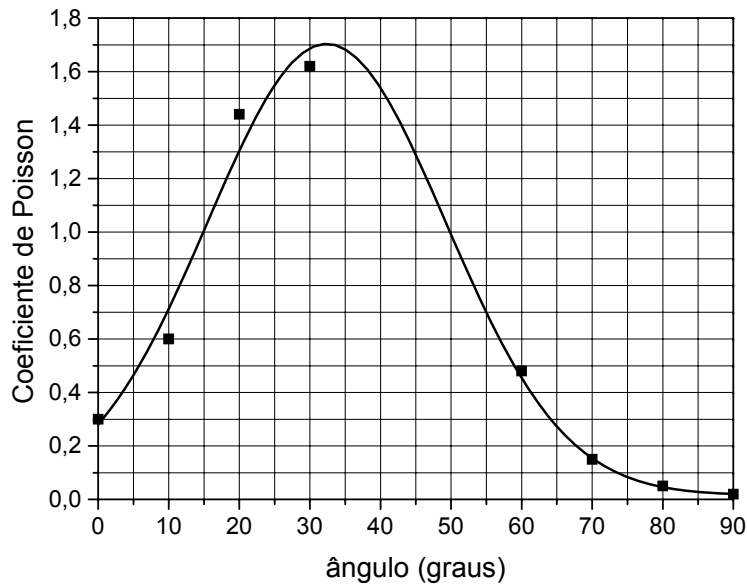


Compósitos de fibra de carbono

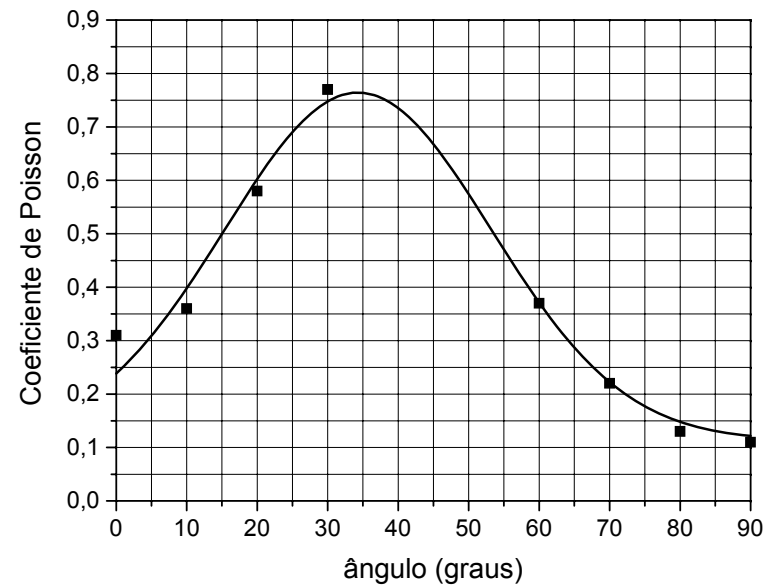


Compósitos de fibra de vidro

Comparação dos resultados experimentais COMPÓSITOS DE CARBONO E FIBRA DE VIDRO

