

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MÁRMORE SINTÉTICO ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL

RICARDO FOUAD RABAHI  
FLAMÍNIO LEVY NETO

# Introdução

## Marmore Sintético

Pias , Tanques, Lavatórios, Molduras, Assento Sanitários, etc,

## Fibra de Vidro

Caixas d'água, Telhas, Casco de Barcos, Revestimentos, Peças Especiais, etc

## Marmore Sintético Reforçado com Fibra de Vidro

Pias, Tanques, Lavatórios, Revestimentos.

# MATÉRIAS PRIMAS

Carga Mineral



Resina Poliester



Fibra de Vidro



Aditivos



Desmoldantes

# COMPOSIÇÃO DO MÁRMORE SÍNTEICO



RESINA POLIESTER



CARGA MINERAL



ADITIVOS

# COMPOSIÇÃO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE VIDRO



RESINA POLIESTER



FIBRA DE VIDRO



ADITIVOS

# COMPOSIÇÃO DO MÁRMORE SINTÉTICO REFORÇADO



RESINA POLIESTER



CARGA MINERAL



ADITIVOS



FIBRA DE VIDRO

# MÉTODOS

Ferramentas necessárias para  
Confecção dos corpos de prova

Masseira

Molde

Mesa  
Vibratori



# MÉTODOS

## Confecção dos corpos de prova

Mistura  
(Masseira)

Moldagem

Vibração  
(Mesa  
Vibratória)

Desmoldagem  
2 horas após a  
Moldagem  
Grupos "A", "B" e "C"

Desmoldagem  
24 horas após a  
Moldagem  
Grupos "D", "E" e "F"



# Molde



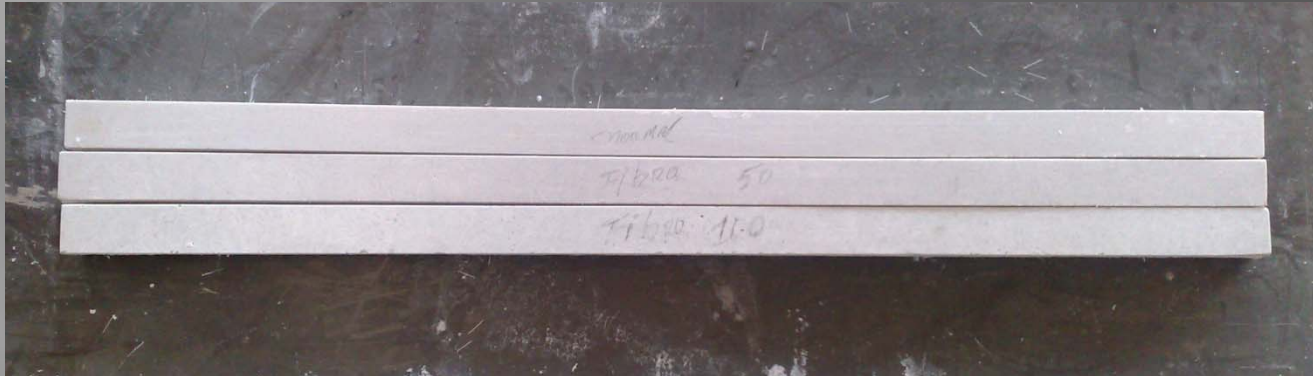
# Acréscimo de Fibra na Massa



# Enchimento do Molde



# Corpos de Prova



Corpos de prova antes do corte dos grupos "A", "B" e "C"

# ENSAIOS



LABORÁTORIO DE ENSAIOS MECÂNICOS - UNB

# MÉTODOS

## Ensaaios

Medições  
dos Cdps

Execução  
dos  
Ensaaios

Coleta de  
Dados

Cálculo das principais propriedades  
mecânicas

# Parâmetros Principais

## Dimensões dos corpos de prova

Cp	Espessura (mm)	Largura (mm)	comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm <sup>3</sup> )	Força Max (KN)	Tensão Máxima (Mpa)	Deslocamento Max (mm)	Momento Fletor (KN *mm)	Modulo de Elasticidade (Gpa)	momento de inércia (mm <sup>4</sup> )
<b>Média "A"</b>	<b>8,00</b>	<b>39,83</b>	<b>140,60</b>	<b>85,92</b>	<b>1,920</b>	<b>0,44</b>	<b>29,75</b>	<b>1,34</b>	<b>12,15</b>	<b>6,36</b>	<b>1700,70</b>
Desvio Padrão	0,07	0,11	0,00	6,11	0,131	0,04	3,14	0,20	1,17	0,99	45,50
<b>Média "B"</b>	<b>7,67</b>	<b>39,81</b>	<b>138,65</b>	<b>82,36</b>	<b>1,945</b>	<b>0,46</b>	<b>32,17</b>	<b>1,20</b>	<b>12,57</b>	<b>7,68</b>	<b>1499,84</b>
Desvio Padrão	0,13	0,18	0,36	2,12	0,034	0,07	4,25	0,28	1,79	1,96	72,10
<b>Média "C"</b>	<b>8,02</b>	<b>40,30</b>	<b>135,94</b>	<b>79,66</b>	<b>1,813</b>	<b>0,45</b>	<b>35,58</b>	<b>2,12</b>	<b>12,43</b>	<b>6,70</b>	<b>1734,95</b>
Desvio Padrão	0,09	0,29	3,21	2,03	0,044	0,06	4,92	0,42	1,59	1,04	55,96
<b>Média "D"</b>	<b>7,49</b>	<b>39,49</b>	<b>138,41</b>	<b>85,15</b>	<b>2,082</b>	<b>0,44</b>	<b>32,56</b>	<b>0,97</b>	<b>12,02</b>	<b>9,15</b>	<b>1457,74</b>
Desvio Padrão	0,44	0,35	1,08	4,76	0,021	0,05	1,74	0,12	1,24	0,50	245,58
<b>Média "E"</b>	<b>7,71</b>	<b>39,57</b>	<b>138,19</b>	<b>89,30</b>	<b>2,053</b>	<b>0,43</b>	<b>30,31</b>	<b>0,83</b>	<b>11,84</b>	<b>9,61</b>	<b>1511,84</b>
Desvio Padrão	0,12	0,32	0,78	1,62	0,036	0,03	1,70	0,06	0,82	0,61	71,64
<b>Média "F"</b>	<b>7,71</b>	<b>39,61</b>	<b>138,48</b>	<b>87,59</b>	<b>2,051</b>	<b>0,41</b>	<b>28,89</b>	<b>0,94</b>	<b>11,31</b>	<b>9,23</b>	<b>1562,33</b>
Desvio Padrão	0,19	0,31	0,98	2,13	0,028	0,03	1,80	0,09	0,84	0,71	121,01

