

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

1996



1110000394



Estado das Caves Arqueológicas
Arqueologia e o seu Contexto
Tubo de Cartão / Reunio
Apud

Estado das Caves Arqueológicas

Estado das Caves Arqueológicas
Arqueologia e o seu Contexto
Tubo de Cartão / Reunio
Apud

*"Estudo das Características de
Resistência em um Compósito
Fibra de Carbono / Resina
Epoxi "*

EDSON VANDER PIMENTEL

57



"ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA EM UM COMPÓSITO
FIBRA DE CARBONO/RESINA EPOXI"

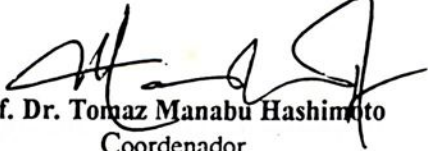
EDSON VANDER PIMENTEL

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

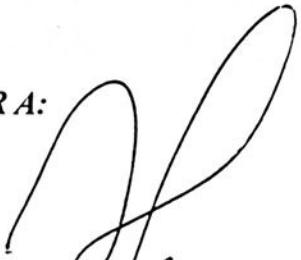
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. CELSO PINTO MORAIS PEREIRA
Unesp-Feg


Prof. Dr. MARIA LÚCIA CAETANO PINTO DA SILVA
Faenquil



Novembro de 1996

EDSON VANDER PIMENTEL

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA EM
UM COMPÓSITO FIBRA DE CARBONO/RESINA EPOXI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
da Universidade Estadual Paulista - Campus de
Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica (Área de Concentração:
Materiais).

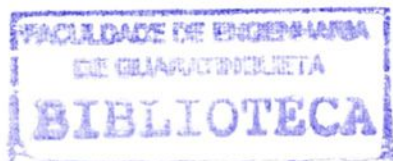
Orientador: Prof. Dr. *Herman Jacobus Cornelis Voorwald*

GUARATINGUETÁ

NOVEMBRO DE 1996

T620.168 (043)
P964 e

394



DADOS CURRICULARES**EDSON VANDER PIMENTEL**

NASCIMENTO 02.2.1970 - GUARATINGUETÁ/SP

FILIAÇÃO Alice Pimentel

1988/1992 Curso de Graduação

Faculdade de Engenharia Química de Lorena



A DEUS.

À minha irmã Cida, a minha mãe Alice e ao meu cunhado Jorge.

A mestra e amiga Kátia pelo auxílio e incentivo constantes no decorrer do trabalho.

A todos meus amigos que direta e indiretamente me incentivaram, para que este trabalho se tornasse concreto.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald pela orientação deste trabalho.

À CTM/SP nas pessoas de Gerson Marinucci, Rogério Nalin, Enéias, pela concessão dos dados experimentais dos ensaios de tração, compressão e cisalhamento.

Ao amigo Miguel Justino Barboza pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Rogério Oliveira Hein pela constante colaboração nos trabalhos em microinformática.

Ao professor Messias Borges da Silva pela colaboração e incentivo.

As bibliotecárias Ana Maria e Nilza pela revisão e correção das referências bibliográficas.

Ao estagiário da IAESTE Marcus Andreas Baur pela confecção do programa em Pascal 5.0 .

A todos os colegas da FEG pelo ambiente de trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos e Justificativas.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Aspectos gerais.....	5
2.2. Classificação dos materiais compósitos.....	8
2.3. Compósitos fibrosos.....	9
2.4. Fibra de carbono.....	10
2.4.1. Processos de conversão das fibras de carbono.....	11
2.4.2. Propriedades das fibras de carbono.....	14
2.4.2.1. Propriedades específicas.....	14
2.4.2.2. Estabilidade térmica.....	15
2.4.2.3. Propriedades compressivas.....	15
2.4.2.4. Fratura e flexibilidade da fibra.....	15
2.5. Matrizes e resinas.....	17
2.5.1. Resinas termofixas.....	19
2.6. Método de manufatura.....	20



2.7. Análise micromecânica.....	22
2.7.1. Massa específica do compósito.....	25
2.7.2. Vazios.....	30
2.8. Seleção estatística de materiais.....	32
2.9. Aspectos estatísticos de resistência.....	37
2.10. Distribuição de resistência para compósitos.....	39
2.10.1. Distribuição de frequência assumida como normal.....	40
2.10.2. Distribuição de Weibull.....	42
2.11. Método para estimar os parâmetros de Weibull.....	46
2.11.1. Método gráfico para estimação de β e θ	48
2.12. Papel de probabilidade de Weibull.....	49
2.13. Limites de confiança para funções de distribuição cumulativa.....	51
 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	 54
3.1. Material.....	54
3.2. Equipamentos para ensaios de tração, compressão e cisalhamento.....	54
3.3. Corpos de prova para ensaios de tração.....	55
3.3.1 longitudinal.....	56
3.3.2. transversal.....	56
3.4. Corpos de prova para ensaios de compressão.....	57
3.5. Corpos de prova para ensaios de cisalhamento.....	58



3.6. Parâmetros de ensaio.....	58
4. RESULTADOS.....	60
4.1. Códigos e ângulos.....	60
4.2. Tabelas de dados para os ensaios de tração longitudinal e transversal.....	60
4.3. Histogramas para os dados de tração longitudinal e transversal.....	73
4.4. Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para os dados de tração longitudinal e transversal.....	83
4.5. Tabelas de dados para os ensaios de compressão longitudinal e transversal.....	103
4.6. Histogramas para os dados de compressão longitudinal e transversal.....	107
4.7. Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para os dados de compressão longitudinal e transversal.....	109
4.8. Tabelas de dados para os ensaios de cisalhamento longitudinal e transversal.....	113
4.9. Histogramas para os dados de cisalhamento longitudinal e transversal.....	115
4.10. Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para os dados de	



4.10. Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para os dados de compressão longitudinal e transversal.....	117
5. DISCUSSÕES.....	121
5.1. Comentários preliminares relativos às tabelas dos valores do limite de resistência à tração longitudinal, transversal e módulo de elasticidade; compressão e cisalhamento longitudinal e transversal.....	121
5.1.1. Com relação à natureza dos dados que serão analisados	121
5.1.2. Com relação à dispersão dos valores.....	121
5.1.3. Com relação ao σ_t e E (0°) $\gg$ σ_t e E (90°) e ao σ_c (0°) $\gg$ σ_c (90°).....	122
5.1.4. Comparação dos valores médios do limite de resistência à tração, compressão e cisalhamento em ordem decrescente para os diversos códigos.....	123
5.2. Comentários relativos aos histogramas apresentados para os limites de resistência à tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal.....	125
5.3. Comentários relativos às curvas de distribuição de probabilidade de Weibull.....	126
5.3.1. Com relação ao módulo de Weibull (m).....	126
5.3.2. Com relação à determinação do intervalo de 90° de confiança.....	126



5.4. Análise estatística dos dados para tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal.....	131
5.4.1. Comparação dos dados entre os ângulos.....	132
5.4.2. Comparação dos dados entre os códigos.....	142
6. CONCLUSÕES.....	149
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICES.....	161



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Material compósito sob esforço de compressão longitudinal	6
Figura 2 -	Classificação dos materiais compósitos ⁹	8
Figura 3 -	Curva tensão-deformação de fibras ⁶	16
Figura 4 -	Empacotamento hexagonal e cúbico de fibras unidirecionais ¹	24
Figura 5 -	Efeito do v_f sobre o espaçamento entre as fibras ¹	25
Figura 6 -	Papel de probabilidade de Weibull	50
Figura 7 -	Corpo de prova para ensaio de tração longitudinal, dimensões em mm	56
Figura 8 -	Corpo de prova para ensaio de tração transversal, dimensões em mm	56
Figura 9 -	Corpo de prova para ensaios de compressão longitudinal e transversal, dimensões em mm	57
Figura 10 -	Corpo de prova para ensaios de cisalhamento longitudinal e transversal, dimensões em mm	58
Figura 11 -	Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código A	73
Figura 12 -	Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código B	74

Figura 13 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código C	75
Figura 14 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código D	76
Figura 15 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código E	77
Figura 16 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código F	78
Figura 17 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código G	79
Figura 18 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código H	80
Figura 19 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código I	81
Figura 20 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a tração para o código J	82
Figura 21 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código A	83
Figura 22 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código A	84
Figura 23 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código B	85



Figura 24 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código B	86
Figura 25 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código C	87
Figura 26 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código C	88
Figura 27 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código D	89
Figura 28 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código D	90
Figura 29 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código E	91
Figura 30 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código E	92
Figura 31 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código F	93
Figura 32 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código F	94
Figura 33 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código G	95
Figura 34 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código G	96

Figura 35 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código H	97
Figura 36 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código H	98
Figura 37 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código I	99
Figura 38 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código I	100
Figura 39 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código J	101
Figura 40 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código J	102
Figura 41 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a compressão para o código A	107
Figura 42 - Histogramas dos valores dos limites de resistência a compressão para o código B	108
Figura 43 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código A	109
Figura 44 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código A	110
Figura 45 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código B	111



Figura 46 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código B	112
Figura 47 - Histogramas dos valores dos limites de resistência ao cisalhamento para o código B	115
Figura 48 - Histogramas dos valores dos limites de resistência ao cisalhamento para o código C	116
Figura 49 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código B	117
Figura 50 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código B	118
Figura 51 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código C	119
Figura 52 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código C	120
Figura 53 - Determinação do limite de confiança de 90% a partir da curva de Weibull	127
Figura 54 - Influência da fração volumétrica das fibras no limite de resistência médio à tração longitudinal	144
Figura 55 - Influência da fração volumétrica das fibras no limite de resistência médio à tração transversal	145
Figura 56 - Curva fator concentração de tensão ao cisalhamento x fração volumétrica das fibras	148



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades mecânicas das fibras de carbono	13
Tabela 2 -	Porcentagem de decréscimo na resistência ao cisalhamento interlaminar ⁸	30
Tabela 3 -	Comparação entre as distribuições Normal e de Weibull ⁵	39
Tabela 4 -	Frações volumétricas (v_f) das fibras	60
Tabela 5 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código A	61
Tabela 6 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código B	61
Tabela 7 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código C	62
Tabela 8 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código D	63
Tabela 9 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código E	63
Tabela 10 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código F	64
Tabela 11 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código G	64



Tabela 12 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código H	65
Tabela 13 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código I	65
Tabela 14 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código J	66
Tabela 15 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código A	67
Tabela 16 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código B	68
Tabela 17 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código C	68
Tabela 18 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código D	69
Tabela 19 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código E	69
Tabela 20 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código F	70
Tabela 21 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código G	70
Tabela 22 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código H	71



Tabela 23 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código I	71
Tabela 24 -	Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código J	72
Tabela 25 -	Valores do limite de resistência à compressão longitudinal para o código A	103
Tabela 26 -	Valores do limite de resistência à compressão longitudinal para o código B	104
Tabela 27 -	Valores do limite de resistência à compressão transversal para o código A	105
Tabela 28 -	Valores do limite de resistência à compressão transversal para o código B	106
Tabela 29 -	Valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal para o código B	113
Tabela 30 -	Valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal para o código C	113
Tabela 31 -	Valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal para o código B	114
Tabela 32 -	Valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal para o código C	114
Tabela 33 -	Classificação em ordem decrescente dos valores do limite de resistência médio a tração	123



Tabela 34 - Classificação em ordem decrescente dos valores do limite de resistência médio a compressão	124
Tabela 35 - Classificação em ordem decrescente dos valores do limite de resistência médio ao cisalhamento	124
Tabela 36 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à tração longitudinal	128
Tabela 37 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à tração transversal	129
Tabela 38 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à compressão longitudinal	129
Tabela 39 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à compressão transversal	130
Tabela 40 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal	130
Tabela 41 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal	130



Tabela 42 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código A	133
Tabela 43 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B	133
Tabela 44 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código C	134
Tabela 45 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código D	134
Tabela 46 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código E	135
Tabela 47 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código F	135
Tabela 48 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código G	136
Tabela 49 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código H	136
Tabela 50 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código I	137
Tabela 51 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código J	137
Tabela 52 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código A	139



Tabela 53 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B	139
Tabela 54 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B	141
Tabela 55 -	Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código C	141
Tabela 56 -	Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos, que indicam a fração volumétrica das fibras, contidas no material	143
Tabela 57 -	Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos, que indicam a fração volumétrica das fibras, contidas no material	146
Tabela 58 -	Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos, que indicam a fração volumétrica das fibras, contidas no material	147

LISTA DE SÍMBOLOS

r = raio das fibras

R = espaçamento centro a centro das fibras

s = espaçamento entre fibras

V_v = volume de vazios

V_f = volume de fibras

V_m = volume da matriz

M_c = massa do compósito

M_f = massa da fibra

M_m = massa da matriz

m_f = razão mássica da fibra

m_m = razão mássica da matriz

v_v = fração volumétrica de vazios

v_f = fração volumétrica de fibras

v_m = fração em volumétrica da matriz

ρ_c = massa específica do compósito

ρ_f = massa específica das fibras

ρ_t = massa específica teórica do compósito

ρ_m = densidade da matriz



l_i = limite inferior da classe

L_i = limite superior da classe

i = número de classes

$\bar{x}$ = média aritmética

s_x = desvio padrão

s^2 = variância

cv = coeficiente de variação

β = parâmetro de forma para distribuição de Weibull

θ = parâmetro de escala

m, n = tamanho da amostra

μ = média da população

P = probabilidade de falha

t = tempo

x = variável aleatória

f.d.p. = função densidade de probabilidade

r_j = *median rank*

j = *rank order number*

σ = limite de resistência

$\sigma_{\parallel}$ = tensão aplicada paralela às fibras

σ_t = limite de resistência à tração

σ_c = limite de resistência à compressão

τ_r = limite de resistência ao cisalhamento



τ_{12} = tensão de cisalhamento aplicada paralela às fibras

τ_{21} = tensão de cisalhamento aplicada perpendicular às fibras

E = módulo de elasticidade

r = coeficiente de correlação

C I = fibra de carbono tipo I

C II = fibra de carbono tipo II



CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A meta final de qualquer pesquisa não é a objetividade, mas a verdade.

Helene Deutsch
(1884-1982)

1.1 - Considerações gerais

Materiais compósitos tem proporcionado uma rentável área para pesquisa acadêmica sobre uma ampla faixa de problemas, de falhas de fibras e matriz, superfície adesiva entre os componentes, exposição a ambientes agressivos, fratura e propriedades de resistência de materiais, como no caso do presente trabalho de pesquisa. Já existe a proliferação de tipos químicos e físicos de reforços e matrizes e modos de emprego do mesmo.¹

O material da matriz considerado será limitado à resinas termofixas (exclusivamente à resina epoxi) apesar do fato que a combinação destas e reforços de fibras não poderem ser empregadas acima de aproximadamente 200°C, elas são disparadamente as mais usadas como matriz.²

Em sistemas compósitos de alta performance resinas termofixas constituem a mais importante classe do material da matriz. É primordial ter também em mente fatores como tipos, proporções e configurações das fibras de reforço levando em consideração os aspectos de impregnação da mesma.



Uma das principais funções da matriz em materiais compósitos pode ser descrita como: a) manter a fase reforço no lugar; e b) sob força aplicada, deformar e distribuir as tensões para os constituintes do reforço.³

Já as fibras possuem como principal função em um compósito, distribuir o carregamento na direção das fibras do reforço.

Conceitos estatísticos são largamente empregados, uma vez que os materiais normalmente não satisfazem o ideal de materiais homogêneos e isotrópicos, quando se faz previsões de suas propriedades. Aplicações de métodos probabilísticos e estatísticos torna agora possível a seleção e performance de materiais.⁴

O comportamento de materiais baseados em testes é descrito pela média, ou por valores médios e desvio-padrão, que representa o grau de variação nas medidas do limite de resistência dos materiais.

Por esta entre outras razões uma análise estatística se torna necessária, e a mais comum técnica empregada é o uso da função densidade de probabilidade de Weibull; que é frequentemente utilizada para analisar falha em materiais frágeis.⁵



1.2. Objetivos e Justificativa

Sendo os valores do limite de resistência considerados como sendo uma variável aleatória, neste trabalho, que envolve a análise de uma grande gama de dados de limite de resistência à tração, à compressão e ao cisalhamento, será realizado uma análise estatística com a apresentação de histogramas e curvas de Gauss com a apresentação de todos os parâmetros que se julguem necessário para que todas as informações contidas nos mesmos possam ser extraídas e melhor compreendidas.

Isto tudo com o intuito de se analisar as características de resistência do material compósito, segundo a função densidade de probabilidade biparamétrica de Weibull. Esta função nos fornece uma idéia sobre a fragilidade do material através do seu parâmetro de forma β .

Este trabalho de pesquisa foi realizado com o principal objetivo de elucidar e auxiliar um centro de pesquisas com reais necessidades da aplicação deste material em estruturas que exigem um alto grau de confiabilidade.

Foram realizados ensaios de tração, compressão e cisalhamento em amostras segundo as normas ASTM D 3039, ASTM D 3410 e um trabalho de pesquisa (IOSIPESCU SHEAR TEST FIXTURE SPECIMEN, AND ALIGNMENT TOOL WORKING DRAWINGS) desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Wyoming,



respectivamente, análise termogravimétrica para determinação do volume de fibras, resina e vazios foram realizados.

No capítulo 1 é apresentada uma idéia da importância do material compósito no contexto atual, como sendo um material que apresenta um mercado crescente para pesquisa acadêmica e também a nível industrial, devido às excelentes propriedades específicas que eles oferecem.

No capítulo 2 é realizado uma revisão bibliográfica onde o material é completamente caracterizado, desde a confecção dos componentes individuais (fibra e resina), até a sua performance final como um material compósito. Aspectos relativos às características de resistência em materiais compósitos são discutidos.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos experimentais realizados, tais como ensaios de tração, compressão e cisalhamento, sempre objetivando a caracterização da resistência do material.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, através da determinação de todos os parâmetros levantados por meio dos ensaios realizados no capítulo 3.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e no capítulo 6 são colocadas algumas sugestões para trabalhos futuros.



CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O que sabemos é uma gota.
O que ignoramos é um oceano.
Isaac Newton
(1643-1727)

2.1 - Aspectos gerais

O conceito de compósito pode estar relacionado com a combinação de dois ou mais materiais para proporcionar uma performance em serviço que é superior as propriedades dos materiais de forma individual.⁶

Um dos casos mais típicos de compósitos talvez seja aquele no qual um aditivo constituinte contenha as fibras ou partículas embebidas em uma matriz. É importante ressaltar que constituintes de reforços ou aditivos usados na confecção de materiais estruturais, geralmente suportam a maior parte do carregamento ou lhe atribuem propriedades dominantes.⁷

Por outro lado, o conceito de reforçamento por fibras não é o de usar as mesmas como obstáculos em uma matriz para modificar suas propriedades, mas, sim, o de usar a matriz como um meio de cimentar e transferir a carga aplicada às fibras. Assim, usa-se a capacidade das fibras de suportar altíssimas cargas .