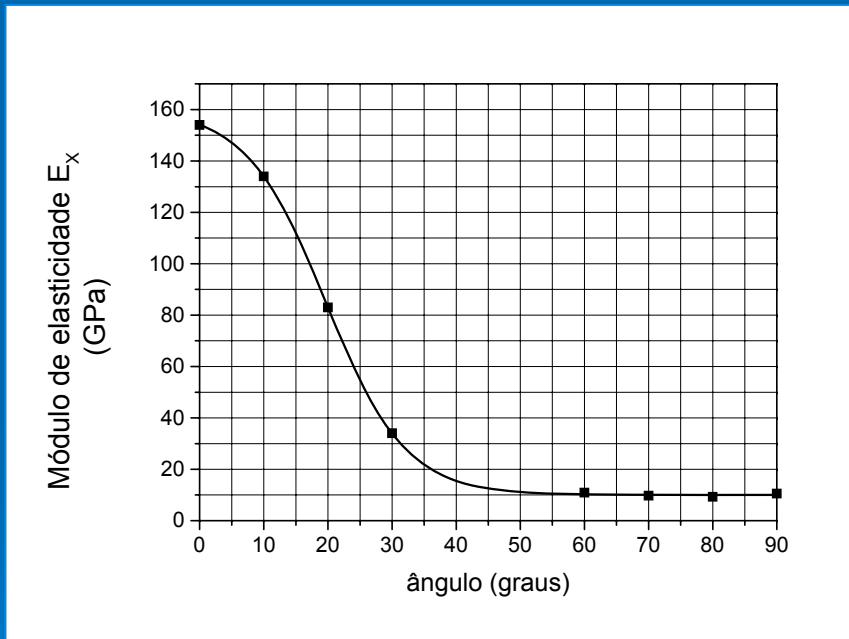


Compósitos de fibra de carbono

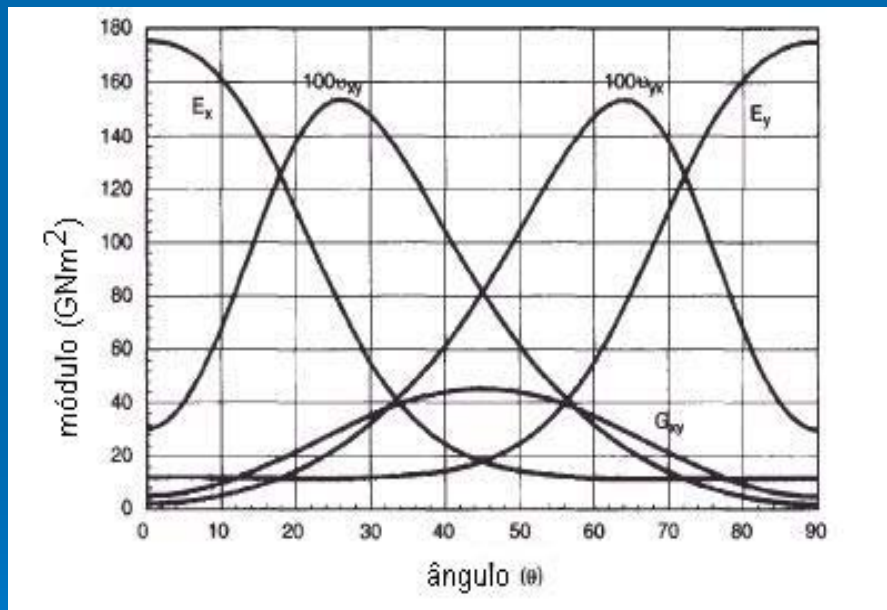


Compósitos de fibra de vidro

Comparação dos resultados experimentais com a literatura

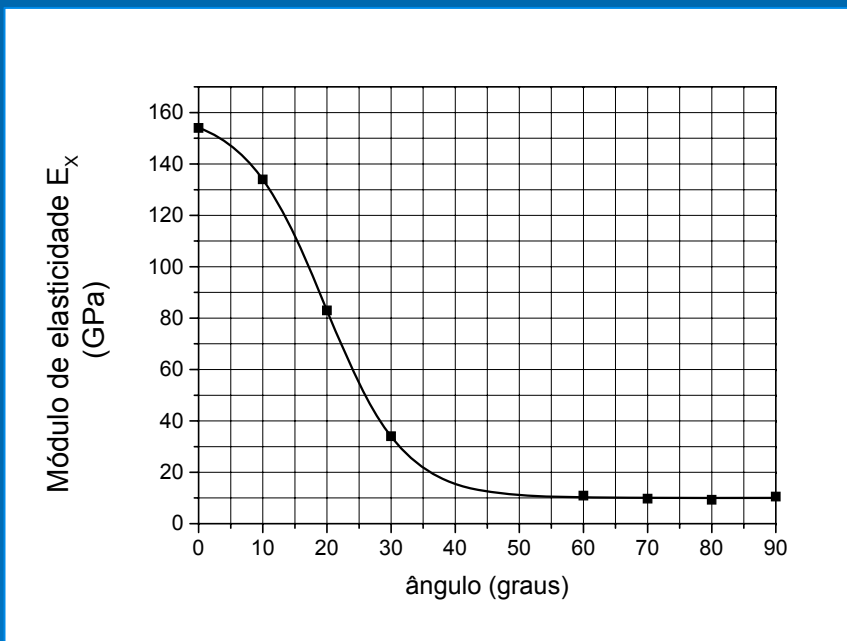