# Ensaio



▣ Norma: ASTM D-790-90

# Ensaio



- ▣ Ensaio destrutivo realizado no laboratório de ensaios no SG09



# Controle dos ensaios

The screenshot displays the MTS TestWare software interface, which is used for controlling mechanical tests. The interface is divided into several main sections:

- Station Manager < UnB\_Ext\_desL.cfg : Thiagos >**: The main control window. It includes a menu bar (File, Display, Applications, Tools, Help) and a toolbar. The **Basic TestWare** section shows:
  - Test Name: fratura.tst
  - Data File: c:\documents and settings\mts\desktop
  - Channel: Axial
  - Control Mode: Displacement
  - Active Mode: Displacement
  - Abs End Level: -5.00 mm
  - Test Rate: 2 mm/Min
  - Compensator: None
  - Test Counters: Preset (0.0 cycles), Current (0.0 cycles), Total (0.0 cycles)
  - Peak Detectors: [Icon]
- Station Controls**: Contains control buttons for play, stop, and emergency stop, along with a Master Span section (Span: 100.00 %) and Station Limits.
- Meters 1 < UnB\_Ext\_d... >**: A panel showing real-time data for Axial Force (5 N, -5 N) and Axial Displacement (-0.00 mm).
- Manual Comm... < UnB\_Ext\_d... >**: A panel for manual control, including Channel (Axial), Control Mode (Displacement), Active Mode (Displacement), and Manual Cmd (mm). It also has an "Enable Manual Command" checkbox.
- Test Setup < fratura.tst >**: A configuration window with tabs for Peak Det., Summary, Home, and Test Log. The **Command** tab is active, showing:
  - Type: Monotonic
  - Monotonic Definition: Channel (Axial), Control Mode (Displacement), End Level Type (Absolute), Absolute End Level (-5.00 [mm]), Rate (2.0000 mm/Min), Compensator (None), Done Action (Disabled).
- Signal Auto Offset < UnB\_Ext\_desL.cfg >**: A window for adjusting offsets for various signals:

Signal	Current Value	Offset
Axial Displacement:	0.00 mm	-76.76 mm
Axial Force:	-0.00 kN	-0.41 kN
Axial Ext_desl:	0.0000 mm	-0.0578 mm
- Detectors < UnB\_Ext... >**: A window for configuring limit detectors for the Axial channel:

Signal	Upper Limit	Upper Action	Lower Limit	Lower Action
Axial Displacement:	5.00 mm	Interlock	-5.00 mm	Interlock
Axial Force:	3.00 kN	Interlock	-3.00 kN	Interlock
Axial Ext_desl:	6.5000 mm	Interlock	-6.5000 mm	Interlock

The Windows taskbar at the bottom shows the Start button, several open applications (Adobe Reader, stmgr, Test Setup < fratura... >), and the system clock (5:12 PM).