É de extrema importância salientar que a fase descontínua comumente são os reforços e a fase contínua é chamada de matriz.³

Fibras de carbono possuem alta resistência e alto módulo mas normalmente são muito finas, com diâmetros na faixa de 7-15 μm , sendo usualmente muito frágeis.⁶



Plásticos podem ser dúteis ou frágeis tendo considerável resistência à ambientes químicos. Pela combinação de fibras e resina um material é produzido com a resistência e dureza próximos às das fibras e com a resistência química dos plásticos. É também possível adquirir considerável resistência à propagação de trincas e capacidade de absorver energia durante a deformação.⁸

Materiais compósitos são reforçados com fibras orgânicas e inorgânicas. São exemplos de orgânicas as fibras feitas de polipropileno, nylon e grafite que podem ser caracterizadas como fibras de baixo peso, flexíveis, elásticas (exceto as de grafite), e sensíveis ao calor. A figura 1 ilustra um compósito fibra de carbono/resina epoxi sob esforço de compressão longitudinal.



Figura 1 - Material compósito sob esforço de compressão longitudinal ⁴⁰

Já fibras inorgânicas como aço, vidro, tungstênio, cerâmica em geral podem ser descritas como sendo resistentes ao calor, mais rígidas ou duras que as fibras orgânicas, resistentes à fadiga; mas possuem um aspecto de baixa absorção de energia. Fibras orgânicas são mais recomendáveis que fibras inorgânicas para serem empregadas como materiais para reforço.⁹

Um dos objetivos principais do desenvolvimento de materiais compósitos é combinar características desejáveis de dois materiais em um simples material multifase, objetivando sempre um aumento da adesão interfacial, o que torna o carregamento mais efetivo.

O interesse em materiais compósitos pode ser explicado pela obtenção de fatores como: alto módulo de elasticidade em filamentos contínuos, desenvolvimento de materiais-matrizes com elevada dureza, tenacidade e resistência à temperatura e ainda o uso de materiais laminados que tem propriedades satisfatórias ao projeto desejado.⁷ Esta é a principal razão do feitiço de compósitos fibrosos e laminados.

No momento, materiais compósitos são considerados de último estado de arte, e encontram múltiplas aplicações convencionais. Em aeronaves o peso total da estrutura é de elevada importância para o custo total da operação, isto porque a redução de peso pode diminuir o consumo de combustível ou resultar no aumento da carga útil.⁸



2.2 -Classificação dos materiais compósitos

A geometria do material de reforço influencia fortemente a resistência dos compósitos. Logo, é possível estabelecer de forma aceitável uma classificação para estes materiais com base na geometria de seus filamentos ou reforços, conforme mostra a figura 2. Este é um fato de certa importância, por serem as propriedades dos compósitos fortemente influenciadas pelas propriedades dos seus elementos constituintes, como por exemplo concentração, orientação, distribuição das fibras e geometria do filamento tal como forma e tamanho.³

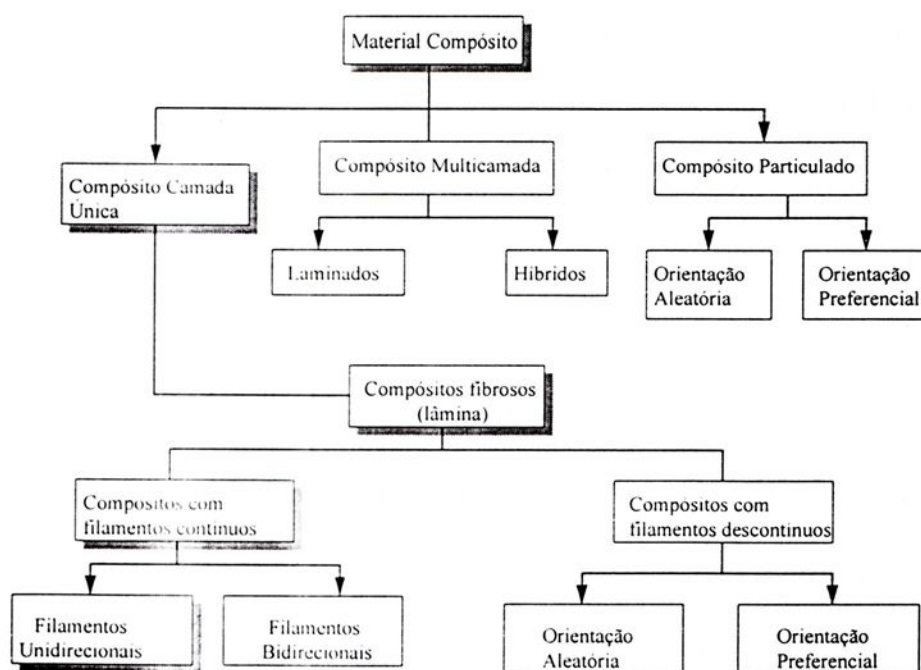


Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos⁹

2.3 -Compósitos fibrosos

A principal função das fibras em materiais reforçados é distribuir o carregamento, e por sua vez conferir dureza e resistência aos mesmos. Na verdade, o termo fibra foi sugerido pela ASTM para designar qualquer material de forma alongada com uma relação comprimento-dimensão de 10:1, uma área máxima de seção de $5,1 \cdot 10^{-4} \text{cm}^2$ e uma dimensão máxima transversal de 0,0254 cm. O termo *filamento* simplesmente significa fibras contínuas em compósitos e o termo *wire* é comumente reservado para filamentos metálicos. Por outro lado, fibras retangulares com relação largura-espessura, com no mínimo 4:1 são chamadas *ribbon*.⁸ A razão de se usar fibras longas em compósitos é devido ao fato de serem inerentemente mais duras e resistentes do que o material em forma de massa.⁶ Desde então, a geometria das fibras é de grande importância no controle da resistência do material compósito. Isto é proveniente do fato de que defeitos internos, comuns no material na forma de massa, serem quase que totalmente eliminados do material quando convertido para forma de fibras.

Outro tipo de fibra existente é chamada de *whiskers*, e ela tem a proporção comprimento-diâmetro muito menor do que as demais e deve ser apresentada em quantidade.⁷ Na verdade, ela é muito menor do que os outros tipos de fibras, e por possuir estrutura mais simples quase não apresenta defeitos internos, imperfeições ou falhas.



Geralmente, fibras não são usadas diretamente em aplicações de engenharia devido à pequena área de sua seção transversal.³ Porém, quando são embebidas em uma matriz para formar camadas simples ou compósitos fibrosos, elas alcançam convenientemente seus objetivos. O propósito da matriz é manter as fibras juntas, transferir carga para as mesmas, protegê-las contra ataques do meio e danos devido ao manuseio.⁹

Existem compósitos reforçados com fibras contínuas e descontínuas, sendo que se os mesmos forem reforçados com fibras descontínuas, a função transferência de carga da matriz é mais crítica do que em compósitos com fibras contínuas. Esta última classe tem se tornado a mais importante, também como capazes de atingir alta resistência.¹⁰

2.4 - Fibras de carbono

As fibras de carbono podem ser manufaturadas por vários métodos, dependendo do material inicial (matéria-prima) e as características das fibras produzidas são fortemente influenciadas pela técnica de manufatura empregada.⁸

Os precursores da poliacrilonitrila (PAN) são a base para a grande maioria das fibras de carbono comercialmente disponíveis. Eles fornecem uma conversão para fibras de carbono na ordem de 50 a 55%.

Estes precursores podem ser termicamente rearranjados antes da decomposição térmica, permitindo sua oxidação e estabilização antes do processo



de conversão em fibras de carbono; enquanto mantém a mesma configuração filamentar.¹¹

A composição química dos precursores da PAN define as características térmicas que o material exibe através das etapas de oxidação/estabilização do processo de conversão. Estas características térmicas influenciam as seqüências do processo que são usadas para converter os precursores da PAN em fibras de carbono.

Fibras de carbono baseadas na PAN como precursor geralmente apresentam um maior limite de resistência à tração do que fibras baseadas em qualquer outro precursor. Isto se deve à falta de defeitos superficiais que agem como concentradores de tensões e, por sua vez, reduzem o limite de resistência.¹²

2.4.1 - Processos de conversão das fibras de carbono

Cada categoria de precursor requer diferentes técnicas de processamento, mas normalmente os processos de conversão dos precursores para fibras de carbono seguem a seguinte seqüência: estabilização, carbonização e grafitização, que estão detalhados abaixo:

A) Estabilização - é colocada em prática em temperaturas inferiores à 400°C em várias atmosferas. As fibras frequentemente são tensionadas durante este estágio



do processo para melhorar a orientação da estrutura molecular e aumentar o módulo de elasticidade e a resistência da fibra de carbono.

B) Carbonização - é realizada em temperaturas na faixa de 800 à 1200°C. As fibras estabilizadas são pirolizadas em ambientes inertes para reduzir seu nível de impureza e aumentar sua cristalinidade. As fibras podem ser encolhidas ou extendidas nesta etapa. Como na estabilização, qualquer melhora na orientação geralmente ocasiona uma melhora no módulo de tensão; se esta orientação aumentar e não produzir defeitos superficiais, a resistência à tensão também aumentará.

C) Grafitização - nesta etapa é realizada uma pirólise adicional, numa temperatura de 200° C em ambientes inertes. Esta etapa também reduz o nível de impurezas e estimula o crescimento dos cristais. Para todos os precursores, as mais altas temperaturas são usadas nas etapas de carbonização e grafitização, para se obter um módulo de elasticidade mais elevado para as fibras de carbono.¹¹

Etapas adicionais podem produzir melhores resultados no tocante às fibras de carbono produzidas. Por exemplo, em fibras carbonizadas/grafitizadas, para controlar a interação entre fibras e a matriz de reforço; especificamente no caso de fibras de carbono e resina epoxi, as propriedades do compósito podem beneficiar a performance em cisalhamento do laminado com o aumento dos grupos amina e hidroxila na superfície da fibra.¹¹



Tabela 1 - Propriedades mecânicas das fibras de carbono (valores de catálogo)

Propriedades	Unidades	
Resistência à tração	GPa	3400
Módulo de elasticidade	MPa	238
Massa específica	g/cm ³	1,77

Estas fibras são extremamente finas, duras e fortes e são de pouco valor prático como materiais de engenharia. Porém, elas podem ser convertidas para materiais usuais mecânica e estruturalmente, pela combinação dos mesmos com uma matriz desejável para formar um compósito⁸. As propriedades das fibras de carbono utilizadas no trabalho estão apresentadas na tabela 1.

Na verdade, fibras de carbono, que são fibras pretas e finas, oferecem uma excelente performance em compósitos e algumas de suas principais características, serão sucintamente descritas à seguir:

Materiais compósitos com fibras de carbono são extremamente resistentes, duros e leves e sua performance específica é superior a dos metais e outros materiais estruturais, com as fibras apresentando excelente comportamento à fadiga.⁹

Quando a máxima tensão é atingida, os compósitos com fibras de carbono falham de repente pelo desenvolvimento de trincas na direção transversal à direção das fibras, ou por cisalhamento interlaminar. Esta alta resistência é largamente insensível às elevações de tensão.

Um importante critério para as fibras de carbono não são suas propriedades, mas propriamente as propriedades e a performance do compósito

em que as fibras de carbono são usadas como reforços. Entretanto as propriedades da fibra servem somente como um guia de qualidade e como uma indicação do potencial para as estruturas compostas.⁸

2.4.2 - Propriedades das fibras de carbono

2.4.2.1 - Propriedades específicas

O mais importante fator a atingir o rápido desenvolvimento do material compósito é a economia de massa, a qual pode ser realizada com o uso de fibras de baixa massa específica e de alto módulo de elasticidade e resistência. O módulo específico de Young e a resistência específica à tração são definidos como a medida do módulo de elasticidade e da resistência dividido pela massa específica, respectivamente.⁶

Por comparação, o módulo específico do aço é 27 e a resistência específica é 0,2 na mesma unidade das fibras, entretanto, a comparação não é inteiramente justificada, porque tem que ser incorporada à resina, a fração de volume da fibra que normalmente é de 70%.

As propriedades mecânicas de um material compósito alinhado são menores transversalmente às fibras quando comparadas paralelamente às mesmas.⁶



2.4.2.2 - Estabilidade térmica

Na ausência de ar e outras atmosferas oxidantes, fibras de carbono possuem propriedades excepcionalmente boas à altas temperaturas e retêm suas propriedades superiores, bem acima de 2000°C; entretanto para aplicações utilizando matrizes poliméricas estas propriedades não podem ser utilizadas, porque os polímeros perdem suas propriedades acima de 200°C.⁶

2.4.2.3 - Propriedades compressivas

Estas propriedades são difíceis de se medir e somente podem ser deduzidas dos materiais compósitos fabricados com fibras. É encontrado na literatura que rigidez em compressão é igual rigidez em tração.⁸ Geralmente as fibras possuem maior resistência à tração do que à compressão, isto se deve ao fato de que na tração as forças são para vencer as ligações covalentes e na compressão fracas ligações de pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals, o que implica dizer que fibrilações e escoamento podem ocorrer.⁶

2.4.2.4 - Fratura e flexibilidade da fibra

A curva tensão-deformação mostrada na figura 3 sugere que em tração todas as fibras fraturam de maneira frágil sem escoar. Fibras de carbono e de vidro



são quase que completamente frágeis e fraturam sem qualquer redução de área na seção transversal em contraste com o kevlar, que fratura de maneira dútil, apresentando uma estrição pronunciada antes da fratura e a separação final ocorre após uma grande quantidade de estiramento total. A fratura frequentemente envolve fibrilação das fibras.⁶

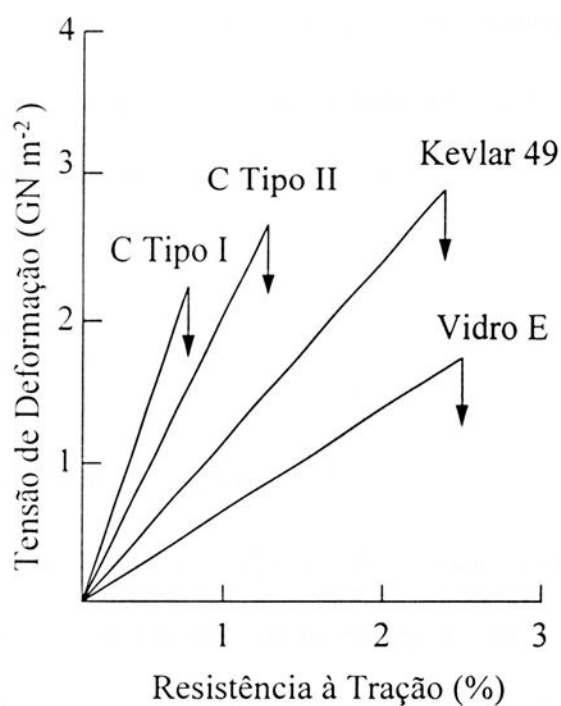


Figura 3 - Curvas de tensão-deformação de fibras⁶

O diâmetro da fibra tem um grande efeito sobre a facilidade com a qual elas podem ser curvadas. Ligações de fibras podem produzir altas resistências compressivas superficiais e também na resistência à tração, e uma breve ação de curvar é suficiente para causar tensão de fratura, a região compressiva da fibra

solicitada não resiste ao desenvolvimento da banda de deformação. Isto resulta na deformação permanente da fibra.⁶

É importante salientar que as fibras de carbono foram desenvolvidas principalmente para atender as necessidades das construções aeronáuticas, proporcionando um material com pouco peso, com resistência e rigidez específica superiores daqueles oferecidos por metais e ligas. Antigamente as aplicações eram concentradas quase que exclusivamente para as indústrias aeronáutica e aeroespacial, onde as vantagens da sua performance e a economia de peso justificavam o uso do material e o custo da manufatura.⁸

2.5 - Matrizes ou resinas

Os principais objetivos da matriz são:¹³

- suportar e proteger as fibras no compósito. Na verdade, a matriz é considerada uma fase contínua e comumente possui menor módulo, massa específica e resistência do que a fase descontínua ou fibras. O produto ou o compósito (fibra/resina), já possui alta resistência e dureza, mas mantém a sua menor massa específica.
- elas provém de uma média através da qual a carga é transferida para as fibras na medida que elas possam desempenhar satisfatoriamente sua função no compósito.¹⁴



Dependendo da estrutura química da resina e do agente de cura, e da disponibilidade dos numerosos reagentes modificadores e das condições de cura, é possível obter tenacidade, resistência química e à solventes, resposta mecânica que varia da extrema flexibilidade à uma elevada resistência e dureza, resistência à fluência e fadiga e uma excelente adesão para a maioria das fibras.¹¹

Nenhum subproduto é formado durante a cura. Encolhimento que é devido à baixa cura e resina incurada, tem uma variedade de formas físicas, que varia de líquidos com baixa viscosidade até sólidos não adesivos que, combinados com uma ampla seleção de agentes de cura, proporciona ao fabricante do material compósito uma ampla faixa de condições de processo.¹¹

A resina epoxi, devido às suas excelentes características de adesão e molhamento, não requer altas pressões para laminação.⁶

Grandes esforços tem sido feitos na investigação em novos materiais que possam ser usados como matrizes, mas até agora, os que tem sido mais amplamente empregados são os polímeros.

Os polímeros podem ser classificados em duas classes distintas: as resinas **termoplásticas** e as resinas **termofixas**. No presente trabalho será abordado somente as resinas termofixas, mais especificamente a resina epoxi, visto que é parte integrante do material compósito em estudo.



2.5.1 - Resinas termofixas

Estão correntemente em uso e incluem as resinas epoxi, fenólicas, poliéster, poliimida, silicones e outras resinas termoeestáveis. As principais características destas resinas podem ser sintetizadas como: fácil processamento, boas propriedades e alta resistência ao meio. Possuem também boa resistência química, à chama e ao aquecimento.¹⁵

RESINA EPOXI: contém um ou mais grupos epoxídicos, e nesses polímeros termofixos a resina líquida pode ser convertida num sólido duro e frágil por ligações cruzadas, as quais levam a formação de uma ligação resistente na rede tridimensional de cadeias poliméricas. As propriedades mecânicas dependem da unidade molecular, combinando a rede, o comprimento e a densidade da ligação cruzada. Pode se dizer que curas com uma ou mais temperaturas com tempos pré-determinados, levam à ótimas ligações cruzadas e consequentemente ótimas propriedades.⁶

Um tratamento final pós-cura a uma temperatura relativamente alta é frequentemente realizado para minimizar alguma cura posterior e mudanças de propriedades durante o serviço. Estas propriedades estão sujeitas a uma grande variação dependendo do sistema químico e das condições de cura. As resinas termofixas são usualmente isotrópicas, e sua característica mais marcante é a resposta ao calor, pois elas não fundem com o aquecimento. Resinas epoxi são geralmente superiores as resinas poliéster, entretanto outras resinas podem ser



utilizadas, por serem mais estáveis à altas temperaturas, tais como as poliamidas aromáticas e a poliimidas.¹¹

A resina epoxi tem resistência e propriedades elásticas superiores, com baixa contração na cura e baixo coeficiente de expansão térmica. A resistência da ligação na interface entre resina e fibra é mais alto para o sistema epoxi, entretanto tem a desvantagem da alta viscosidade antes da cura e do alto custo.⁶

Resinas termofixas são normalmente consideradas como sólidos frágeis e é de suma importância mencionar que geralmente as resinas epoxi não produzem água na condensação durante a polimerização, produzindo por sua vez um laminado livre de defeitos.⁶ Suas aplicações são limitadas para compósitos bobinados e laminados.