Compósitos de fibra de carbono

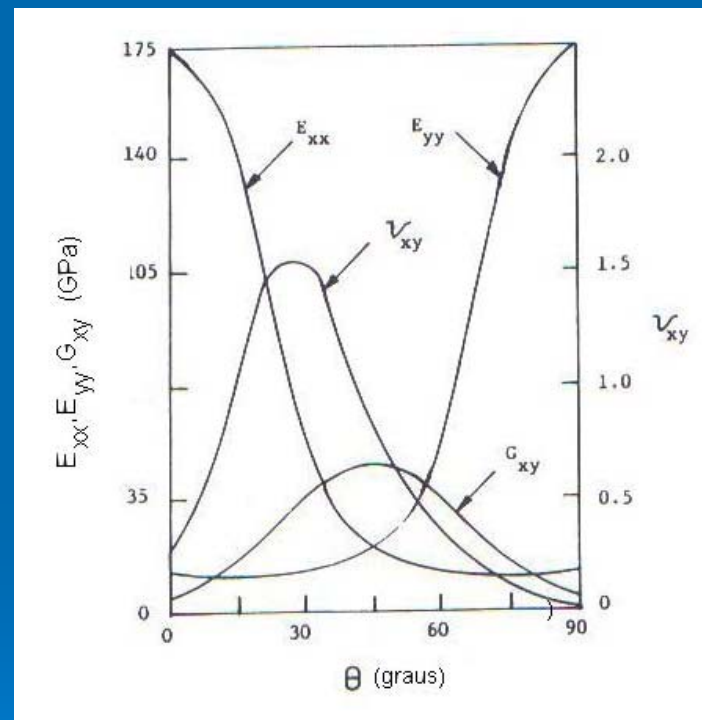


Crowford, 1998

Comparação dos resultados experimentais com a literatura

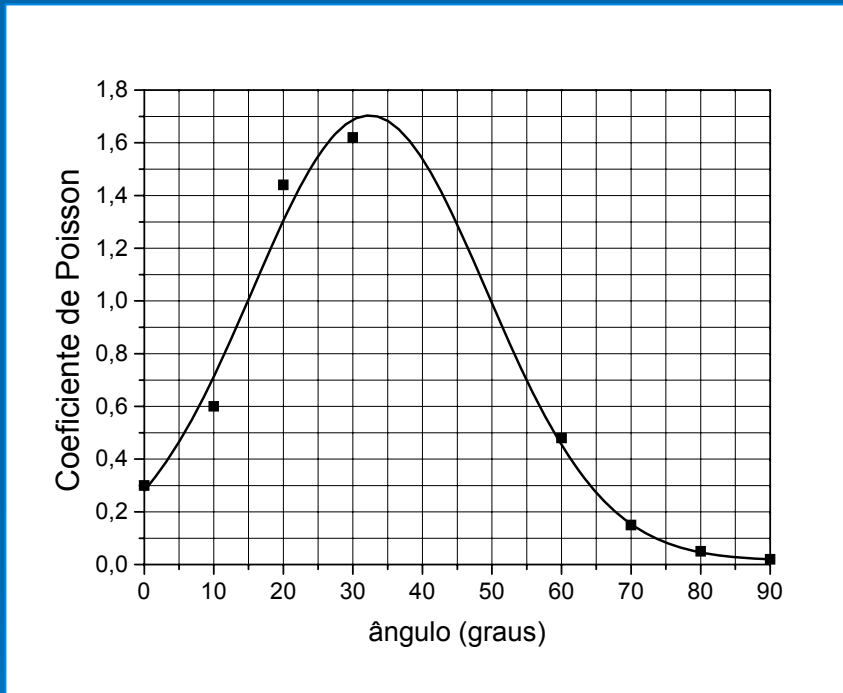


Compósitos de fibra de carbono

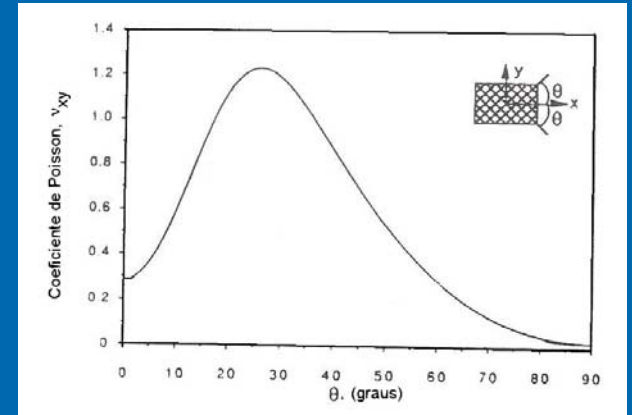