# Gráfico Carga (KN) X Deflexão (mm)

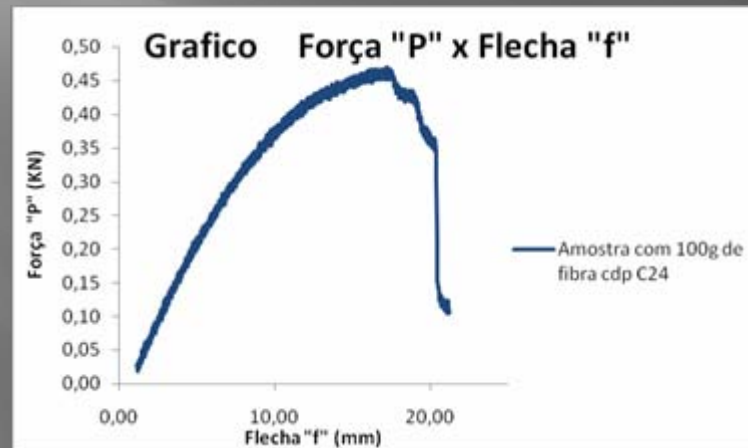
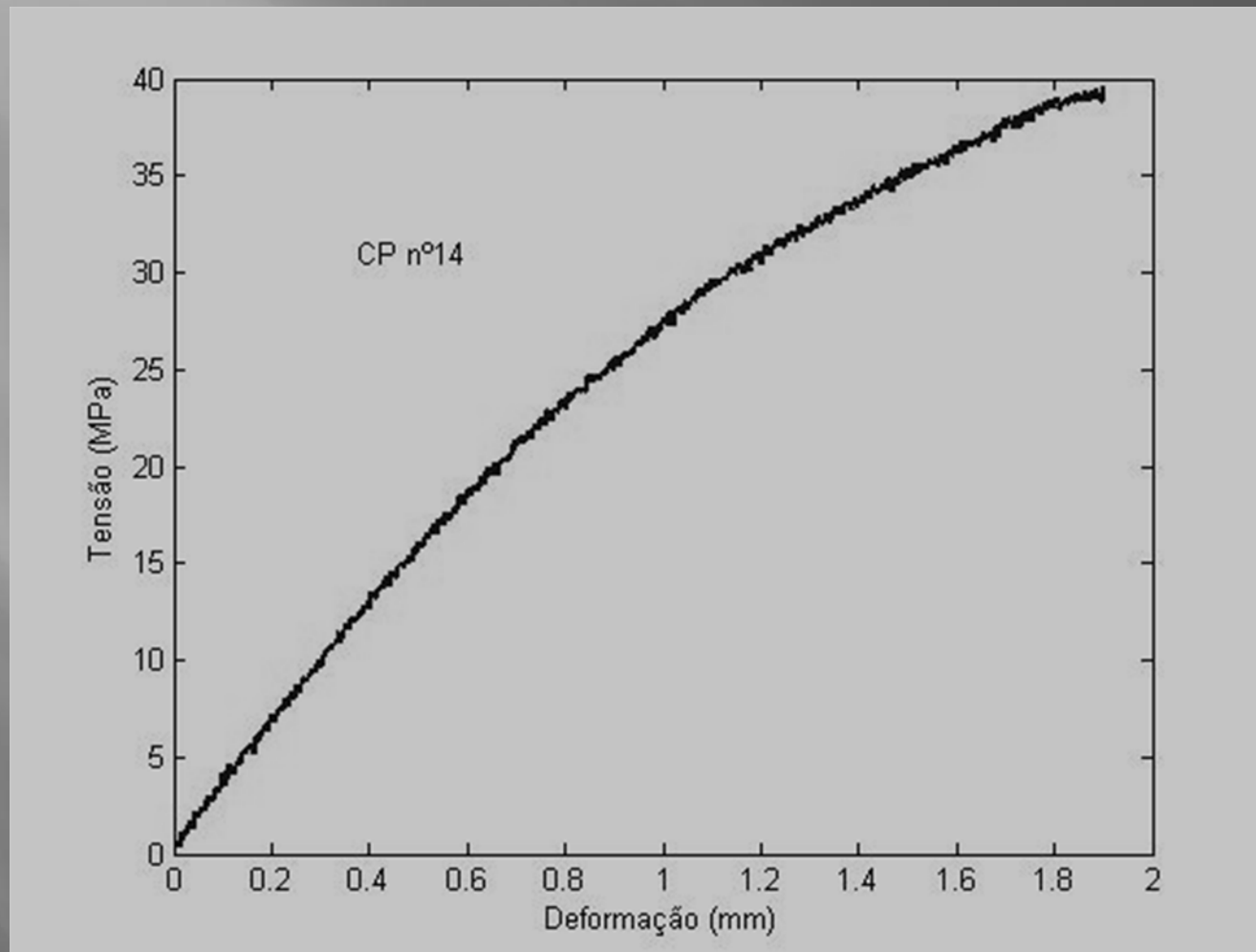


Gráfico força x deflexão amostra C-24

Exemplo de resultados obtidos dos ensaios

# Gráfico

## Tensão (MPa) X Deflexão (mm)



Exemplo de resultado obtido do ensaio cp14 do grupo "B"

# ANÁLISE ESTATÍSTICA

Escolha do Processo Estatístico



Análise de Weibull



Tratamento de Dados



Plotagem de Gráficos



Resultados

Posição	Tensão de ruptura		Probabilidade de Falha F(V)
1	$\sigma_1$	1 / 28	0,04
2	$\sigma_2$	2 / 28	0,07
3	$\sigma_3$	3 / 28	0,11
4	$\sigma_4$	4 / 28	0,14
5	$\sigma_5$	5 / 28	0,18
6	$\sigma_6$	6 / 28	0,21
7	$\sigma_7$	7 / 28	0,25
8	$\sigma_8$	8 / 28	0,29
9	$\sigma_9$	9 / 28	0,32
10	$\sigma_{10}$	10 / 28	0,36
11	$\sigma_{11}$	11 / 28	0,39
12	$\sigma_{12}$	12 / 28	0,43
13	$\sigma_{13}$	13 / 28	0,46
14	$\sigma_{14}$	14 / 28	0,50
15	$\sigma_{15}$	15 / 28	0,54
16	$\sigma_{16}$	16 / 28	0,57
17	$\sigma_{17}$	17 / 28	0,61
18	$\sigma_{18}$	18 / 28	0,64
19	$\sigma_{19}$	19 / 28	0,68
20	$\sigma_{20}$	20 / 28	0,71
21	$\sigma_{21}$	21 / 28	0,75
22	$\sigma_{22}$	22 / 28	0,79
23	$\sigma_{23}$	23 / 28	0,82
24	$\sigma_{24}$	24 / 28	0,86
25	$\sigma_{25}$	25 / 28	0,89