2.6 - Método de manufatura

Existe um grande número de processos sendo utilizados hoje para fabricar produtos compósitos. Cada processo tem certas vantagens no tocante à aspectos econômicos, de produção e performance e cada um deve ser cuidadosamente considerado em seu estágio de produção. Os métodos podem ser divididos em duas categorias: processos que envolvem o uso de pressão ou processos que não utilizam pressão.⁶ Será descrito agora o processo utilizado para a confecção do material em estudo.



FILAMENT WINDING : utiliza-se neste método filamentos contínuos de fibras que são enrolados contra um molde de formato adequado. Quando *rovings* (fibra de vidro) ou *tow* (carbono) são alimentadas através de um banho de resina, isto recebe o nome de *wet winding*. Estes filamentos são alimentados em cilindros, depois enrolados e, usando uma máquina com controle programado, enviados para um mandril com ângulos pré-determinados. A resina é parcial ou completamente curada antes da remoção do componente, usualmente um tubo, do mandril.¹⁶

O sucesso deste entre outros processos depende do completo molhamento das fibras pela resina, que por sua vez depende da viscosidade da resina e da superfície de tensão da interface entre resina e fibra.¹⁷ Em materiais compósitos, quando existe uma grande fração volumétrica de fibras de pequenos diâmetros os espaços entre as fibras são muito pequenos; logo o molhamento requer longos tempos de exposição e altas pressões.⁶

Por outro lado, reforços pré-impregnados, tais como tiras pré-impregnadas, podem ser usados e este são chamados *dry winding*. É importante mencionar que existem vários tipos de moldes dependendo da configuração empregada, tais como, sólidos, segmentados, solúveis e outros.¹¹

Máquinas de *filament winding* podem ser de dois tipos: *helicoidal winding* e *polar winding*, sendo que no último, é possível orientar os filamentos ao longo da direção máxima de tensão, o que significa que completas vantagens de resistência dos filamentos foram tomadas e entretanto, usadas de uma maneira eficiente.⁶



2.7 - Análise micromecânica

No capítulo anterior foi salientado que a maioria das propriedades dos materiais compósitos fibrosos estão fortemente relacionadas aos parâmetros microestruturais como diâmetro, distribuição do comprimento, volume em fração, alinhamento e empacotamento das fibras,⁶ e que também são bastante influenciadas pelas propriedades das matérias-primas que as formam e pela interação entre as mesmas.⁹

Logo, propriedades importantes no compósito como rigidez e resistência, podem ser obtidas simplesmente pela variação da fração volumétrica dessas matérias-primas.¹¹

Considerações importantes podem ser vistas no tocante a compósitos laminados unidirecionais, onde as fibras estão alinhadas paralelamente. Em uma situação ideal e, para propósitos de análises teóricas, as fibras podem ser consideradas como sendo arranjadas em um retículo quadrado ou hexagonal, possuindo uma seção transversal circular e de mesmo diâmetro. As fibras de carbono, embora apresentem aproximadamente seção circular, podem ter muitas superfícies irregulares.⁶

Nesta análise, dar-se-á uma atenção especial aos constituintes que formam o material em estudo, ou seja, fibras de carbono e resina epoxi. Pode-se afirmar que as propriedades variam de “ponto para ponto” e nesse caso o compósito é



considerado heterogêneo, sendo examinado ou analisado em uma escala microscópica.⁹

Um dos objetivos principais da análise micromecânica é a determinação das propriedades mecânicas em termos dos elementos constituintes do material compósito, assim como as proporções relativas das fibras de carbono e da resina epoxi. Para o desenvolvimento desse estudo as seguintes hipóteses foram assumidas:

- a lâmina é elástica e livre de tensões internas e térmicas;
- as fibras são uniformes nas propriedades e diâmetros, contínuas, paralelas no compósito e regularmente espaçadas;
- a matriz é considerada homogênea, isotrópica e apresenta comportamento linear elástico, e há uma perfeita ligação entre a fibra e matriz bem como ausência de vazios.⁹

Existe alguma variação no diâmetro para todos os tipos de fibras que é função dos procedimentos de processamento.

Para um arranjo ideal a fração volumétrica das fibras v_f é relacionado ao raio das fibras e pelo afastamento entre elas:

$$v_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \text{ hexagonal} \quad (1)$$

$$v_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad \text{cúbico} \quad (2)$$

onde, $2R$ é o espaçamento centro a centro das fibras como mostra a figura 4

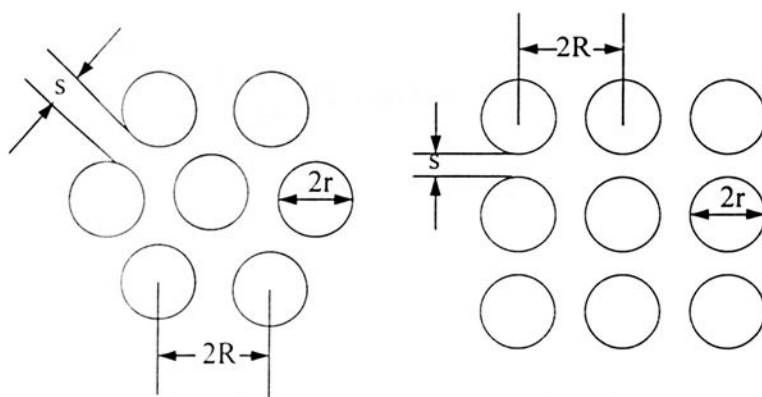


Figura 4 - Empacotamento hexagonal e cúbico de fibras unidirecionais¹

O valor máximo, de v_f ocorrerá quando as fibras se tocarem, isto é, $r = R$.

Para uma rede hexagonal $v_{f\max} = 0,907$ e para uma rede cúbica $v_{f\max} = 0,785$. A

separação das fibras s varia com v_f , da seguinte forma:

$$s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}v_f} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] r \quad (3)$$

$$s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{4v_f} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] r \quad (4)$$

Estas equações são representadas graficamente na figura 5, a seguir:

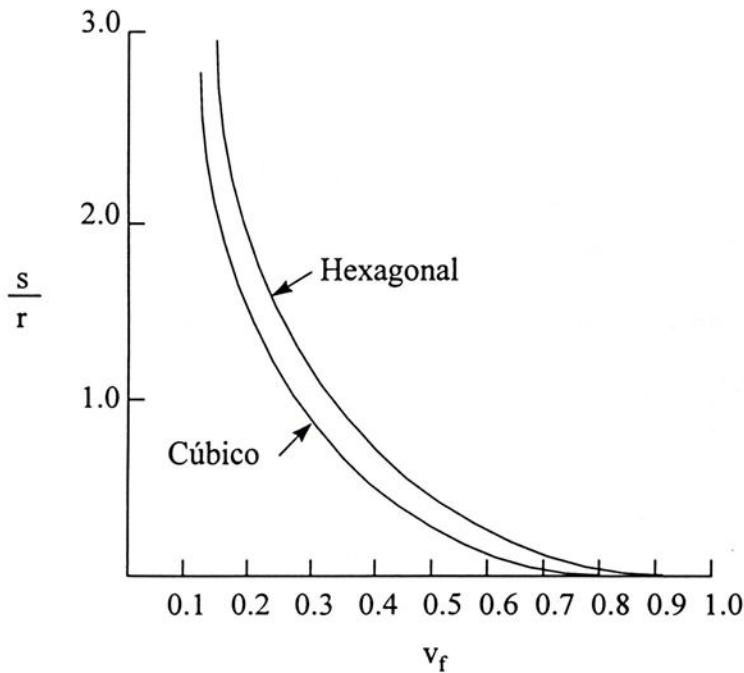


Figura 5 - Efeito do v_f sobre o espaçamento entre as fibras⁶

2.7.1 - Massa específica do compósito

A maioria dos cálculos em materiais compósitos são baseados na determinação das proporções dos componentes, em termos das proporções relativas, entre a matriz e o reforço no material compósito. Essa proporção relativa pode ser obtida em termos de fração em massa ou fração em volume dos constituintes presentes.

A fração em peso pode ser obtida durante a fabricação da peça ou através de métodos experimentais, onde os corpos de prova são retirados após a fabricação.⁹ É importante ressaltar, que a fração em volume é de maior utilidade nas análises teóricas, entretanto uma relação entre ambas se torna necessária.

Será considerado o volume da peça confeccionada do material compósito como V_c , que contém fibras de mesmo diâmetro de volume V_f , matriz de volume V_m e que inclui volume de vazios V_v , com massas correspondentes M_c , M_f e M_m . Onde os subscritos **c**, **f**, **m** e **v**, indicam compósito, fibra, matriz e vazios, respectivamente.

Podemos fazer a seguinte consideração:

$$M_c = M_f + M_m \quad (5)$$

e

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (6)$$

Para que se possa obter as proporções relativas de matriz e de fibras (frações em massa ou fração em volume) como foi citado anteriormente, é necessário se dividir as equações (5) e (6) por M_c e V_c , portanto:

$$1 = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} \quad (7)$$

e

$$1 = \frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} + \frac{V_v}{V_c} \quad (8)$$

As frações em massa e em volume são definidas como:

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} \quad , \quad m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (9)$$

e

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad , \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad , \quad v_v = \frac{V_v}{V_c} \quad (10)$$

Desta forma, pode-se reescrever (7) e (8) da seguinte forma:

$$m_f + m_m = 1$$

ou

$$\frac{\sum M_i}{M_c} = \sum m_i = 1 \quad (11)$$

e

$$v_f + v_m + v_v = 1$$

ou

$$\frac{\sum V_i}{V_c} = \sum v_i = 1 \quad (12)$$

Para que relações de conversão entre as frações em massa e em volume sejam obtidas, torna-se necessária a obtenção da massa específica do compósito (ρ_c), onde a mesma pode ser obtida em termos da massa específica dos elementos constituintes (fibra de carbono e resina epoxi) e suas respectivas frações em massa e em volume.

A massa específica do compósito (ρ_c), pode ser escrita em função somente das frações em massa e em volume, advindo das equações (5) e (6) logo:

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} = \frac{1}{\frac{V_c}{M_c}} = \frac{1}{\frac{V_c}{M_c} + \frac{V_c}{M_c} + \frac{V_v}{M_c}}$$

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_v}{\rho_c}} \quad (13)$$

e

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_c}$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (14)$$

O valor de v_v chamado de fração de vazios é expresso por:

$$v_v = 1 - (v_f + v_m) \quad (15)$$

ou em termos de massa e massa específica através de (13) ,

$$v_v = 1 - \left(\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \right) \cdot \rho_c \quad (16)$$

sendo o ρ_c (massa específica do compósito), um valor medido.

É importante destacar que a massa específica obtida teoricamente é dada por:

$$\rho_t = \frac{1}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} \quad (17)$$

o que leva (16) também a ser escrita como:

$$v_v = 1 - \frac{\rho_c(\text{medido})}{\rho_t(\text{teorico})} \quad (18)$$

2.7.2 -Vazios

Judd & Wright,¹⁶ após a avaliação de uma grande quantidade de dados experimentais concluíram que, sem levar em consideração fatores como tipo de resina, tipo e superfície de tratamento da fibra, a resistência ao cisalhamento interlaminar de um material compósito decresce cerca de 7% para cada 1% de vazios, mas isto somente até uma quantidade de 4% de vazios; além disso a taxa de decréscimo diminui, como mostra a tabela 2:

Tabela 2 - Porcentagem de decréscimo na resistência ao cisalhamento interlaminar¹⁶

Material	Decréscimo (%)
Fibra de carbono/Epoxi	6 ± 4
Fibra de carbono/ Várias resinas	8

Levando em consideração que também outras propriedades são afetadas pela presença de vazios, em um material compósito é muito importante caracterizar o tipo e a quantidade de vazios; apesar do fato de que todos os métodos

experimentais utilizados para a quantificação possuam limitações e eficácia em torno de 0,5%.⁶

Decréscimo nas propriedades mecânicas são esperadas em ambos os aspectos, tanto pela teoria quanto pelos experimentos. Dentre as propriedades afetadas pode-se incluir resistência transversal, longitudinal e módulo de elasticidade, resistência à fadiga e resistência à oxidação.⁸

Excluindo grandes cavidades devido à defeitos na operação de manufatura, existem dois tipos básicos de vazios em materiais compósitos⁶:

- vazios ao longo das fibras individuais que podem ser esféricos ou alongados em cavidades elipsoidais paralelas às fibras. O diâmetro dos vazios estaria relacionado ao espaçamento das fibras e é tipicamente na faixa de 5-20 μm ;
- vazios entre lâminas e em grandes bolsas de resina.⁶

Vazios podem surgir devido a duas causas principais: a primeira delas é o molhamento incompleto das fibras pela resina, o que resulta um aprisionamento de ar, que é mais acentuado em sistemas onde as fibras secas estão muito próximas uma das outras (pequeno espaçamento) e a viscosidade da resina é alta. A segunda delas é a presença de produtos voláteis produzidos durante o ciclo do processo de cura em resinas termofixas. Estes produtos voláteis podem incluir solventes, produtos de reação química ou frações de baixo peso molecular.¹⁵

A quantidade e distribuição de vazios depende da fração volumétrica e da distribuição das fibras, propriedades da resina, e condições do processo como temperatura, pressão e tempo. Eles são facilmente detectáveis em superfícies



polidas. Um outro método para se determinar a fração volumétrica de vazios (v_v) é a análise quantitativa, sendo que uma das mais utilizadas é a técnica das contagens de pontos em micrografias.⁶

2.8 - Seleção estatística de materiais

Quando materiais são selecionados, o fato de substâncias com propriedades variáveis estarem envolvidas, conduz a um estudo minucioso antes de sua utilização para quaisquer fins. Em algumas aplicações críticas, por exemplo, somente uma baixa incidência de falha pode ser tolerada para a vida esperada de um componente.

Aplicações de probabilidade e métodos estatísticos tornam possível uma teoria probabilística de seleção e performance de materiais. O risco de falha pode ser expresso como uma probabilidade que leva em consideração os efeitos de processos aleatórios de carga.¹⁸

Estes processos caracterizam o funcionamento do sistema de teste por si só ou por condições externas. Descrições estatísticas de comportamento de materiais levam em consideração fatores como: tratamento e fração volumétrica das fibras, condições de cura da resina, sistema resina/fibra empregado, entre outros parâmetros.



São necessários resultados de testes, nos quais estatísticas são desenvolvidas, sendo algumas dessas teorias utilizadas para desenvolver relações entre resultados dos testes.

A análise estatística tem por objetivo principal extrair as informações essenciais de um simples conjunto de dados e extrapolar estas para um contexto mais significativo, ou seja, que possa fornecer subsídios mais relevantes no tocante à população. Estas informações significam essencialmente medidas repetitivas de algum fenômeno simples.¹⁹

Num conjunto de dados existem muitos detalhes que devem ser assimilados rapidamente, mas para que isso seja concretizado é necessário que estes dados sejam condensados de forma a serem facilmente visualizados e compreendidos, de modo que não afetem a quantidade real de informações presentes. Geralmente esta descrição estatística toma uma forma gráfica.

Existem várias técnicas para condensar e descrever tais dados. Uma delas consiste em agrupar os dados em intervalos ou classes e contar o número de ocorrências dos valores em cada uma, onde é imprescindível conhecer algumas regras básicas, com resultados sendo expressos de diversas maneiras.¹⁹

Uma das formas gráficas mais simples de se representar estes dados é chamado de **histograma**, e é obtido diretamente pelos dados obtidos nos experimentos. Num histograma, por exemplo no eixo das abscissas são anotados os valores do limite de resistência e no eixo das ordenadas são anotados os valores das frequências (número de incidências dos valores do limite de resistência em



cada intervalo). A partir disto são levantados retângulos, onde a largura é proporcional ao intervalo e a altura é proporcional à frequência naquele intervalo. Histogramas são de fácil construção e interpretação.¹⁹

Como dito anteriormente ao se executar um estudo estatístico de dados é necessário que se conheça algumas regras básicas. Serão citadas a seguir algumas destas regras, com o intuito de oferecer um maior embasamento para o trabalho em questão.

- Dados brutos: são aqueles que ainda não foram numericamente organizados.
- Rol: é um arranjo de dados numéricos brutos em ordem crescente ou decrescente de grandeza.
- Intervalos e limites de classe: são os extremos de cada classe. O menor número é o limite inferior da classe (l_i) e o maior número, o limite superior da classe (L_i).
- Número de classes: para determinação do número de classes de uma distribuição podemos lançar mão da **Regra de Sturges**, que nos dá o número de classes em função do número de valores da variável:²⁰

$$i = 1 + 3,3 \cdot \log n \quad (35)$$

sendo:

i... número de classes;

n... número total de dados

Além da Regra de Sturges, existem outras fórmulas empíricas que pretendem resolver o problema da determinação do número de classes que deve ter a distribuição. Como observação deve ser citado que os intervalos de classes devem ser escritos, de acordo com a Resolução 886/66 do IBGE, em termos de **desta quantidade até menos aquela**, empregando, para isso, o símbolo $\vdash$ (inclusão de l_i e exclusão de L_i).²⁰

O estudo que foi feito sobre distribuições de frequência até agora permite descrever, de modo geral, os grupos dos valores que uma variável aleatória pode assumir. Existem também as chamadas medidas de posição, que servem para localizar a distribuição de frequências sobre o eixo de variação da variável aleatória em questão.¹⁸ O comportamento de materiais baseados em testes é descrito pela média ou valores médios e desvio-padrão, que representam o grau de variação nas medidas do limite de resistência de materiais por exemplo, produzem diferentes valores à medida que o teste de tração é repetido. Assim, o limite de resistência é uma **variável aleatória**.¹⁸

No caso de variáveis aleatórias, a curva geralmente assume a forma de uma curva normal ou Gaussiana. Em geral, quanto maior o tamanho da amostra, mais acurados serão os cálculos experimentais da média e desvio-padrão.²¹



Valores calculados da média e do desvio-padrão são estimativas ou aproximações dos valores teóricos que seriam obtidos se um número infinitamente grande de amostras fossem testadas. Para justificar esta diferença entre calculados e teóricos o valor médio calculado é chamado “valor médio de amostra”, $\bar{x}$ que é uma estimativa do valor médio teórico; matematicamente, o valor médio pode ser expresso como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (36)$$

sendo n o total de testes, e x_i representa a i -ésima observação, ou teste.