Mallick, 1993

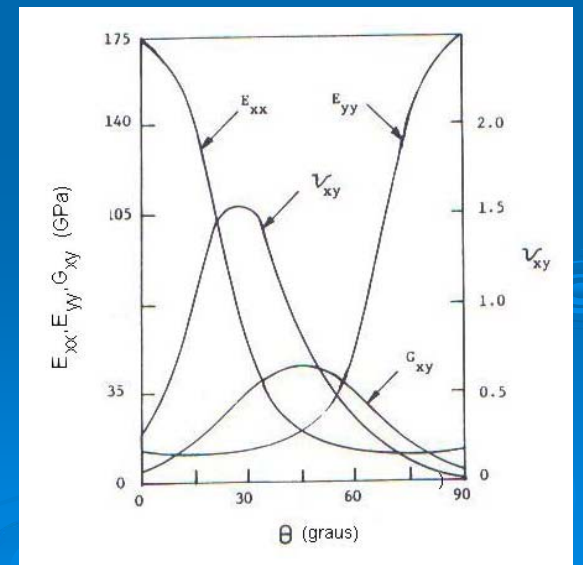
Comparação dos resultados experimentais com a literatura



Compósitos de fibra de carbono

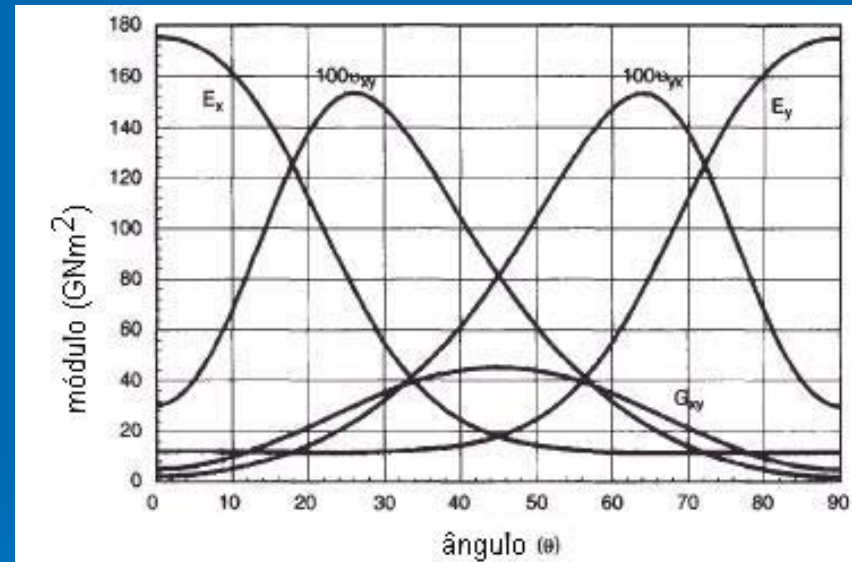
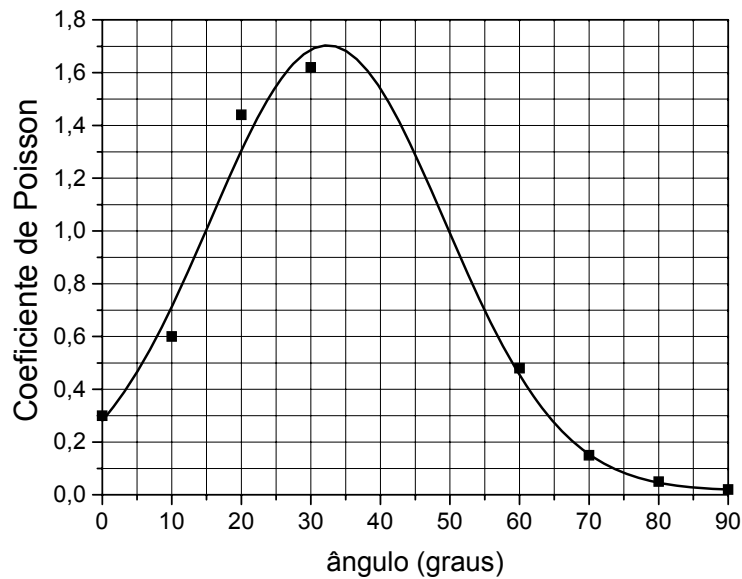