# Fórmulas utilizadas

## Probabilidade de Sobrevivência

$$P(V_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

## Probabilidade de falha

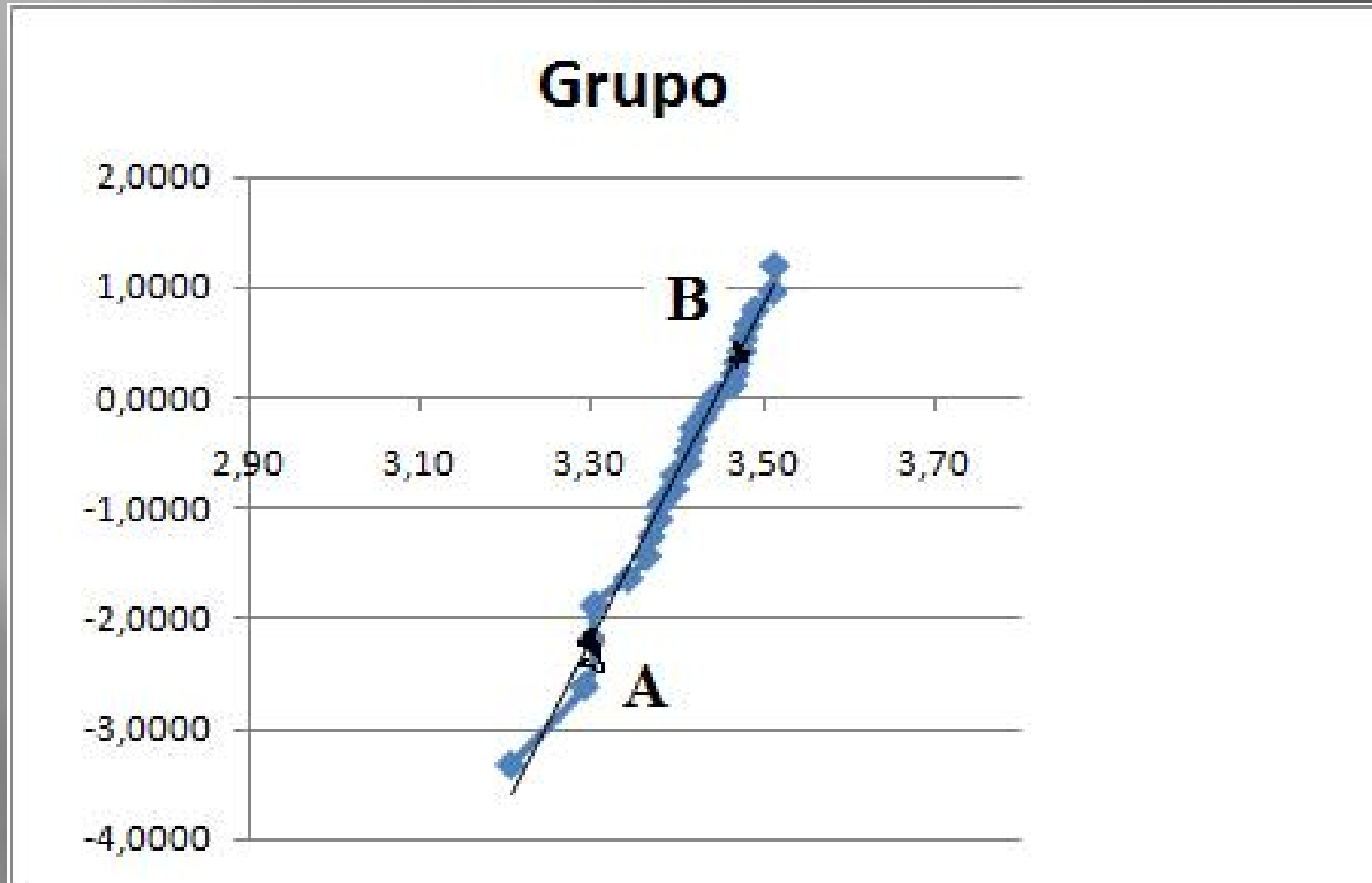
$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

## Módulo $m$ de Weibull

$$m = \frac{\ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F(V)_a} \right) \right) - \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F(V)_b} \right) \right)}{(\ln \sigma_a - \ln \sigma_b)}$$

Posição	Tensão de ruptura	$\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$
1	$\ln \sigma_1$	-3,3141
2	$\ln \sigma_2$	-2,6022
3	$\ln \sigma_3$	-2,1775
4	$\ln \sigma_4$	-1,8698
5	$\ln \sigma_5$	-1,6260
6	$\ln \sigma_6$	-1,4223
7	$\ln \sigma_7$	-1,2459
8	$\ln \sigma_8$	-1,0892
9	$\ln \sigma_9$	-0,9474
10	$\ln \sigma_{10}$	-0,8168
11	$\ln \sigma_{11}$	-0,6952
12	$\ln \sigma_{12}$	-0,5805
13	$\ln \sigma_{13}$	-0,4714
14	$\ln \sigma_{14}$	-0,3665
15	$\ln \sigma_{15}$	-0,2649
16	$\ln \sigma_{16}$	-0,1657
17	$\ln \sigma_{17}$	-0,0679
18	$\ln \sigma_{18}$	0,0292
19	$\ln \sigma_{19}$	0,1266
20	$\ln \sigma_{20}$	0,2254
21	$\ln \sigma_{21}$	0,3266
22	$\ln \sigma_{22}$	0,4321
23	$\ln \sigma_{23}$	0,5439
24	$\ln \sigma_{24}$	0,6657
25	$\ln \sigma_{25}$	0,8036
26	$\ln \sigma_{26}$	0,9704

## Exemplo de gráfico de $\ln \sigma \times \ln(\ln(1/(1-F(V))))$



$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V)_a}\right)\right) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V)_b}\right)\right)}{(\ln \sigma_a - \ln \sigma_b)}$$