O valor calculado de desvio-padrão, s_x , é uma estimativa da dispersão, ou variação dos dados, e pode ser representado por:

$$s(x) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - 1} \quad (37)$$

É importante salientar que, se os dados representarem uma amostra e não toda a população, deverão ter **$n-1$** no denominador.²²

O coeficiente de variação da amostra, $cv(x)$, é uma medida adimensional da variação comumente utilizado em projeto probabilístico. O coeficiente de

variação é útil em avaliar a variação relativa dos dados de diferentes fontes. Um coeficiente de variação usualmente pequeno significa um material mais seguro.¹⁸

O coeficiente de variação é a razão entre o desvio-padrão e o valor médio:

$$cv(x) = \frac{s(x)}{\bar{x}} \quad (38)$$

Sua vantagem é caracterizar a dispersão dos dados em termos relativos ao seu valor médio.

2.9 - Aspectos estatísticos de resistência

Pode-se partir do princípio de que confiabilidade estrutural é a probabilidade na qual a resistência intrínseca de um material não exceda à tensão aplicada. Modelos estatísticos utilizados no estudo de falhas em materiais compósitos, quase sempre tem como ponto inicial a Teoria de Griffith; que estabelece que falhas reduzem a resistência e estão presentes dentro do mesmo, enfraquecendo-os.²³ Logo há uma distribuição de resistências quando submetemos vários corpos similares constituídos de um mesmo material, a uma mesma força, significando que diferentes intensidades são necessárias para a fratura.²⁴

O modelo que mais tem obtido sucesso, segundo os princípios acima, é o modelo do “anel mais fraco”, do qual se origina a distribuição de Weibull. Mas, o



modelo do encadeamento de falhas, representado pela distribuição de Gauss, também fornece resultados muito bons em alguns casos.²⁵

Uma outra questão que surge é aquela relacionada com os variados esforços a que pode ser submetido o material.

Dentro da teoria estatística temos recursos que nos possibilitam conhecer bem os parâmetros de uma determinada função de distribuição de probabilidades (f.d.p.), partindo do conhecimento de um conjunto de dados obtidos aleatoriamente, que seja descritível por tal função de distribuição.²⁴ Estes recursos estão contidos na “teoria de estimativa de parâmetros”.

No estudo aqui apresentado é necessário que esteja bem claro a diferença em se tornar evidente o que realmente é primordial, em termos dos dados que se tem em mãos e da distribuição (e todos seus parâmetros) a ser analisada.

Muitas vezes quando depara-se com um conjunto de dados, uma série de parâmetros estatísticos podem ser calculados, os quais definirão qual será a melhor distribuição a qual se aplicam os dados observados. Podem existir algumas vezes certas dúvidas, sobre o que realmente se deseja saber à partir da distribuição escolhida. Por exemplo, não se sabe se o que realmente interessa em uma determinada amostra é a resistência mínima ou a resistência média.²¹

Em projetos de engenharia ou mesmo em contratos de qualidade mínima de garantia, a teoria estatística que lida com a propriedade do mais baixo valor ou valores extremos é chamada de teoria dos valores extremos²⁴.



Dados de testes de fadiga ou ensaios estáticos apresentam resultados amplamente espalhados, ou seja, os valores observados apresentam uma notável variação; por este motivo curvas de distribuição de frequência são utilizadas. Tais curvas podem ser plotadas à partir de dados brutos ou dados tratados; no estudo em questão os dados serão sempre apresentados na forma logaritmizada ($\ln \sigma_t$ e $\ln \sigma_c$ e $\ln \tau_r$). O grande propósito dessa análise é o de estimar propriedades de uma população inteira à partir de uma porção da mesma. Já o método mais apropriado a ser utilizado depende do conhecimento ou da suposição do formato da distribuição de frequências da população.¹⁹

2.10 - Distribuição de resistência para compósitos

Duas formas básicas de distribuição são normalmente empregadas para se agrupar dados de resistência para compósitos. Comumente são a distribuição Normal e a distribuição de Weibull.²³ Uma comparação das diferenças essenciais Dados de testes de fadiga ou de ensaios estáticos apresentam resultados entre as duas distribuições e a relação entre os parâmetros essenciais de cada uma são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3 - Comparação entre as distribuições Normal e de Weibull²³

Distribuição	Função	Amplitude	Parâmetro de Forma
Normal	$\exp [-1/2 (x-\mu/s_x)^2]$	$-\infty$ a ∞	s_x
Weibull	$\exp [- (\sigma/\theta)^\beta]$	0 a ∞	β

Pierce²³ foi a primeira pessoa a atribuir que a resistência de uma espécie estava matematicamente relacionada à distribuição dos valores mínimos e assumiu a distribuição Gaussiana de resistências.

Kontorova e Frenkel e Kontorova²³ também assumiram esta distribuição. Desde então, uma quantidade apreciável de autores têm desenvolvido estudos a cerca da distribuição exata de valores extremos para ambos, grandes e pequenos tamanhos de amostra (**m**), para a distribuição normal.

Weibull sugeriu que a probabilidade de falha de um volume unitário como função da tensão σ é dado por:

$$P = 1 - \exp [- (\sigma/\theta)^\beta] \quad (39)$$

sendo; θ e β são parâmetros desconhecidos do material sob teste.²⁶

Esta distribuição tem encontrado considerável aplicação na descrição do comportamento da resistência de materiais compósitos.²⁷

Uma frequente crítica no que diz respeito à distribuição de Weibull é que a mesma é destituída de significado físico, sendo a distribuição normal encarada como de natureza própria.²⁸

Ambas envolvem dois parâmetros independentes e indeterminados. Weibull implicitamente envolve o princípio de que o elo mais fraco é o que determina a resistência à fratura.²³



2.10.1 - Distribuição de frequência assumida como normal

Pode-se concluir que uma função densidade de probabilidades ou suas funções de distribuições relacionadas podem ser descritas por uma expressão matemática bem como em uma forma gráfica. Sendo assim, todas as ferramentas de análise relacionadas, podem ser utilizadas para descobrir as características essenciais e também serem manipuladas em aplicações para os mais diversos problemas.¹⁹

Uma representação matemática permite categorizar as f.d.p em famílias e fornecer tabelas numéricas que simplificam problemas de avaliação de probabilidades.

Quando dados extraídos de experimentos apresentam-se sob a forma de um sino, a distribuição de frequências é assumida como normal e definida pela seguinte equação $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{s_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{s_x} \right)^2 \right] \quad (40)$$

onde, x é variável observada, μ é conhecido como a média da população e descreve o “centro de gravidade” da curva e é também o valor mais provável, s_x é o desvio-padrão (medida da dispersão ou espalhamento da curva ao redor do seu valor médio) e $f(x)$ é a ordenada da curva.²¹ O valor do desvio-padrão elevado à segunda potência é conhecido como variância (s^2) da função.

A função de densidade normal é conhecida como uma das mais usuais famílias de funções de densidade de probabilidades.¹⁹

2.10.2 - Distribuição de Weibull

Os compósitos apresentam uma desvantagem, que pode ser caracterizada devido ao fato de sua resistência e vida em fadiga apresentarem maiores espalhamentos do que os metais. Inúmeros testes tem sido correntemente executados com o objetivo de poder caracterizar e entender melhor esses materiais em termos de comportamento e facilitar suas aplicações.³⁰

A distribuição de Weibull é um dos tipos de distribuição de valor extremo e a mais largamente usada expressão para a caracterização do espalhamento dos dados de resistência à falha para materiais frágeis.⁵ Como materiais frágeis apresentam uma grande variação dos valores de resistência, é comum quando se faz o uso desses como materiais de engenharia, que sua resistência seja caracterizada.²⁹ A função de distribuição cumulativa de Weibull é também conhecida como Fisher-tipper type III, distribuição de valores mínimos e distribuição da 3ª assintótica dos valores extremos mínimos.²⁹

O modelo de Weibull é baseado na “hipótese do modelo do elo mais fraco” o que significa que a mais séria falha na espécie controlará a resistência; levando em consideração que a mais séria ou grave falha não é necessariamente a maior, porque sua severidade depende também de onde ela está situada. Resumindo: a



falha que está sujeita ao mais alto fator intensidade de tensão será o controlador da resistência.²⁹

As falhas que dão início ao processo de fratura podem ser convenientemente classificadas como intrínsecas ou extrínsecas. As falhas intrínsecas são introduzidas durante o processo de fabricação e são predominantemente inclusões e vazios. As falhas extrínsecas são trincas induzidas por tensão, tais como superfície de trincas introduzidas durante usinagem e microtrincas resultantes de altas tensões residuais.²⁹

Materiais frágeis tem sua tenacidade limitada e seu processo de fratura é controlado por falhas. As falhas são aleatórias no tamanho, forma e distribuição, logo os dados de resistência mostram um espalhamento muito maior do que os metais.^{5,30} O espalhamento na resistência, ou o comportamento dos dados de resistência de materiais frágeis é expresso com sucesso pela estatística de Weibull.³¹

Esta distribuição encontrou um vasto campo de aplicação no estudo de confiabilidade de sistemas e a sua f.d.p é dada , na sua forma mais geral, por:¹³

$$P[vida(t)] = 1 - e^{-\left(\frac{t-\alpha}{\theta-\alpha}\right)^\beta} \quad (41)$$

sendo:

β ... é o parâmetro de forma (declive de Weibull)

$\alpha...$ é o parâmetro de posição (vida mínima)

$\theta...$ é o parâmetro de escala (vida característica)

Para efeitos práticos, é desejável que se deixe a vida mínima igual a zero.¹⁴

A distribuição cumulativa de probabilidade assume a seguinte forma:

$$P(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (42)$$

A função densidade de probabilidade de Weibull é matematicamente, a primeira derivada da função cumulativa assim,

$$P(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\theta^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (43)$$

Uma propriedade interessante da distribuição de Weibull é quanto à recursividade que o modelo apresenta no que se refere a distribuição do valor extremo mínimo; ou seja, para tamanho da amostra grande, a distribuição de menor valor continua sendo a distribuição de Weibull, independentemente da distribuição original, bastando que esta obedeça a algumas condições bastante gerais.³²

É importante salientar que β é um parâmetro material que caracteriza a fragilidade do material.³¹ Significativamente e de acordo com as expectativas

gerais, o parâmetro de forma β foi mostrado permanecer praticamente constante sob variações das condições de ciclo, temperatura e degradação da resistência. Isto significa que se um componente sofre degradação da resistência devido à danos, processos de corrosão, fadiga, etc, então o parâmetro de forma dessa distribuição é o mesmo para o material não danificado.²³

A fratura de materiais frágeis é largamente determinada pelo número e severidade de falhas em sua superfície. Estes resultados apresentam considerável espalhamento nos valores de resistência à fratura, que depende da distribuição das falhas.⁵

O módulo de Weibull é um nome alternativo e familiar do parâmetro de forma e representa a forma da distribuição ou dispersão dos dados.³⁰ Também pode ser denominado como “parâmetro de inclinação de Weibull”, pois é igual a inclinação da linha plotada no papel de probabilidade de Weibull.³³

2.11 - Método para estimar os parâmetros de Weibull

As características da distribuição estatística dos dados de resistência dos materiais frágeis tem sido discutido e um dos problemas principais a ser esclarecido é o de como estimar os parâmetros da distribuição dos dados de resistência que foram obtidos pela realização de uma série de experimentos.²⁸

No caso da f.d.p de Weibull biparamétrica que é usualmente empregada para aproximar dados de resistência, o objetivo principal é de estabelecer um



método confiável para estimar o módulo de Weibull (β) e o parâmetro de escala (θ) da população de um limitado número de dados. O problema fundamental é o de estabelecer as características dos dois parâmetros estimados dos dados de um certo tamanho de amostra.³²

Pode-se mostrar facilmente que o modelo de Weibull não pertence à classe exponencial regular de densidades e, portanto não existe um conjunto de estatísticas suficientes, completas e conjuntas. Deste fato decorre a inexistência de estimadores eficientes para calcular os parâmetros da distribuição,³² entretanto, conhecendo-se a forma da distribuição que se aplica ao caso em estudo, o passo seguinte é estimar os parâmetros que quantificam a f.d.p.

Neste trabalho, será dada ênfase somente ao método gráfico de estimação dos parâmetros que pode ser aplicado a f.d.p de Weibull biparamétrica, que possui a conveniência de fornecer o grau de espalhamento em termos do valor central, através do parâmetro de forma (β), exatamente como o coeficiente de variação (cv).³⁰ É importante levar em consideração, que a função de Weibull biparamétrica que apresenta maior parâmetro de forma, possui um menor espalhamento, ou seja, ($\uparrow\beta$) ($\downarrow$ espalhamento).

2.11.1 - Método gráfico para estimação de β e θ

O método gráfico permite a estimação dos parâmetros β e θ da distribuição biparamétrica de Weibull, de uma forma rápida e com uma precisão razoável nos resultado.³²

As análises de características de vida que seguem a distribuição de probabilidade de Weibull são mais facilmente acompanhadas usando-se o papel de probabilidade de Weibull,³³ utilizado na determinação gráfica dos parâmetros e sendo especialmente graduado com a finalidade de linearizar a f.d.p.³²

As justificativas para o arranjo de escala deste papel de probabilidade são as seguintes:

$$P(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (44)$$

rearranjando a equação na sua forma exponencial positiva;

$$\frac{1}{1 - P(t)} = e^{\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (45)$$

tomando-se o logaritmo natural dos dois lados da equação

$$\ln\left(\frac{1}{1 - P(t)}\right) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (46)$$

tomando-se o logaritmo pela segunda vez;

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - P(t)} \right) = \beta \ln t - \beta \ln \theta \quad (47)$$

Fazendo os seguintes arranjos, temos que:

$$Y = \ln (- \ln (1 - P(t)))$$

$$X = \ln (t)$$

$$B = \beta$$

$$A = \beta \ln (\theta)$$

podemos reescrever a equação como:

$$Y = A + BX \quad 48)$$

que é uma equação de reta, onde β (parâmetro de forma) é o seu coeficiente angular.

Isto significa que dados de tempo ou vida plotados na escala horizontal do papel e, probabilidade cumulativa plotados na escala vertical, podem ser representados por uma linha reta, se a amostra segue uma distribuição de probabilidade de Weibull com vida mínima igual a zero. A escala do eixo vertical foi construída de tal modo que a probabilidade cumulativa possa ser plotada diretamente.³³

A extensão deste método consiste em realizar uma regressão linear dos pontos do gráfico para cada valor de vida mínima, sendo escolhido aquele para a qual a explicação do modelo linear seja máxima.³²

A regressão linear é um método comum para estimar β e θ dos dados experimentais plotados no papel de probabilidades de Weibull.³⁰

2.12 - Papel de probabilidade de Weibull

Existe um tipo especial de papel de probabilidade que encontra um amplo campo de aplicação.³⁴ É conhecido como papel de probabilidade de Weibull, como mostrado na figura 6. A abcissa é apresentada na forma de uma escala logarítmica e a ordenada em uma escala que é transformada para se tornar linear da seguinte forma:³⁵

$$\ln \ln 1/[1-(\text{fração da população contada})] \quad (49)$$

Este tipo de papel de probabilidade reduz muitos gráficos, de cujo espalhamento dos dados não seria possível se obter linhas retas, e por esta razão apresenta uma visão mais clara da amostra em sua totalidade.³⁵



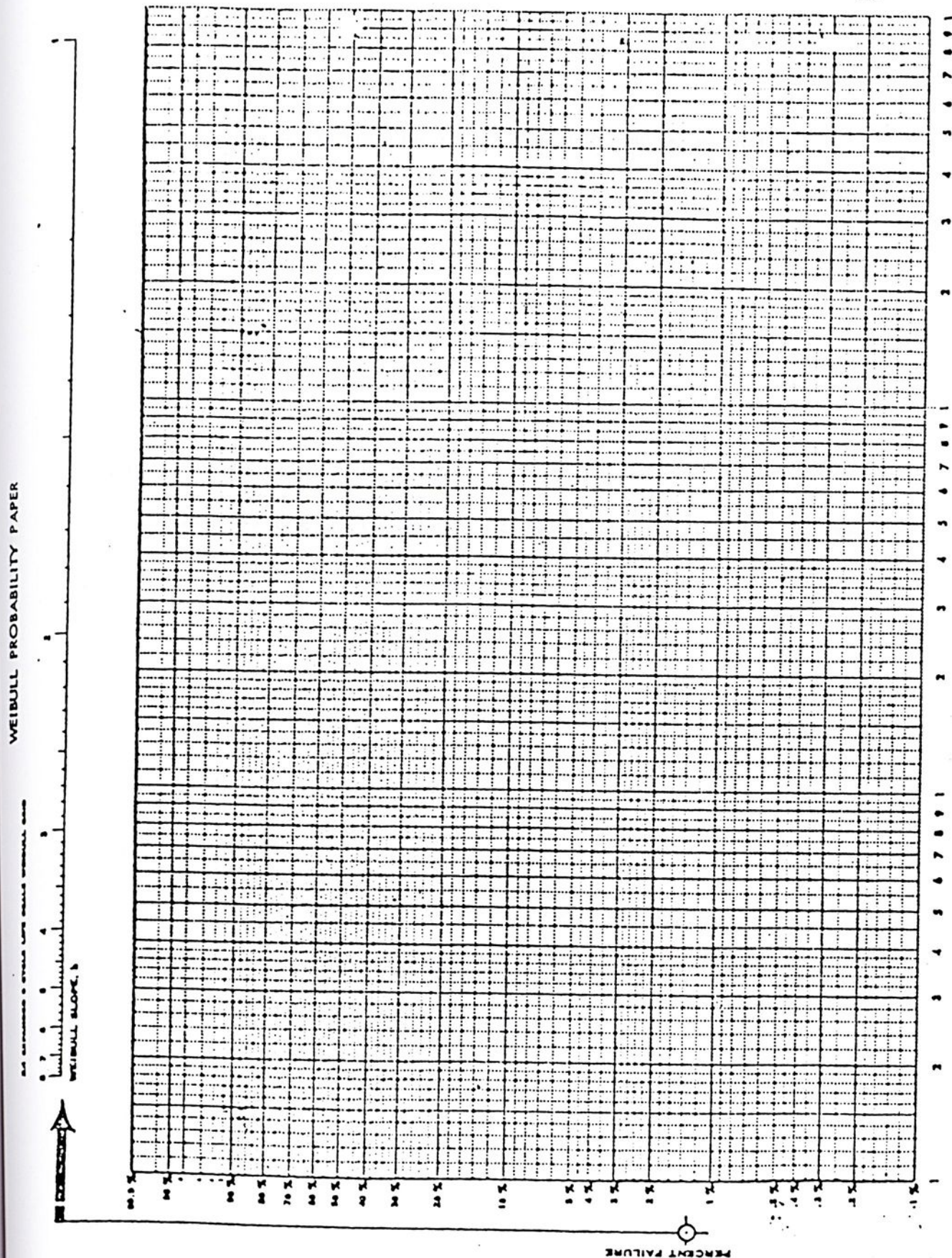


Figura 6 - Papel de probabilidade de Weibull²³

2.13 - Limites de confiança para funções de distribuição cumulativa

Comentários a respeito de gráficos de amostras em sua totalidade foram discutidos anteriormente e são conhecidos como funções de distribuições cumulativas.