Daniel e Ishai, 1994



Mallick, 1993

Comparação dos resultados experimentais com a literatura



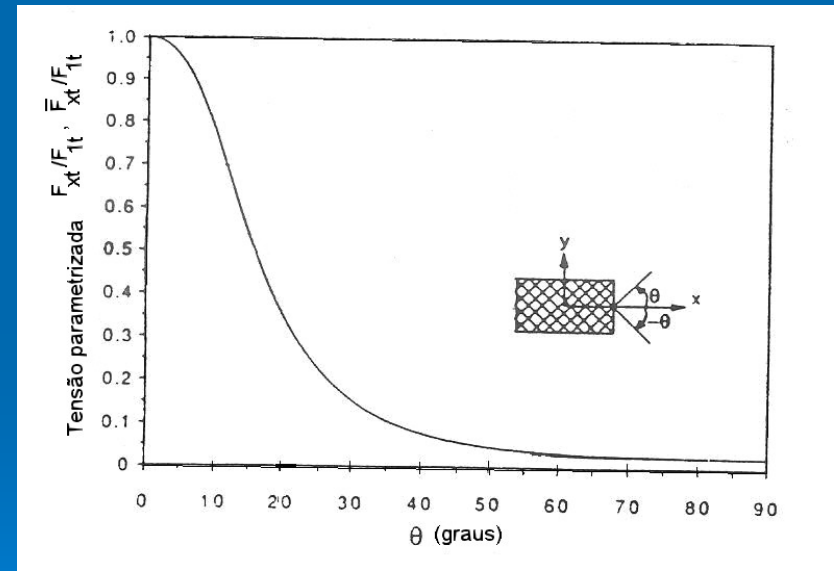
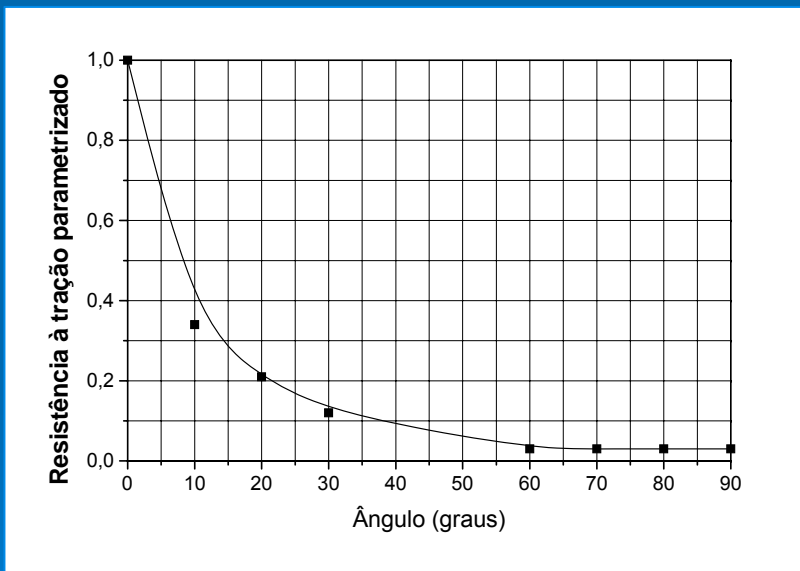
Compósitos de fibra de carbono