# Tensão de Ruptura (Mpa)

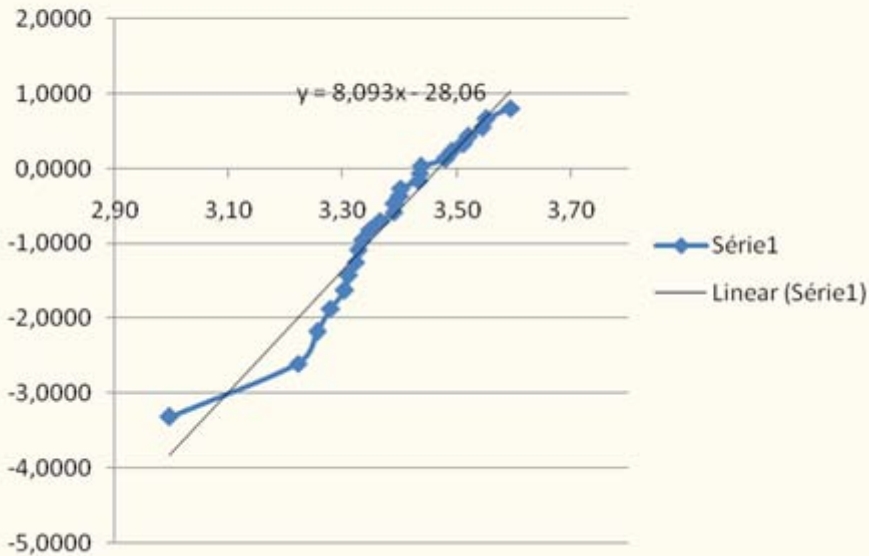
Posição	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "A"	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "B"	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "C"	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "D"	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "E"	Tensão de ruptura (Mpa) Grupo "F"
1	20,00	24,31	23,01	27,97	24,67	25,74
2	25,07	24,60	27,40	28,68	26,88	26,04
3	25,94	24,88	28,12	29,82	27,13	26,47
4	26,56	25,51	29,03	29,89	27,19	26,64
5	27,20	26,23	30,02	30,25	28,29	26,76
6	27,40	28,70	30,11	30,88	28,91	26,95
7	27,72	29,31	32,18	31,33	29,06	27,28
8	27,86	29,54	32,28	31,40	29,31	27,36
9	28,04	29,95	32,29	31,40	29,39	27,36
10	28,46	30,04	33,03	31,78	29,83	27,38
11	28,95	30,76	33,50	31,92	29,85	27,97
12	29,65	30,83	34,45	31,95	30,31	28,14
13	29,69	31,29	35,62	32,49	30,34	28,27
14	29,95	31,50	35,66	32,50	30,51	28,33
15	30,01	31,94	35,98	32,77	30,53	28,55
16	30,99	32,80	38,73	33,04	30,86	28,80
17	31,02	32,90	39,16	33,26	31,08	28,81
18	31,08	33,74	39,55	33,79	31,34	29,67
19	32,47	35,50	40,00	33,88	31,92	29,71
20	32,81	36,62	40,09	34,22	32,03	30,36
21	33,50	38,32	41,99	34,24	32,10	30,51
22	33,81	39,61	43,23	34,41	32,28	30,97
23	34,63	39,95	43,82	34,64	32,35	31,15
24	34,91	41,77	44,39	34,69	32,50	32,10
25	36,39	43,56	45,87	35,20	32,78	32,18
26				36,12	33,47	32,34
27				36,51	33,54	34,16
<b>Média</b>	<b>29,76</b>	<b>32,17</b>	<b>35,58</b>	<b>32,56</b>	<b>30,31</b>	<b>28,89</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,54</b>	<b>5,30</b>	<b>5,86</b>	<b>1,74</b>	<b>1,70</b>	<b>1,80</b>

# Ensaio realizado no segundo semestre de 2008

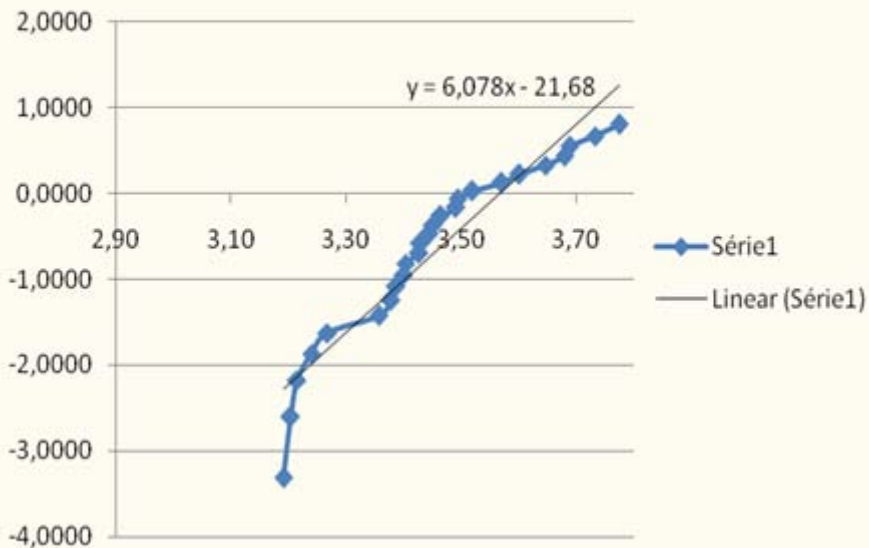
Grupo "A" - Sem Fibra de Vidro  
Grupo "B" - 50g de Fibra de Vidro  
Grupo "C" - 100g de Fibra de Vidro

\*Desmoldagem 2 hrs

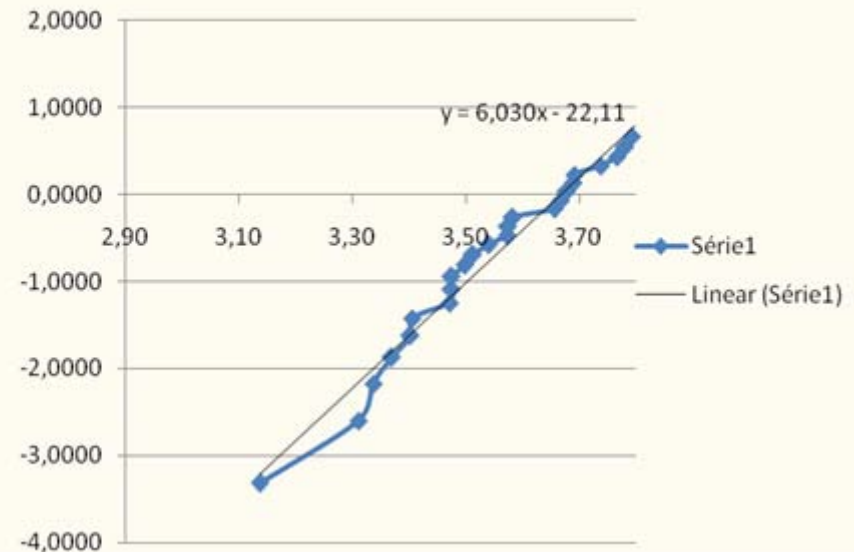
## Grupo "A"