Este é um nome apropriado para estes tipos de gráficos devido ao fato da ordenada de qualquer ponto plotado no papel de probabilidade representar a fração da população contada da abcissa até aquele ponto.³⁵ A fração contada é obviamente uma fração cumulativa que aumenta com a abcissa até que finalmente, (fração de 1,00 ou 100%) toda população seja contada (acumulada).

É necessário esclarecer que, quando uma curva é construída no papel de probabilidade, cada ponto da abcissa é relacionado com um valor correspondente na ordenada; que é conhecido como *median rank*. Estes valores de *median rank* podem ser obtidos diretamente de tabelas confeccionadas para vários tamanhos de amostra (tabelas no Apêndice).²⁵ Se tabelas como estas não estão disponíveis, uma equação com aproximação muito boa para o median rank, r_j , pode ser dada por:

$$r_j = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (50)$$

onde j é o *rank order number*, e m é o tamanho da amostra. Assim, *median ranks* para apropriados tamanhos de amostras são os valores plotados no eixo vertical do papel de probabilidade de Weibull.³³

Johnson³⁵ fornece as tabelas correspondentes aos níveis 5% e 95%, para diferentes tamanhos de amostras e número de ordem, sendo necessário apenas lançá-los em um gráfico, assim como os níveis medianos (50%) contra os valores dos dados de resistência (tabelas no Apêndice). A partir daí se produz uma faixa de confiança dos dados de 90%, isto é, uma faixa dentro da qual haveria 90% de probabilidades dos resultados estarem incluídos dentro da mesma.

Normalmente estas faixas de confiança são consideradas para uma verificação de como pode ocorrer uma provável flutuação dos valores acima e abaixo do *median rank*. Se pode ser conhecida a extensão das flutuações acima e abaixo do *median rank* para cada valor da abscissa plotada no papel de probabilidade, é possível a construção de uma faixa de confiança, cuja largura é a mesma, bem como a extensão total da flutuação. Tais faixas são conhecidas como faixas de confiança.³⁵

A dimensão da faixa de confiança é mais duvidosa quando se deseja informações a respeito da locação verdadeira do ponto em um gráfico, ou seja, quanto maior for a faixa de confiança, maior é a certeza de que o ponto estará situado dentro da faixa.³⁵



Estas faixas de confiança simplesmente mostram a quantidade de dúvida que existe no tocante à locação verdadeira de qualquer ponto no gráfico. Confiança é medida em termos de probabilidade.



CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Computadores são inúteis. Eles só
podem dar respostas
Pablo Picasso
(1881-1973)

3.1 - Material

O material em estudo trata-se de um compósito confeccionado com fibras de carbono e resina epoxi, originalmente produzido na forma de placas em “L” com o material de reforço colocado somente em uma direção, o que lhe dá a classificação de compósito laminado unidirecional. Com o objetivo de se confeccionar os corpos de prova, as chapas com 0,5 mm de espessura foram cortadas numa serra circular diamantada, segundo duas orientações diferentes, 0° (sentido longitudinal) e à 90° (sentido transversal) à partir da orientação original das fibras no compósito.

3.2 - Equipamento para ensaios de tração, compressão e cisalhamento

Os ensaios foram realizados no próprio centro de pesquisas que forneceu o material compósito, na máquina universal de ensaios com as seguintes especificações:



INSTRON.....30.000 lb

Reversible Load Cell.....15.000 kg

Assembly A532-1.....150 kN

Serial 087

Catalog n ° 2512-304

Torque All Bolts to 50 lb.ft

Para cada um dos ensaios acima citados, existe somente uma variação nos dispositivos para fixação dos corpos de prova na máquina.

3.3 - Corpos de prova para ensaio de tração

Ambas as dimensões dos corpos de prova seguiram a norma ASTM-D3039³⁷, conforme as figuras 7 e 8. Foram realizados vários ensaios com os diferentes códigos. Os códigos para o ensaio de tração variam de A até J; e para cada um dos códigos existe uma variação na fração volumétrica das fibras (v_f) presente no compósito.



3.3.1 - longitudinal

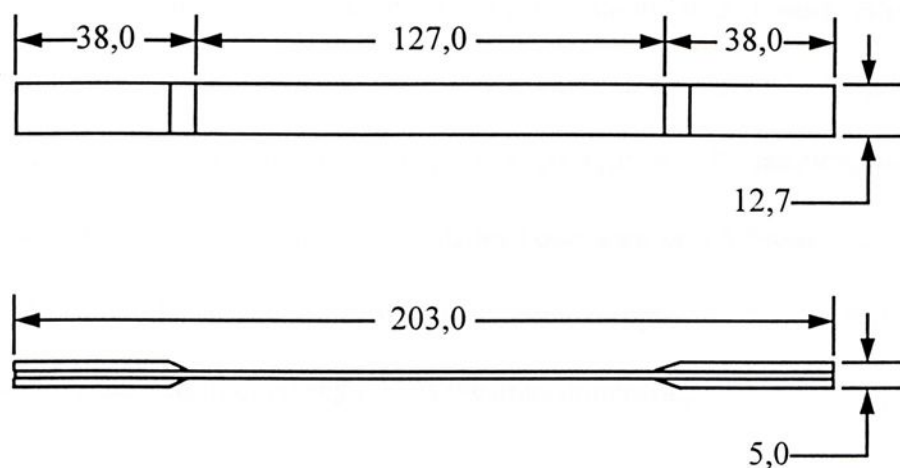


Figura 7 - Corpo de prova para ensaio de tração longitudinal, dimensões em mm (ASTM D 3039)³⁷.

3.3.2 - transversal

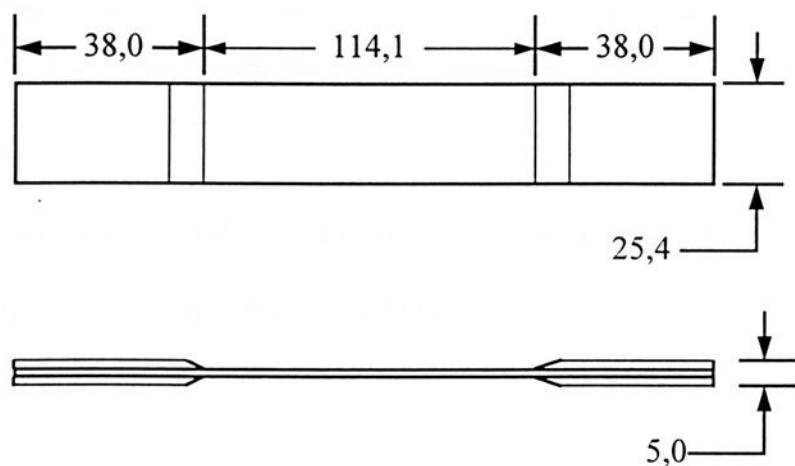


Figura 8 - Corpo de prova para ensaio de tração transversal, dimensões em mm (ASTM- D 3039)³⁷.

3.4 - Corpos de prova para ensaios de compressão

As dimensões do corpo de prova seguiram a norma ASTM-D3410,³⁸ conforme figura 9. Foram realizados ensaios de compressão longitudinal e de compressão transversal, somente com os códigos A e B; também variando para cada um dos códigos somente as frações volumétricas das fibras (v_f), presentes no compósito. Os corpos de prova tanto para compressão transversal como para compressão longitudinal seguem as mesmas dimensões.

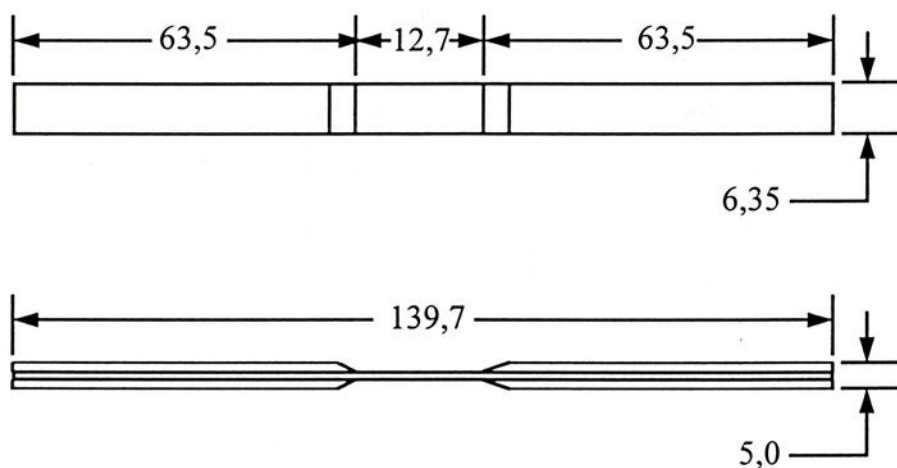


Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de compressão longitudinal e transversal, dimensões em mm (ASTM- D 3420)³⁸.

3.5 - Corpos de prova para ensaios de Cisalhamento

Os corpos de prova foram confeccionados segundo um trabalho desenvolvido pela IOSIPESCU SHEAR TEST FIXTURE SPECIMEN, AND ALIGNMENT TOOL WORKING DRAWINGS,³⁹ conforme a figura 10. Foram realizados ensaios com os diferentes códigos, no caso do ensaio de cisalhamento com os códigos B e C ; e para cada um dos códigos existindo uma variação na fração volumétrica das fibras (v_f) presente no compósito.

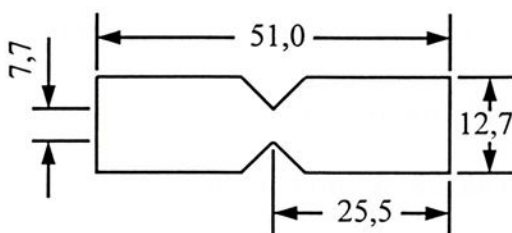


Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento longitudinal e transversal, dimensões em mm (IOSIPESCU)³⁹

3.6 - Parâmetros de ensaio

No ensaio de tração segundo a norma ASTM-D3039, para a execução deste uma velocidade de ensaio de 2 mm/min é requerido e um fundo de escala de 30 kN. Já no ensaio de compressão segundo a norma ASTM- D3034 a velocidade

de ensaio requerida foi de 1,27 mm/min. Ambos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

Para a análise e determinação da fração volumétrica dos vazios (v_v) e fração volumétrica das fibras (v_f) em materiais compósitos, diversos métodos podem ser utilizados, como por exemplo: o método da digestão ácida, o método da contagem de pontos e o método da análise termogravimétrica, que foi o utilizado no presente trabalho.

O método da análise termogravimétrica, é realizado em um analisador termogravimétrico Perkin Elmer TGA 7, acoplado a um gerador de gráficos Perkin Elmer 7500 Professional Computer. O método é baseado na queima da amostra do material compósito, introduzido em uma câmara pressurizada contendo uma resistência, onde a resina volatilizada na queima é levada juntamente com o gás de arraste e posteriormente eliminada. O gás empregado para o arraste é o nitrogênio. Uma rampa de aquecimento de 10°C/min é empregada até que se atinja a temperatura de 650°C (garantindo com esse procedimento a total queima da resina).



CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Não há nada novo sob o Sol, mas quantas
coisas velhas existem que não conhecemos!
Ambrose Bierce
(1842-1914)

4.1 - Códigos e ângulos

Os códigos de **A** até **J** representam as frações volumétricas (v_f) de fibras no material em estudo e os ângulos representam as possíveis direções de corte, nos quais as fibras originalmente dispostas unidirecionalmente possam ser apresentadas: 0° (longitudinal) e a 90° (transversal).

Na tabela 4 a seguir será apresentada as frações volumétricas das fibras referente a cada código.

Tabela 4 - Frações volumétricas (v_f) das fibras

Códigos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Frações volumétricas [v_f] (%)	73,5	73,7	71,6	65,5	72,4	71,1	72,2	60,9	59,1	68,0

4.2 - Tabelas de dados para os ensaios de tração longitudinal e transversal

Nas tabelas de 5 até 24 estão apresentados os valores dos limites de resistência à tração (σ_t) e os respectivos valores dos módulos de elasticidade (E) do material estudado.

Tabela 5 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código A

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1872	138
2	1756	132
3	1742	176
4	1859	153
5	1832	128
6	1909	200
7	1876	154
8	1864	200

Tabela 6 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código B

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1998	135	15	2252	144
2	2189	132	16	2219	142
3	2011	147	17	2189	145
4	2145	143	18	2219	135
5	1961	164	19	2157	144
6	2219	158	20	2238	138
7	2151	144	21	2198	149
8	2206	194	22	2169	147
9	2094	131	23	2211	248
10	2129	151	24	2282	139
11	2245	144	25	1984	140
12	2200	141	26	2082	143
13	2278	131	27	2041	137
14	2237	146	-		

Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código C

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1560	253	22	1915	192
2	1633	180	23	1570	146
3	1779	127	24	1664	142
4	1843	124	25	1583	125
5	1593	108	26	1381	109
6	1620	138	27	1707	109
7	1490	114	28	1749	153
8	1943	155	29	1689	92
9	1629	146	30	1675	138
10	1473	111	31	1632	150
11	1505	162	32	1536	225
12	1897	139	33	1490	131
13	1949	167	34	1645	138
14	1584	159	35	1992	132
15	1568	113	36	1642	124
16	1438	97	37	1594	116
17	1510	154	38	1806	145
18	1665	107	39	1770	93
19	1761	139	40	1532	137
20	1701	150	41	1648	142
21	1452	96	42	1802	224

Tabela 8 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código D

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1270	137
2	1126	123
3	1619	133
4	1316	132
5	1548	117
6	1193	123
7	1502	119
8	1349	128
9	1275	120
10	1337	134

Tabela 9 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código E

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1680	190	10	1936	147
2	2200	343	11	1684	174
3	1966	145	12	1795	148
4	1869	170	13	2065	136
5	1670	152	14	1658	156
6	1645	139	15	1520	140
7	1663	378	16	1801	226
8	1725	286	17	1543	176
9	1819	155	18	2036	142

Tabela 10 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código F

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1901	138
2	1981	136
3	1696	149
4	1818	144
5	1748	143
6	1384	127
7	1928	150
8	1964	140
9	2001	135

Tabela 11 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código G

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1892	138	10	2271	135
2	1877	152	11	2311	150
3	2140	129	12	2279	130
4	1664	141	13	2226	120
5	1497	128	14	1674	137
6	1596	141	15	1899	137
7	2164	152	16	1555	131
8	1901	144	17	1992	148
9	1960	139	-	-	-

Tabela 12 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código H

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1561	115	11	1436	121
2	1510	114	12	1514	112
3	1586	127	13	1563	115
4	1482	117	14	1603	119
5	1446	109	15	1890	123
6	1735	109	16	1914	148
7	1445	123	17	1673	116
8	1547	118	18	1731	166
9	1534	139	19	1684	110
10	1628	107	20	1625	140

Tabela 13 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código I

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1613	105	11	1369	107
2	1589	99	12	1723	124
3	1558	116	13	1584	108
4	1452	131	14	1532	112
5	1470	107	15	1350	103
6	1450	102	16	1764	127
7	1396	122	17	1378	128
8	1674	107	18	1428	117
9	1388	136	19	1497	127
10	1433	135	-	-	-

Tabela 14 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração longitudinal para o código J

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	1289	148	10	2018	189
2	1959	212	11	1959	151
3	2092	135	12	1188	168
4	1973	145	13	1228	126
5	1932	156	14	1273	116
6	1280	127	15	2057	150
7	1647	140	16	2012	135
8	1964	173	17	1784	134
9	1688	134	18	1878	187

Tabela 15 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código A

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	24	9	23	40	8
2	58	10	24	22	8
3	23	11	25	37	9
4	37	10	26	22	13
5	28	8	27	16	8
6	36	9	28	19	11
7	33	10	29	38	9
8	34	9	30	43	9
9	54	10	31	20	14
10	21	9	32	25	22
11	16	9	33	28	9
12	35	9	34	41	12
13	21	10	35	29	11
14	7	12	36	27	10
15	16	10	37	23	10
16	18	10	38	31	10
17	43	13	39	25	18
18	16	8	40	18	10
19	36	9	41	39	10
20	26	9	42	22	8
21	31	9	43	27	9
22	32	9	44	22	9

Tabela 16 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código B

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	17	12	8	14	9
2	17	11	9	36	11
3	30	10	10	45	10
4	43	9	11	28	13
5	49	9	12	50	10
6	22	10	13	25	12
7	37	8	14	44	10

Tabela 17 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código C

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	29	10	18	26	9
2	35	9	19	20	9
3	27	8	20	21	9
4	36	8	21	14	8
5	38	9	22	17	8
6	22	10	23	19	7
7	12	8	24	30	8
8	11	10	25	14	9
9	27	9	26	12	9
10	25	9	27	23	12
11	16	8	28	17	10
12	15	12	29	22	10
13	20	8	30	28	9
14	17	8	31	16	6
15	26	9	32	13	8
16	21	10	33	22	9
17	19	9	-	-	-

Tabela 18 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código D

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	16,2	9,10
2	23,7	7,53
3	26,4	13,6
4	14,7	14,1
5	20,7	7,36

Tabela 19 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código E

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	11,6	6,00	10	29,4	8,67
2	31,1	8,99	11	29,2	9,21
3	21,4	9,58	12	37,7	8,69
4	25,5	8,91	13	33,6	8,78
5	17,1	8,57	14	33,6	9,31
6	23,0	8,73	15	27,3	8,89
7	20,0	5,61	16	18,3	8,80
8	33,4	8,45	17	34,2	8,78
9	29,1	8,73	18	24,0	6,26

Tabela 20 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código F

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	19,6	10,2	10	29,9	7,97
2	36,6	8,94	11	32,7	8,48
3	25,4	9,20	12	28,8	7,71
4	16,3	9,03	13	31,7	9,13
5	32,0	8,30	14	31,3	9,27
6	37,8	9,17	15	38,7	9,19
7	36,4	7,52	16	28,9	8,92
8	33,7	11,4	17	35,2	8,52
9	33,9	7,89	18	-	-

Tabela 21 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código G

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	24	8	12	26	8
2	30	7	13	33	7
3	16	12	14	31	8
4	31	8	15	20	7
5	17	11	16	20	9
6	35	10	17	22	9
7	17	10	18	21	9
8	31	13	19	27	8
9	37	9	20	18	8
10	28	10	21	23	7
11	25	9	22	-	-

Tabela 22 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código H

Nº	σ_t (MPa)	E(GPa)
1	19	11
2	14	9
3	25	15
4	28	10
5	32	11
6	31	9
7	41	9
8	29	13
9	44	11