Crowford, 1998

METROLOGIA E DUREZA DAS PLACAS

ângulo	tensão σ_x/σ_0	parametrizada σ_x/σ_0	módulo E_x/E_0	Parametrizado E_x/E_0
E_x/E_0	f. carbono	f. vidro	f. carbono	f. vidro
0°	1,00	1,00	1,00	1,00
±10°	0,34	0,37	0,88	0,94
±20°	0,21	0,20	0,54	0,72
±30°	0,12	0,16	0,22	0,48
±60°	0,03	0,04	0,07	0,30
±70°	0,03	0,04	0,06	0,32
±80°	0,03	0,03	0,06	0,32
90°	0,03	0,03	0,07	0,34

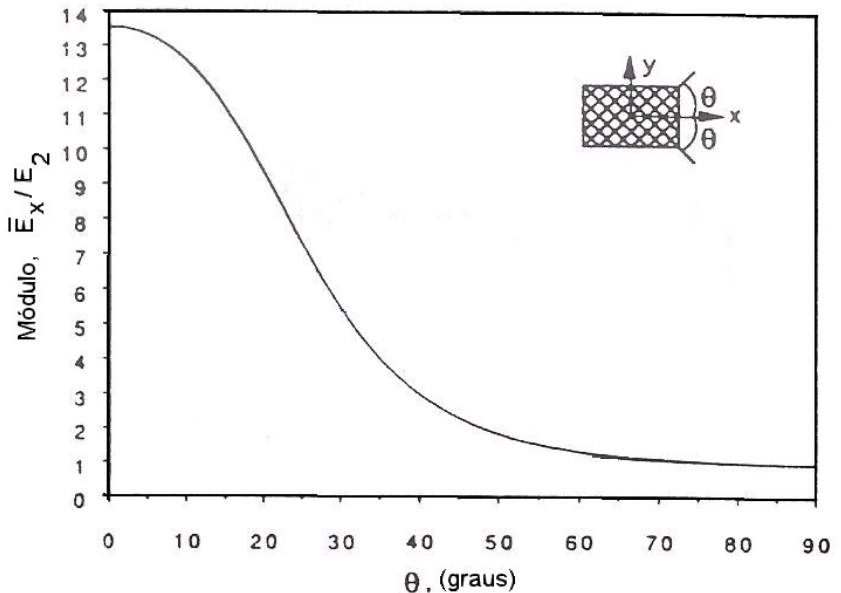
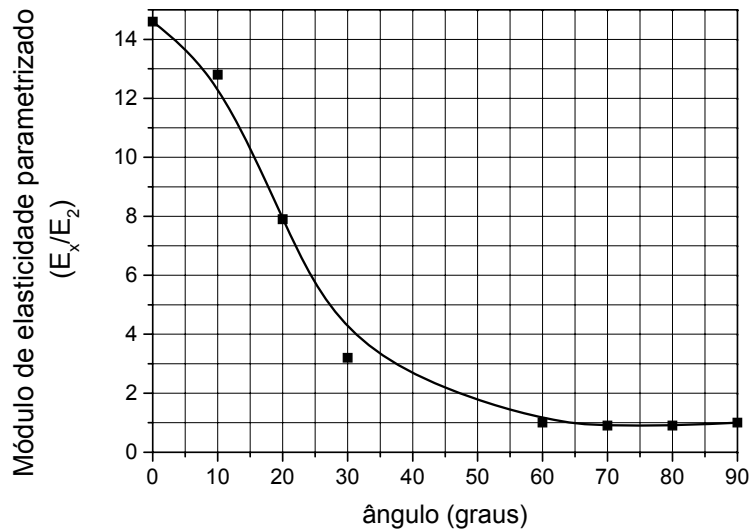
Parametrização dos resultados experimentais e comparação com a literatura