## Grupo "B"



## Grupo "C"

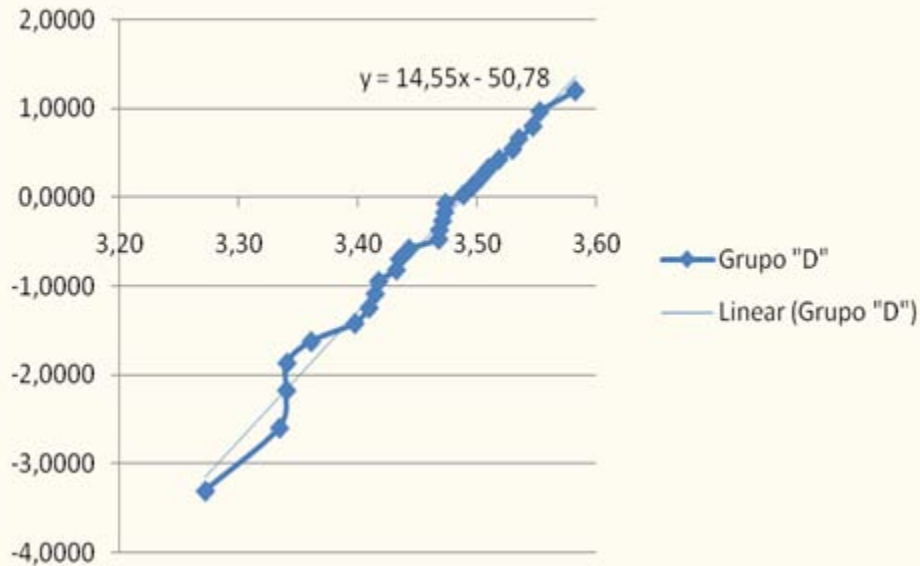


# Ensaio realizado no primeiro semestre de 2009

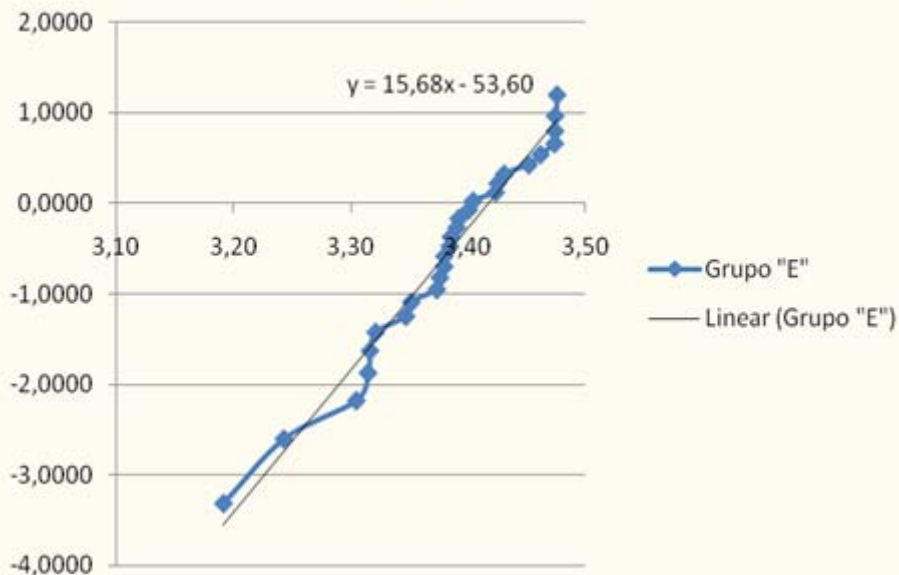
Grupo "D" - Sem Fibra de Vidro  
Grupo "E" - 12,5g de Fibra de Vidro  
Grupo "F" - 25g de Fibra de Vidro

\*Desmoldagem 24 hrs

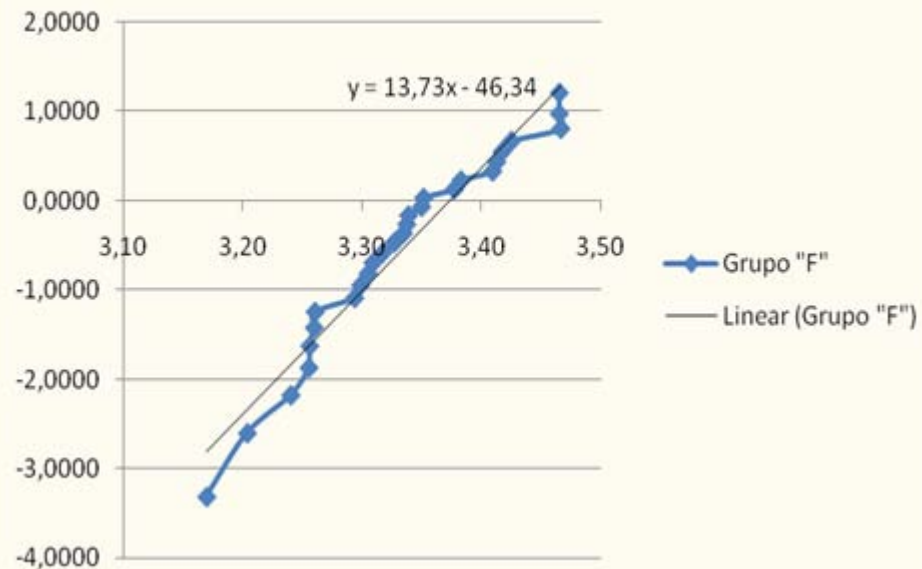
## Grupo "D"



## Grupo "E"



## Grupo "F"



# Módulo de Weibull

Sem fibra

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 16,57
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 32,52 MPa

12,5g de fibra de vidro

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 15,04
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 30,17 MPa

25g de fibra de vidro

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 14,05
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 28,73 MPa

Sem fibra

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 8,09
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 29,63 MPa