Tabela 23 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código I

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)	Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	31	13	12	19	13
2	20	14	13	23	15
3	18	14	14	21	13
4	26	13	15	33	12
5	19	13	16	25	13
6	30	12	17	40	11
7	13	11	18	25	12
8	31	14	19	34	13
9	24	10	20	21	9
10	24	15	21	21	17
11	29	12	22	-	-

Tabela 24 - Valores do módulo de elasticidade e limite de resistência à tração transversal para o código J

Nº	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	19	8
2	16	10
3	38	11
4	25	8
5	24	17
6	28	10
7	14	11
8	37	9
9	46	9
10	23	9

4.3 - Histogramas para os dados de tração longitudinal e transversal

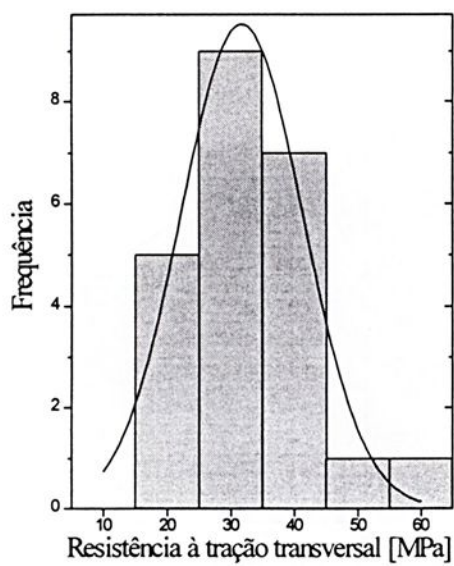
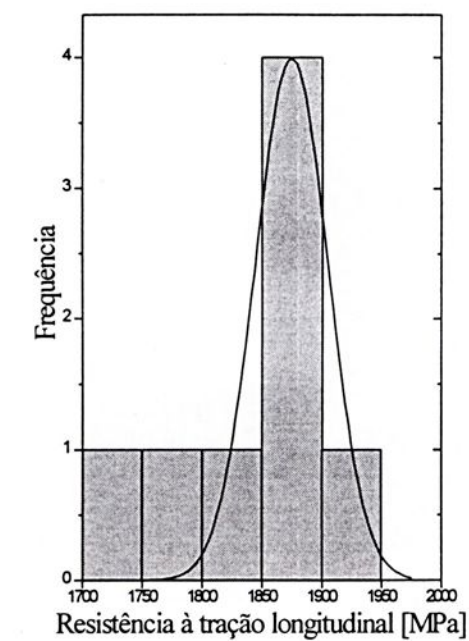


Figura 11 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código A

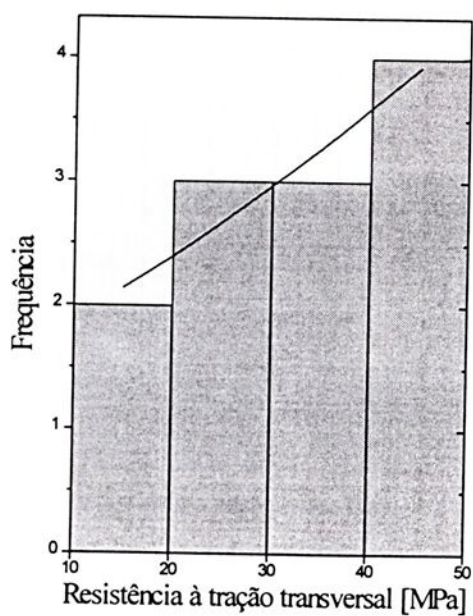
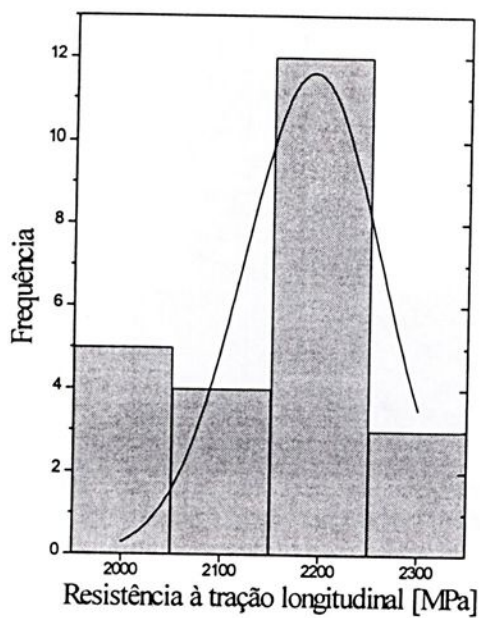


Figura 12 - Histogramas dos valores do limites de resistência à tração para o código B

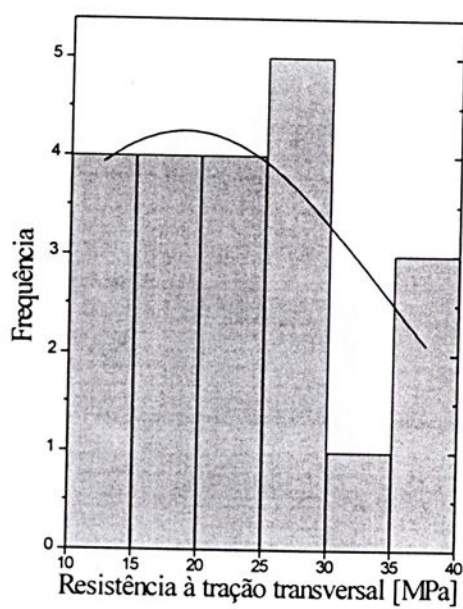
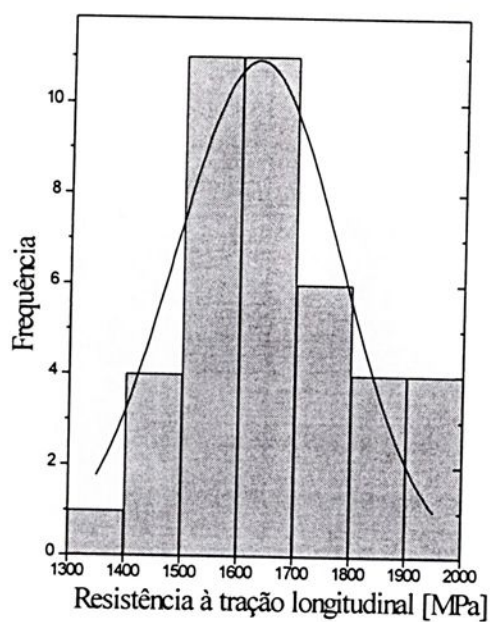


Figura 13 - Histogramas dos valores do limites de resistência à tração para o código C

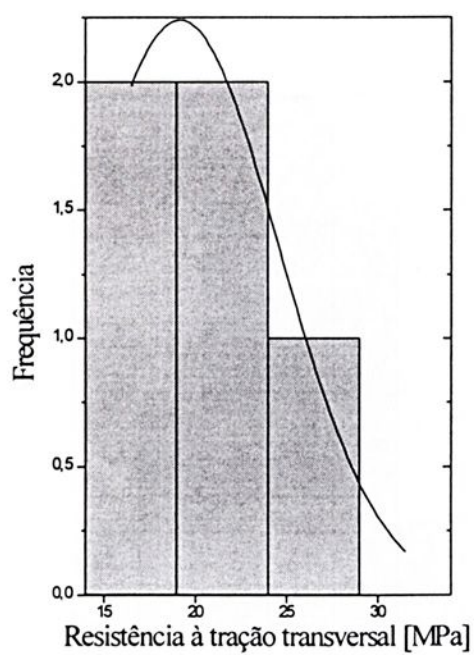
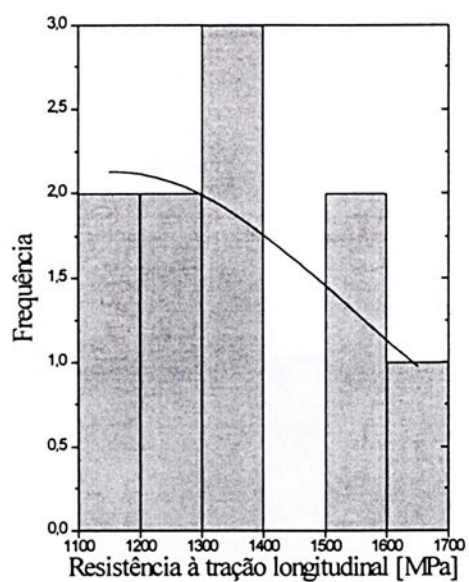


Figura 14 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código D

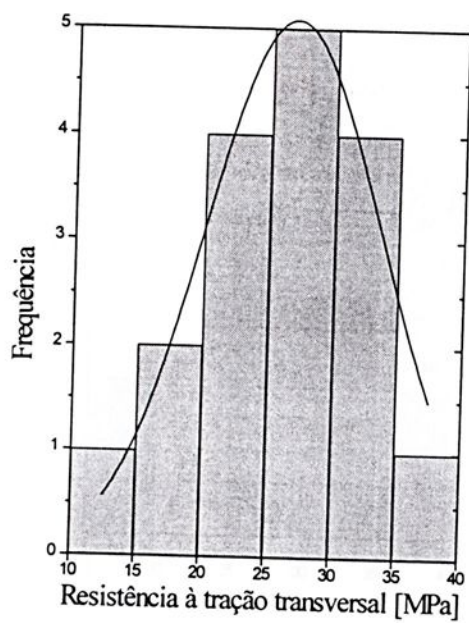
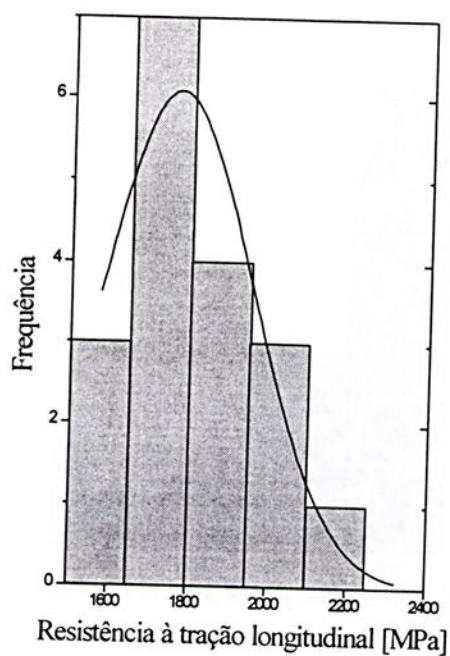


Figura 15 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código E

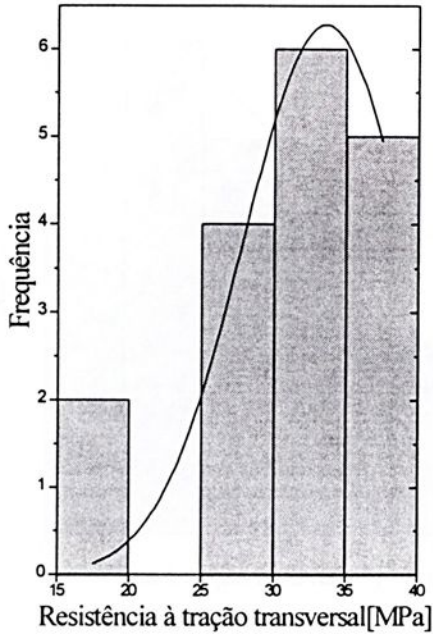
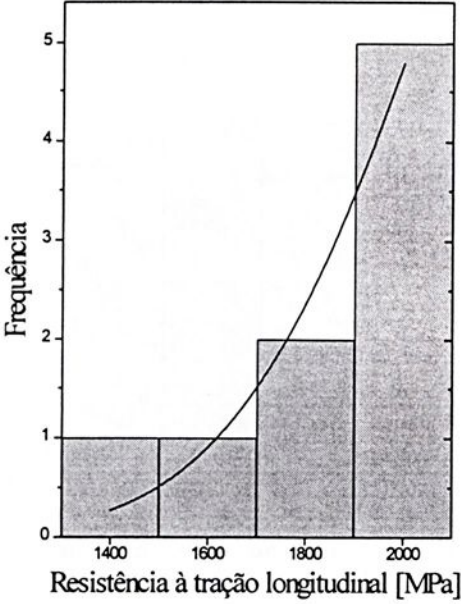


Figura 16 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código F

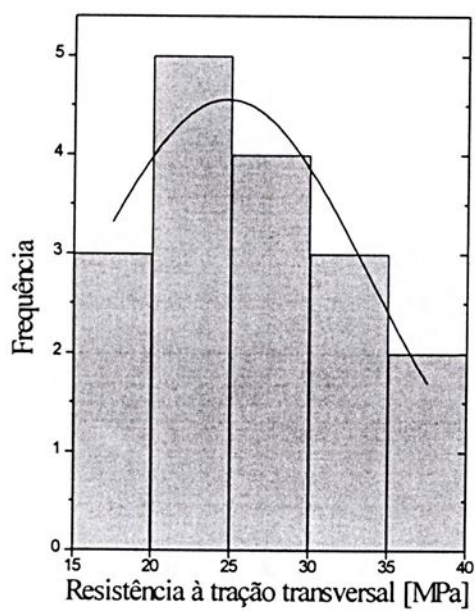
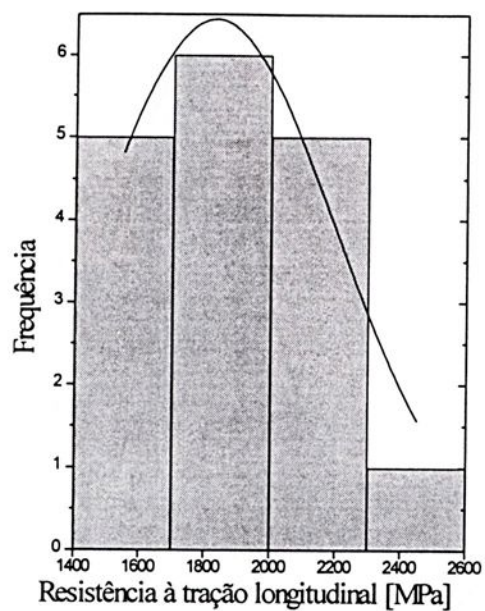


Figura 17 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código G

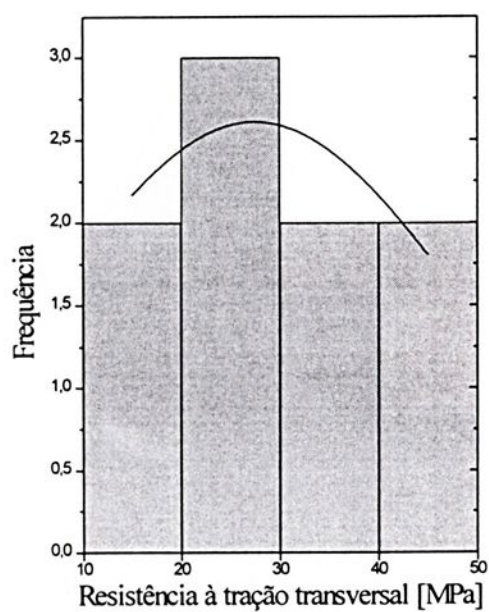
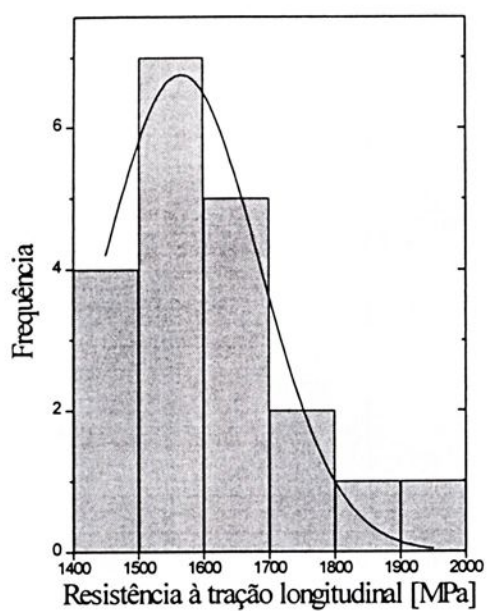


Figura 18 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código H

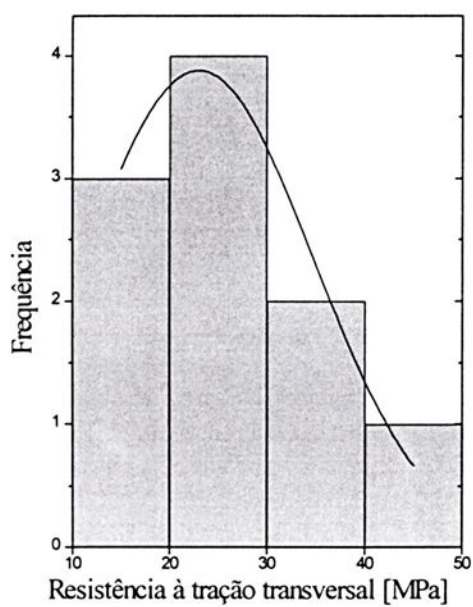
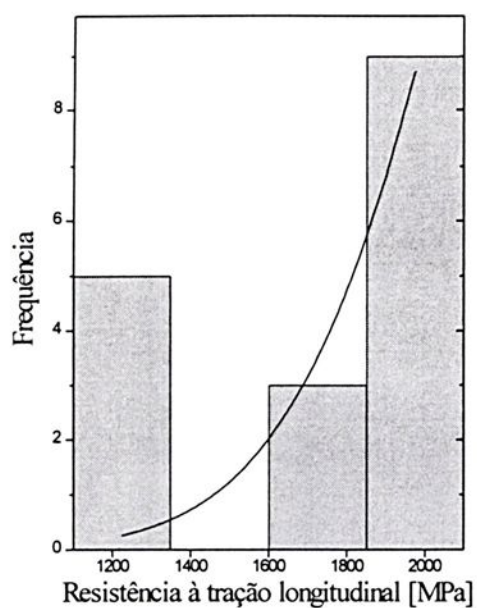