Compósitos de fibra de carbono

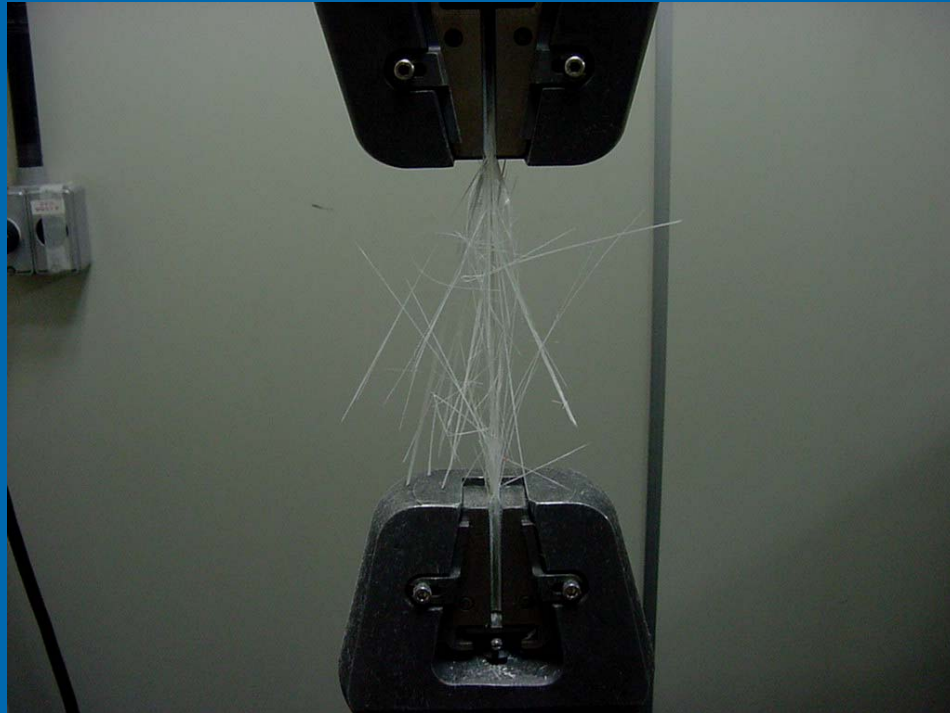
Daniel e Ishai, 1994

Parametrização dos resultados experimentais e comparação com a literatura

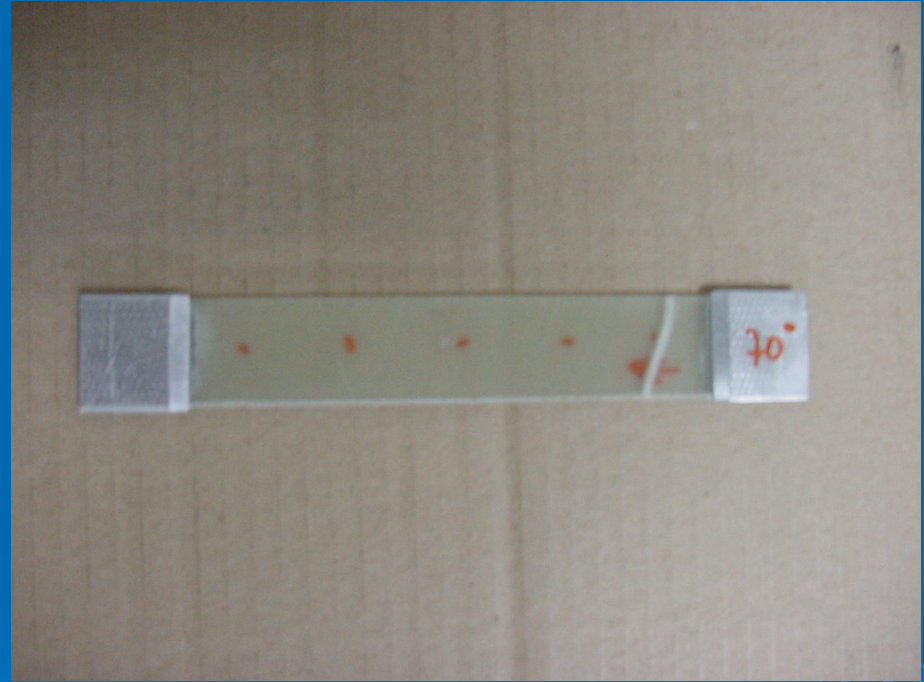


Compósitos de fibra de carbono

Daniel e Ishai, 1994







- **A medida da dureza Barcol é um método prático para estabelecer uma correlação com a T_g .**
- **Enrolamento filamentar se mostrou como o processo correto para fabricação de placas devido à baixa fração volumétrica de vazios obtida.**
- **Para a resistência à tração, uma pequena variação da orientação do reforço leva a uma grande queda da resistência.**