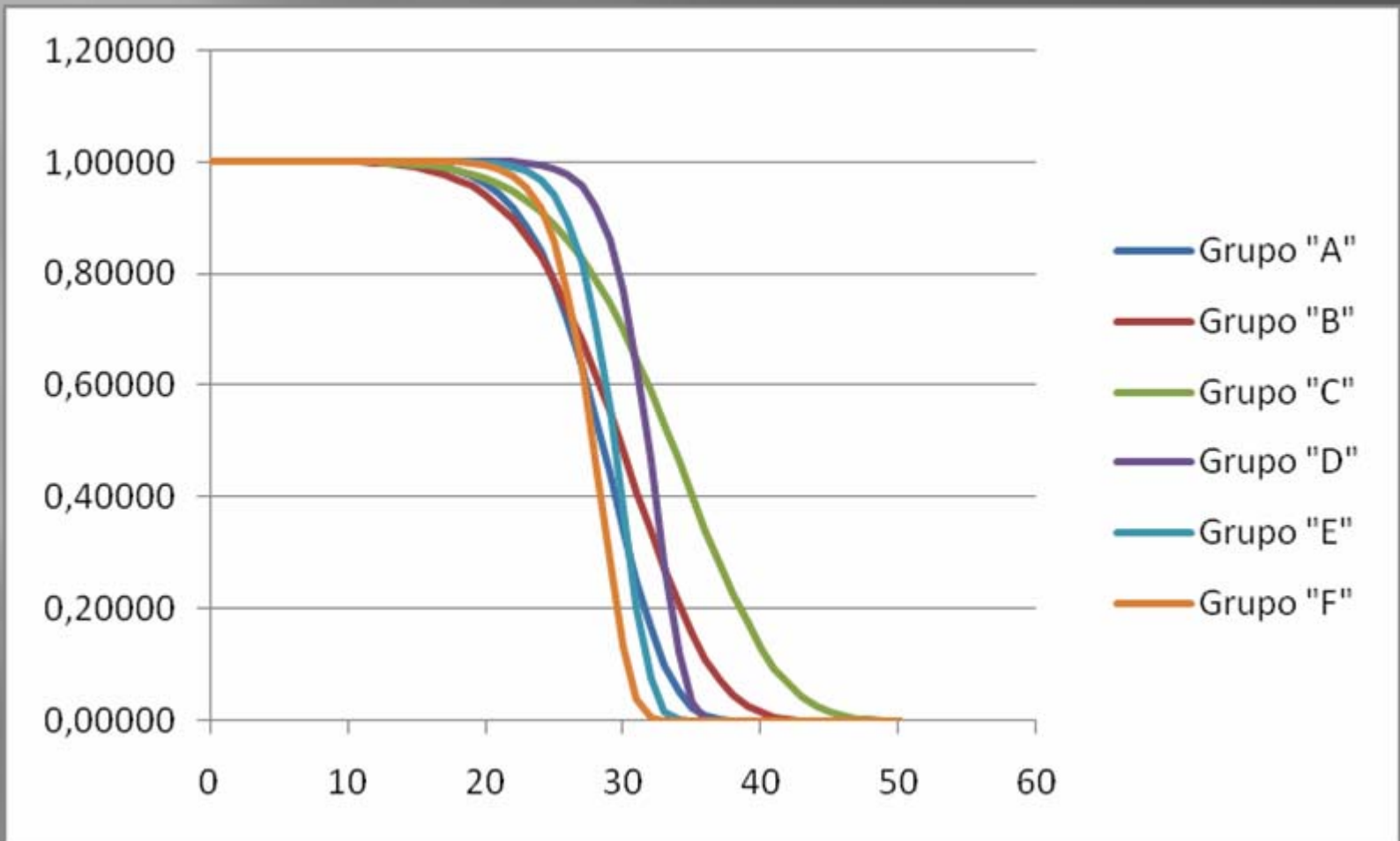
50g de fibra de vidro

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 6,08
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 31,61 MPa

100g de fibra de vidro

- Módulo de Weibull ( $m$ ) = 6,03
- Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) = 35,01 MPa

# Curva de sobrevivência



- ▣ Gráfico tensão x Probabilidade de sobrevivência (Grupo de amostras "E")

# Resultados da Resistência Intrínseca $\sigma_0$

	Grupo A Sem fibra	Grupo B 12,5 g de fibra	Grupo C 25 g de fibra	Grupo D Sem fibra	Grupo E 50 g de fibra	Grupo F 100g de fibra
$\sigma_0$ (MPa)	32,52	30,17	28,73	29,63	31,61	35,01