Figura 20 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código J

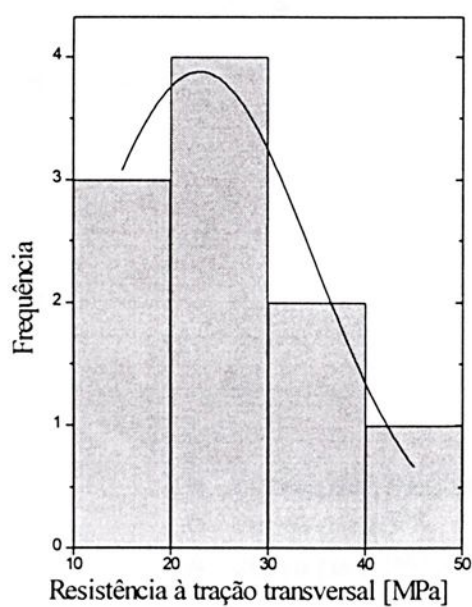
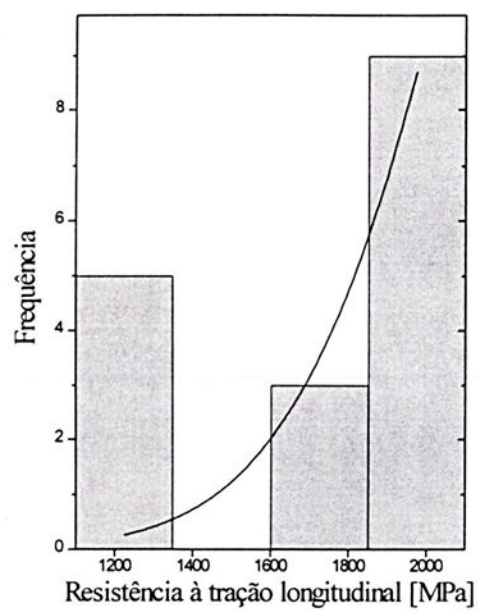


Figura 20 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à tração para o código J

4.4 - Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para os dados de tração longitudinal e transversal