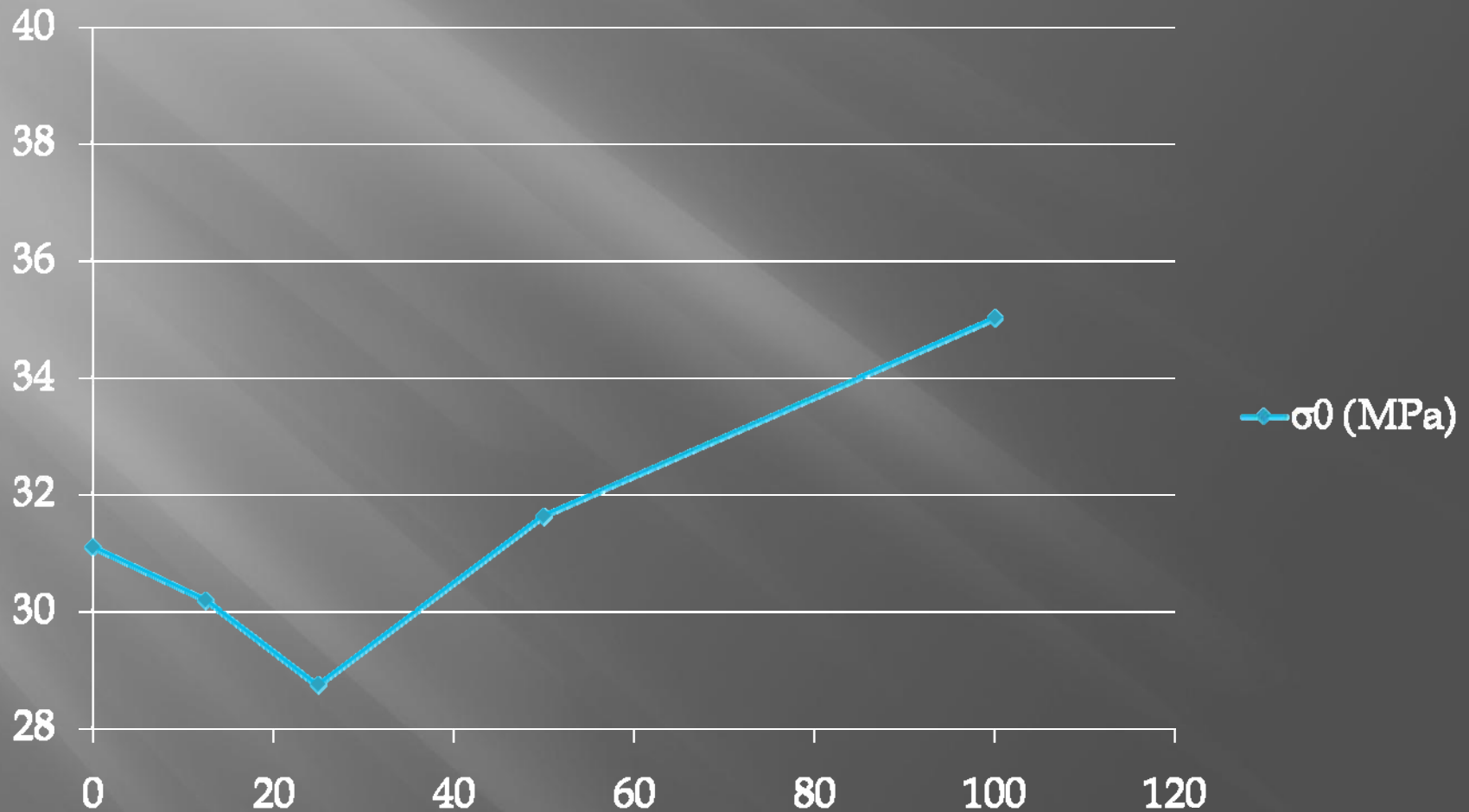
Média entre o grupos “A” e “D”

	Média entre A e D Sem fibra	Grupo B 12,5 g de fibra	Grupo C 25 g de fibra	Grupo E 50 g de fibra	Grupo F 100 g de fibra
$\sigma_0$ (MPa)	31,08	30,17	28,731	31,61	35,01

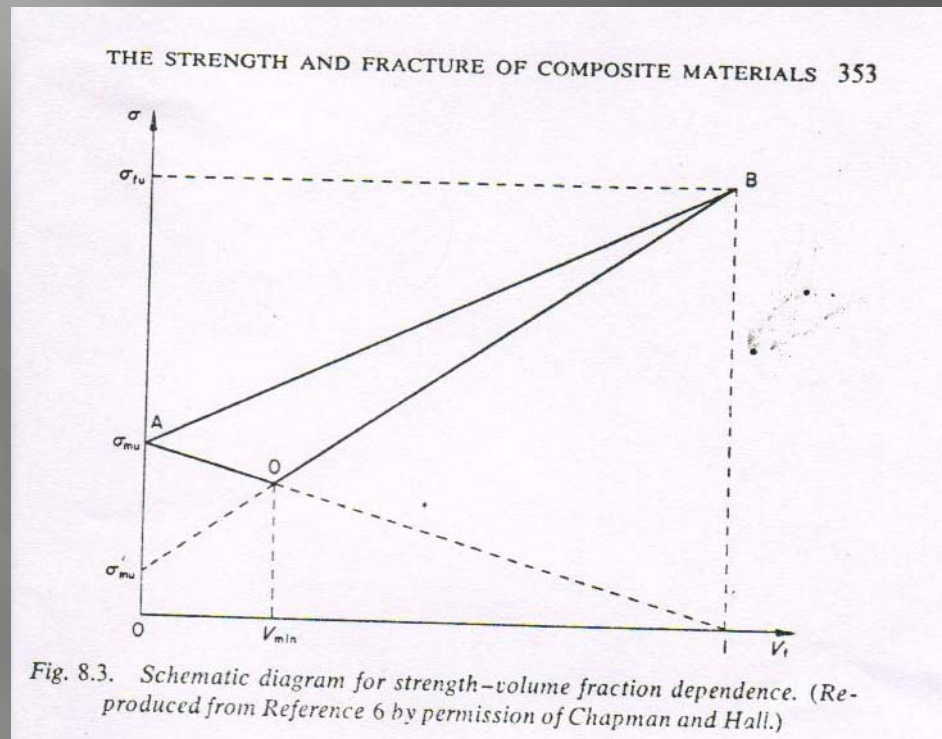
# Resistência intrínseca, $\sigma_0$ (MPa)

## X

### Quant. de Fibra de Vidro (g)



## Diagrama da influência de diferentes frações volumétricas de fibras



Fonte: Fig. 8.3, pg. 353, do livro do Vinson & Chou



# ANÁLISE DOS RESULTADOS, COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Influência do tempo de  
desmoldagem no módulo de  
Weibull

Variação da Resistência Intrínseca com  
o acréscimo de Fibra de Vidro

Possibilidade de eliminação de processo  
na fabricação de Mármore Sintético  
Composto com Fibra de Vidro

# SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Viabilidade econômica na adição de fibra de vidro no compósito de mármore sintético;
- Influência nas propriedades mecânicas com a variação da relação carga mineral x resina poliéster no mármore sintético;
- Análise da vibração na compactação e resistência mecânica do mármore sintético;
- Estudo do tempo de degradação do mármore sintético.

# AGRADECIMENTOS

A Deus que iluminou meu caminho e me deu forças para buscar meus objetivos;

Agradeço ao Programa de Pós Graduação de Ciências Mecânicas, PCMEC, da Universidade de Brasília pela oportunidade oferecida na realização deste Mestrado, e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho;

## CONTATOS

RICARDO FOUAD RABAHI

(62) 8421-1144

EMAIL: ricardorabahi@hotmail.com

FLAMÍNIO LEVY NETO

(61) 3107- 5686

EMAIL: flaminio@unb.br