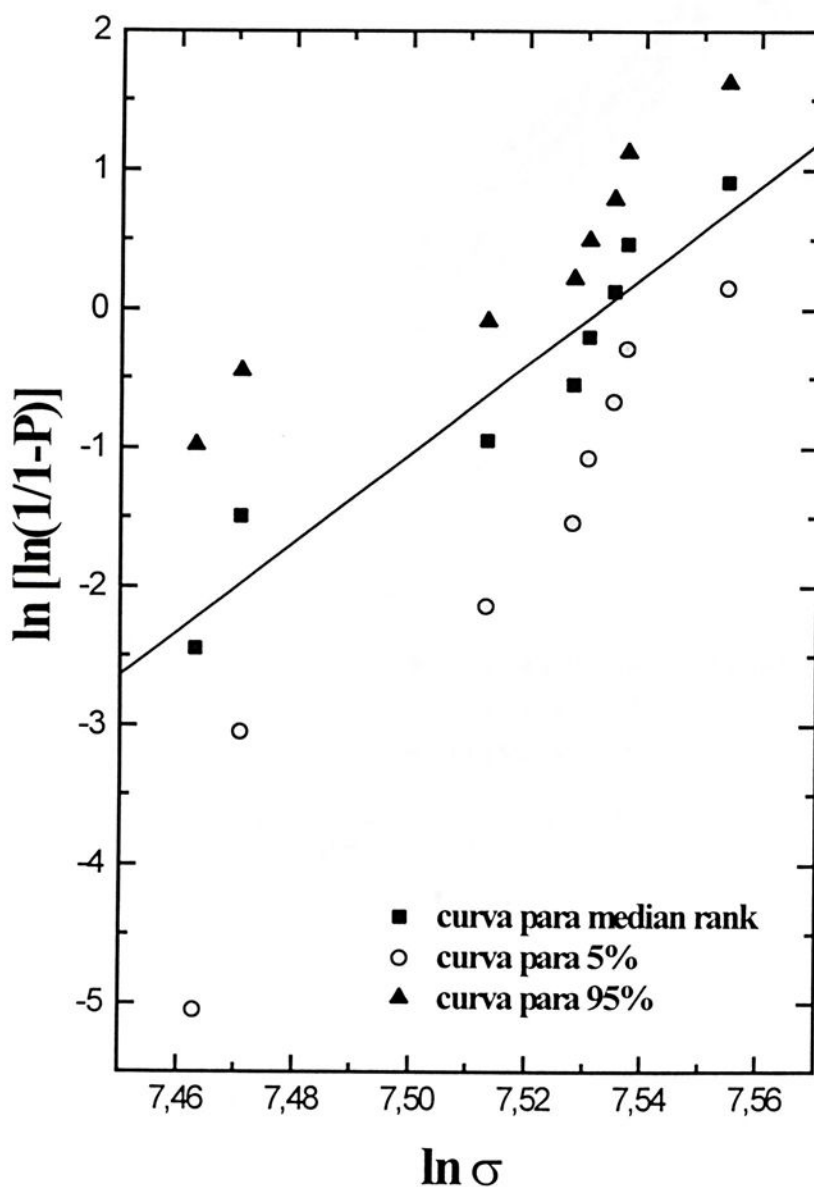


Figura 21 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código A

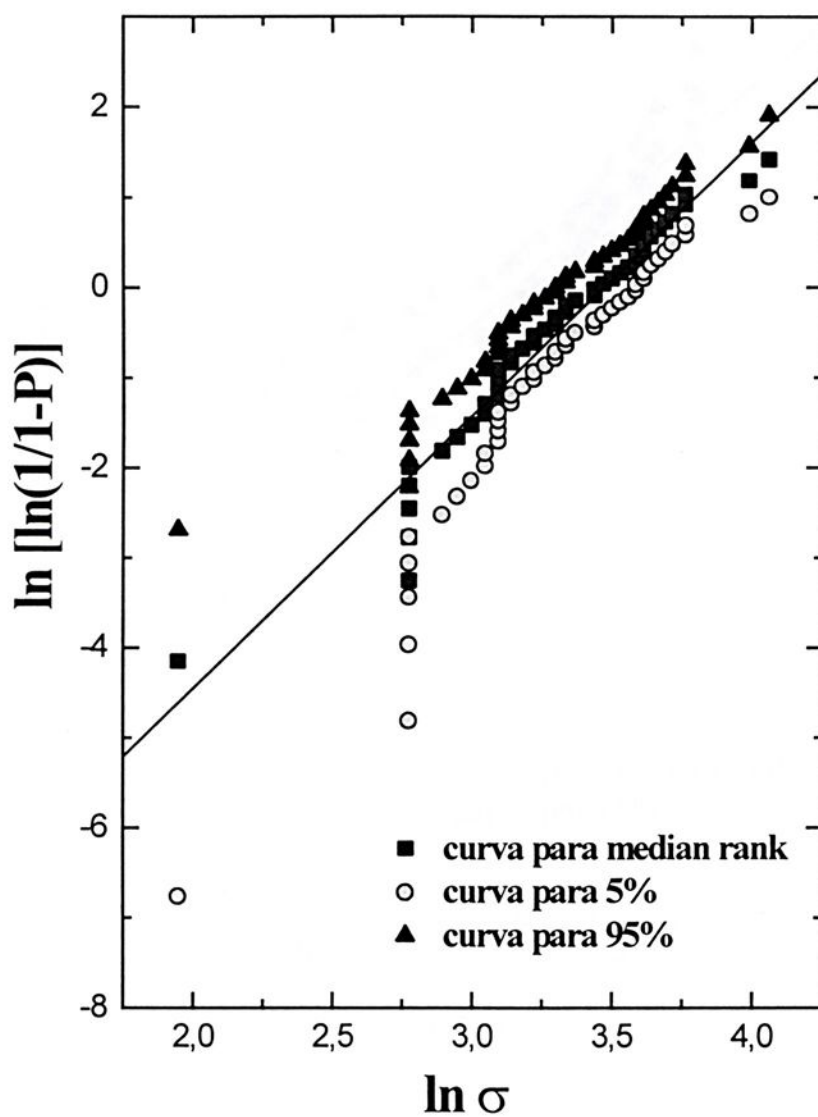


Figura 22 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código A

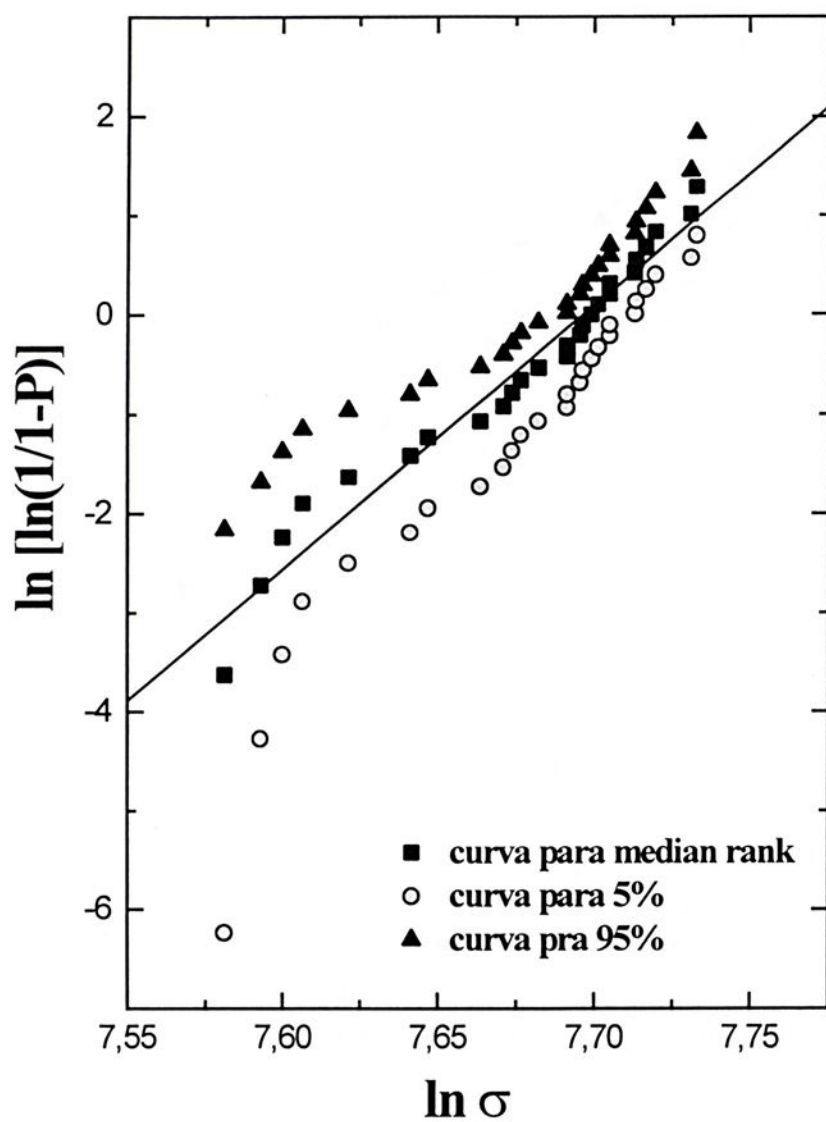


Figura 23 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código B

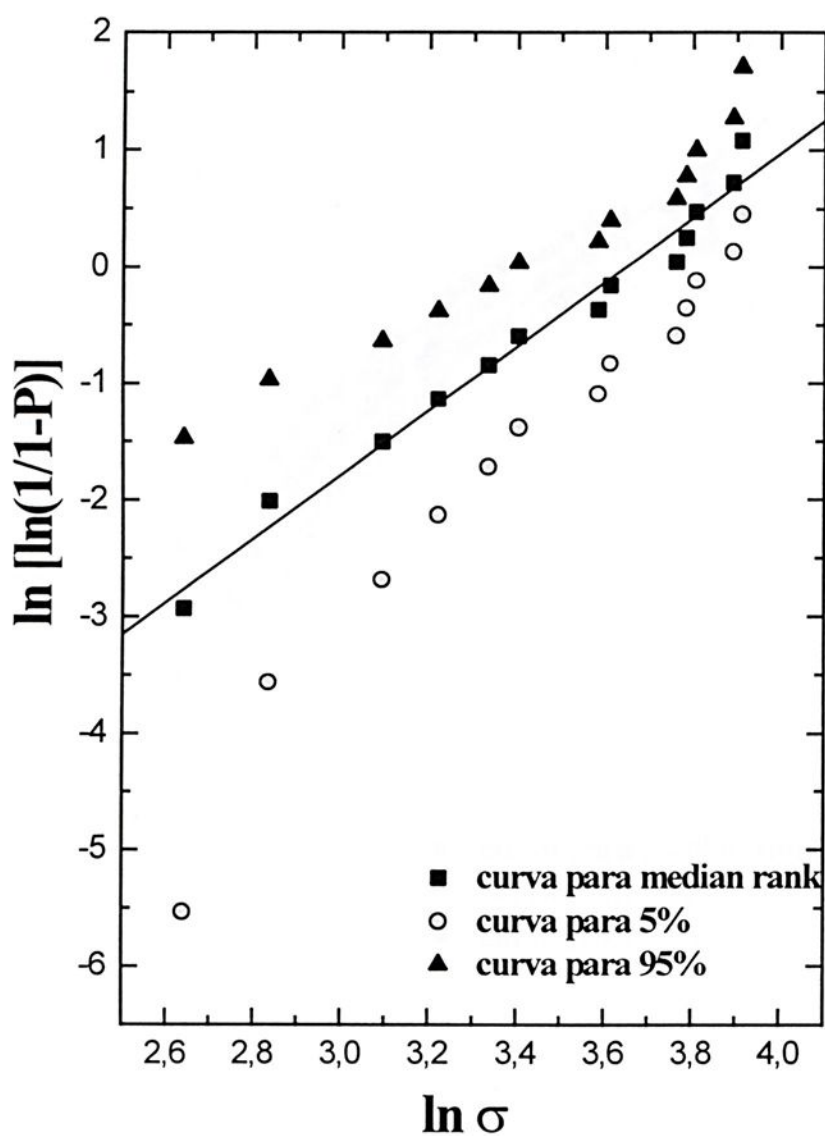


Figura 24 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código B

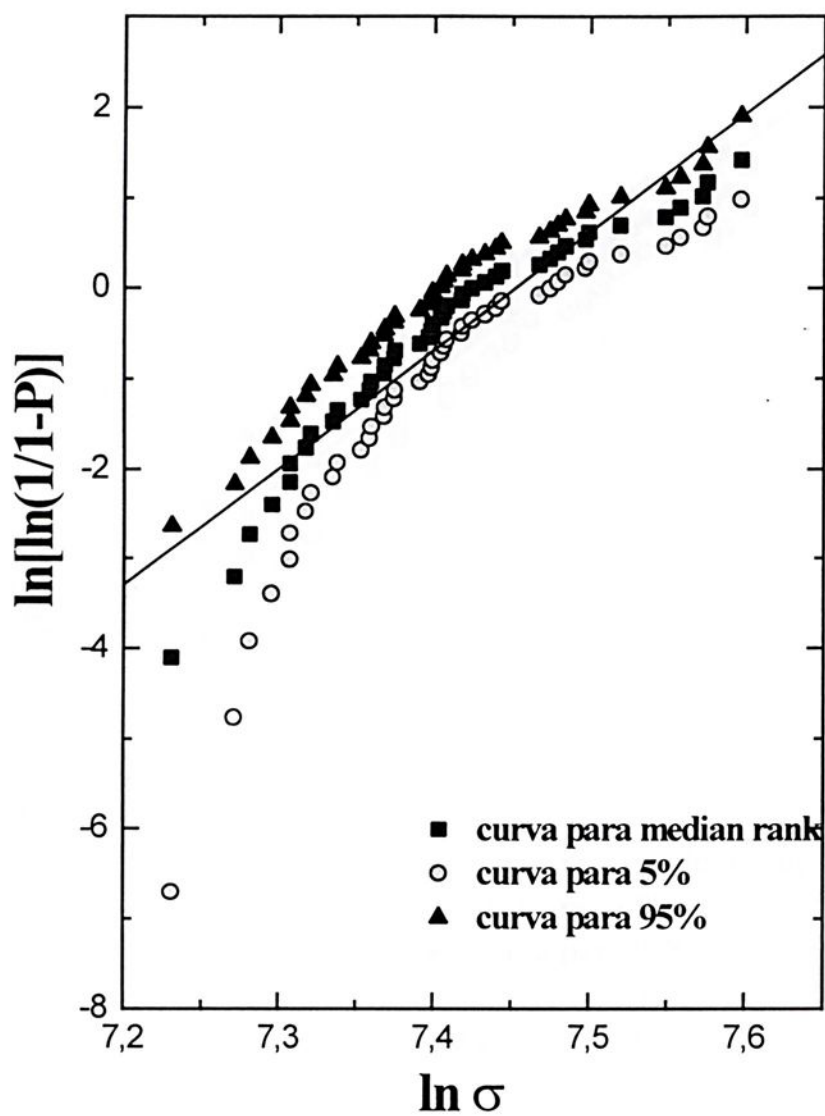


Figura 25 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código C

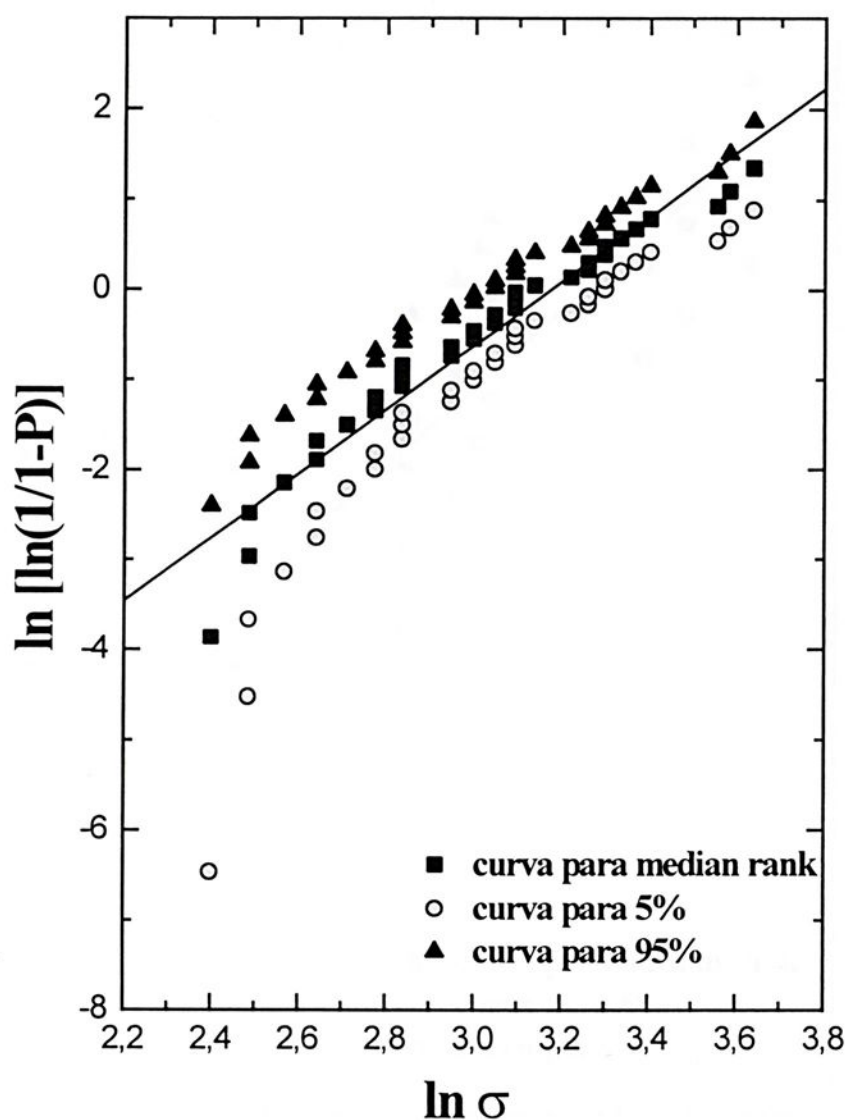


Figura 26 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código C

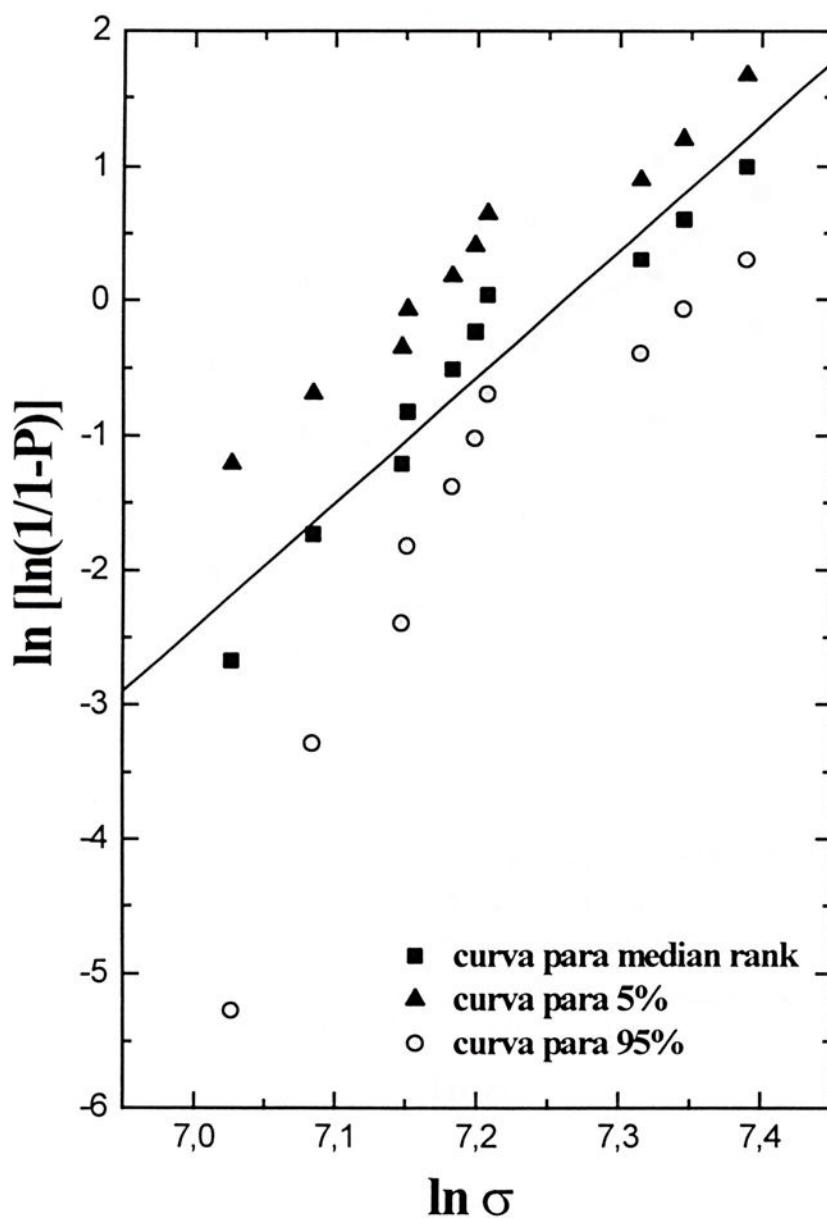


Figura 27 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código D

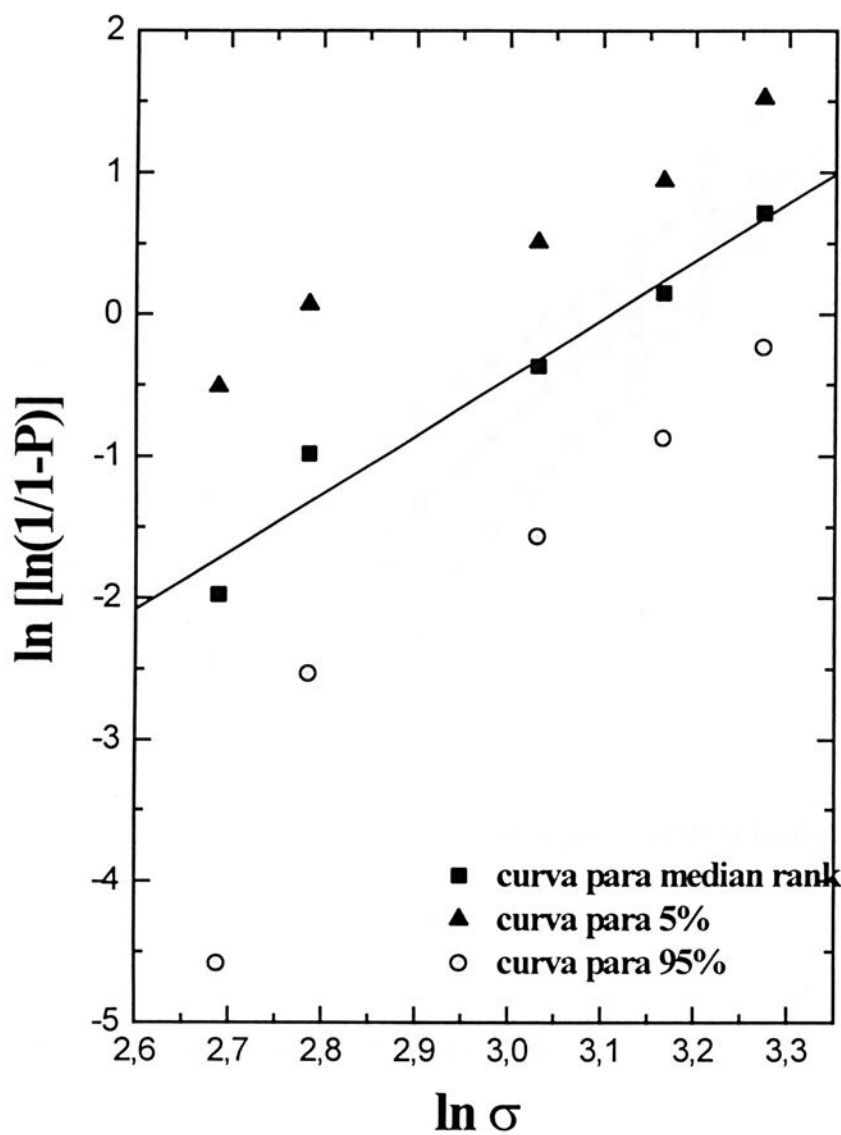


Figura 28 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código D

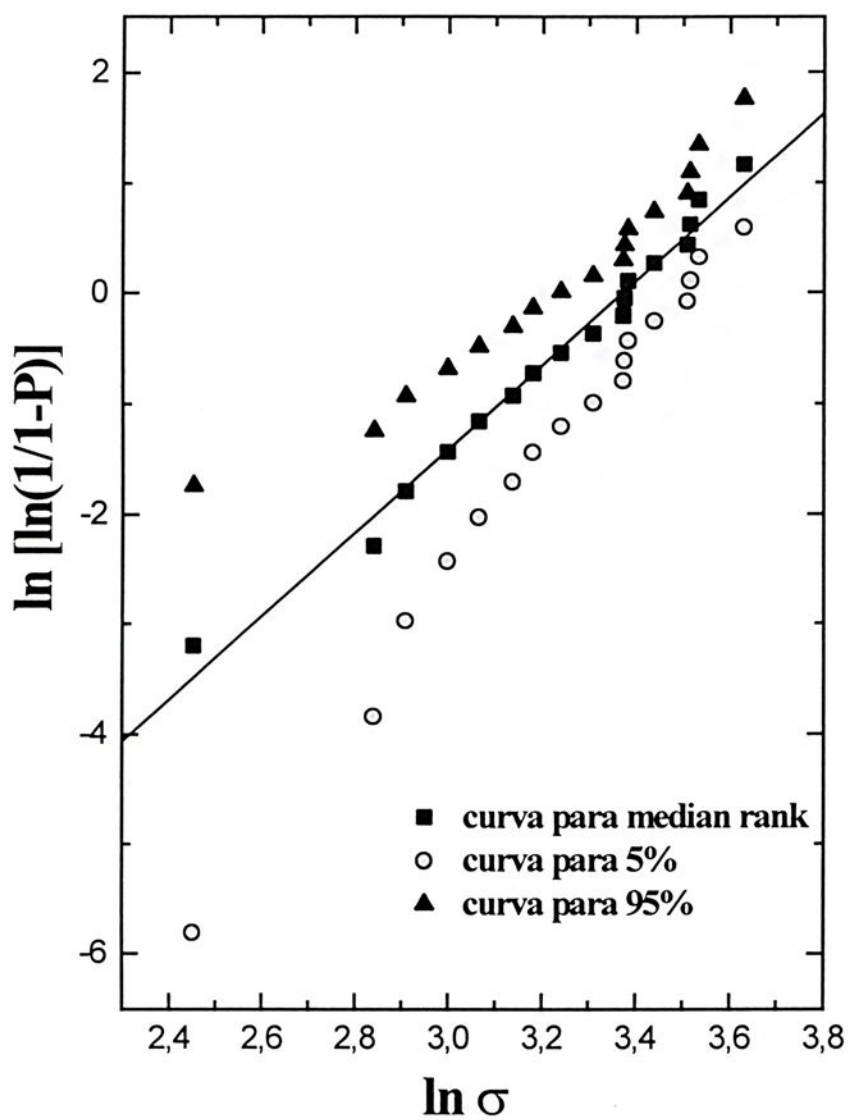


Figura 30 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código E

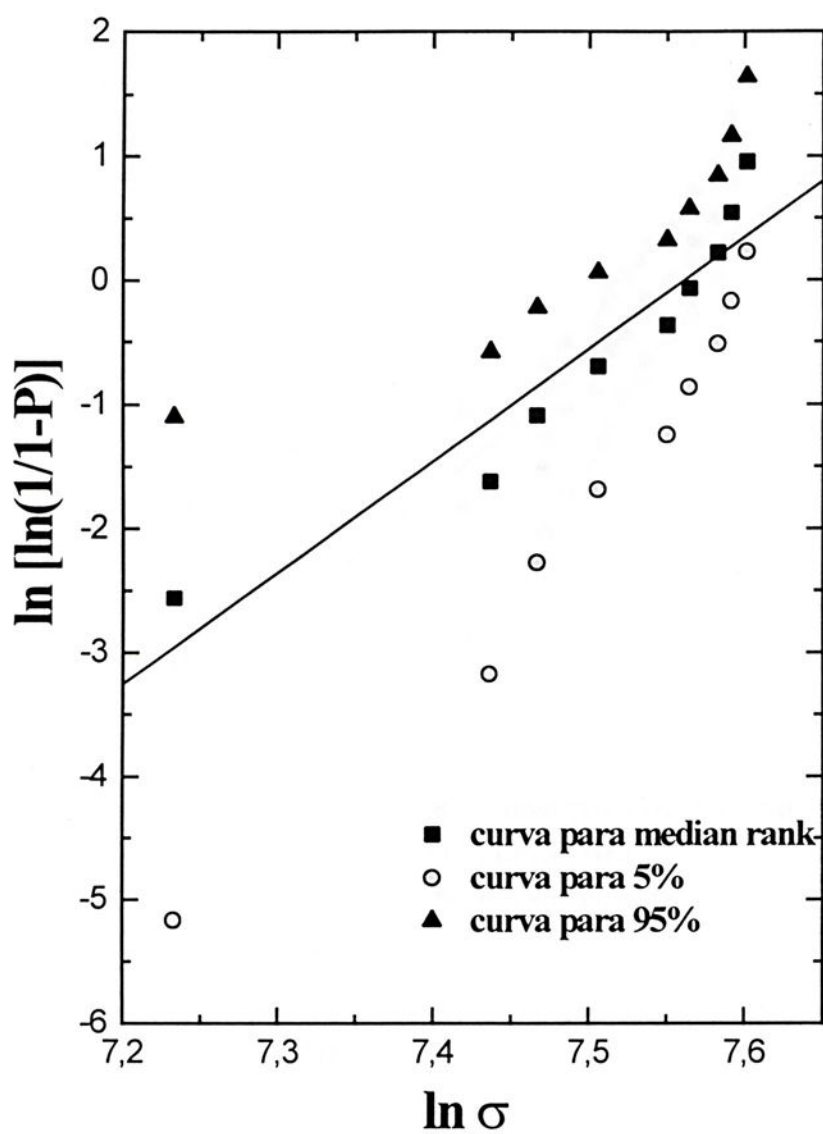


Figura 31 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal código F

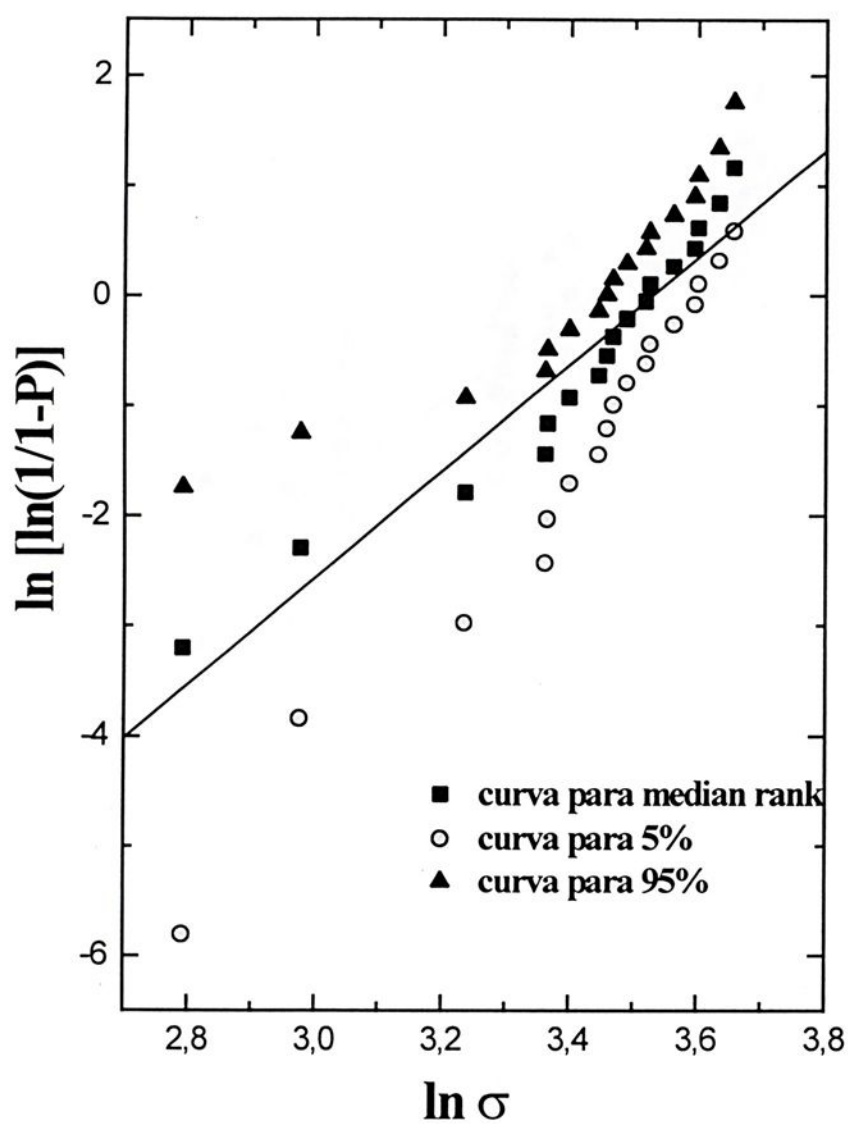


Figura 32 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código F

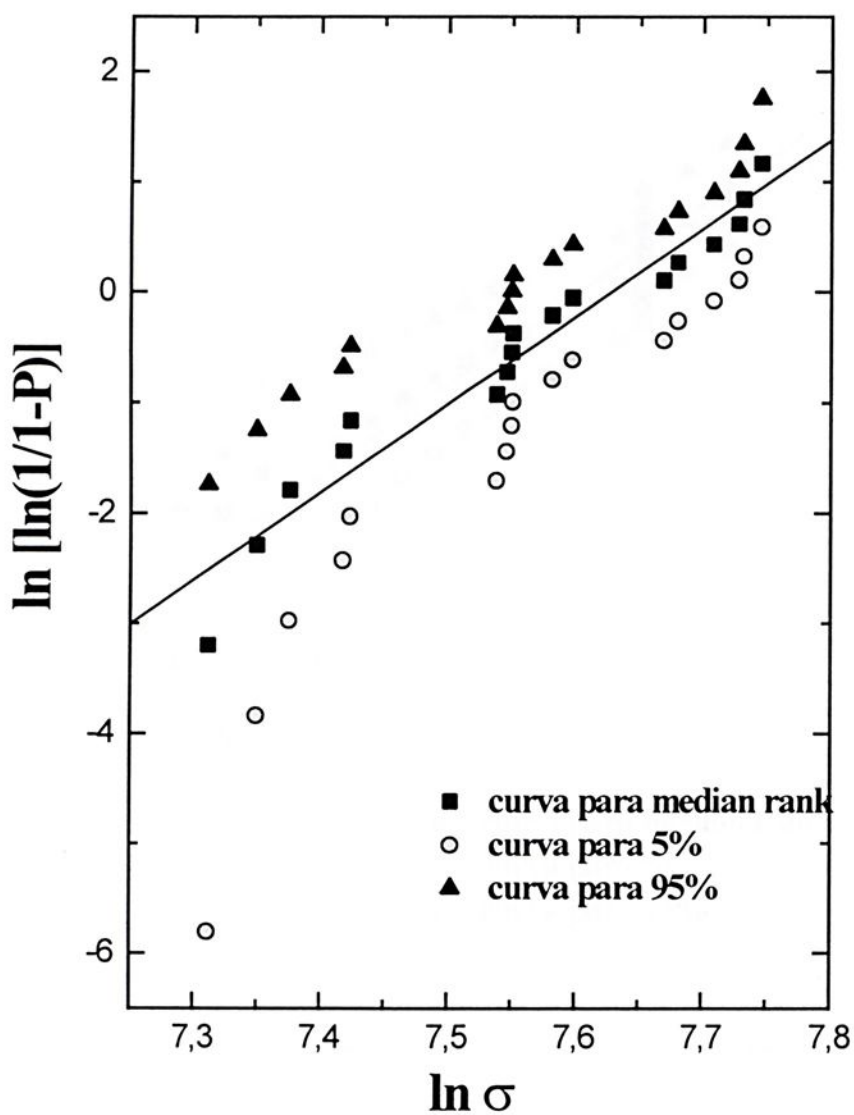


Figura 33 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código G

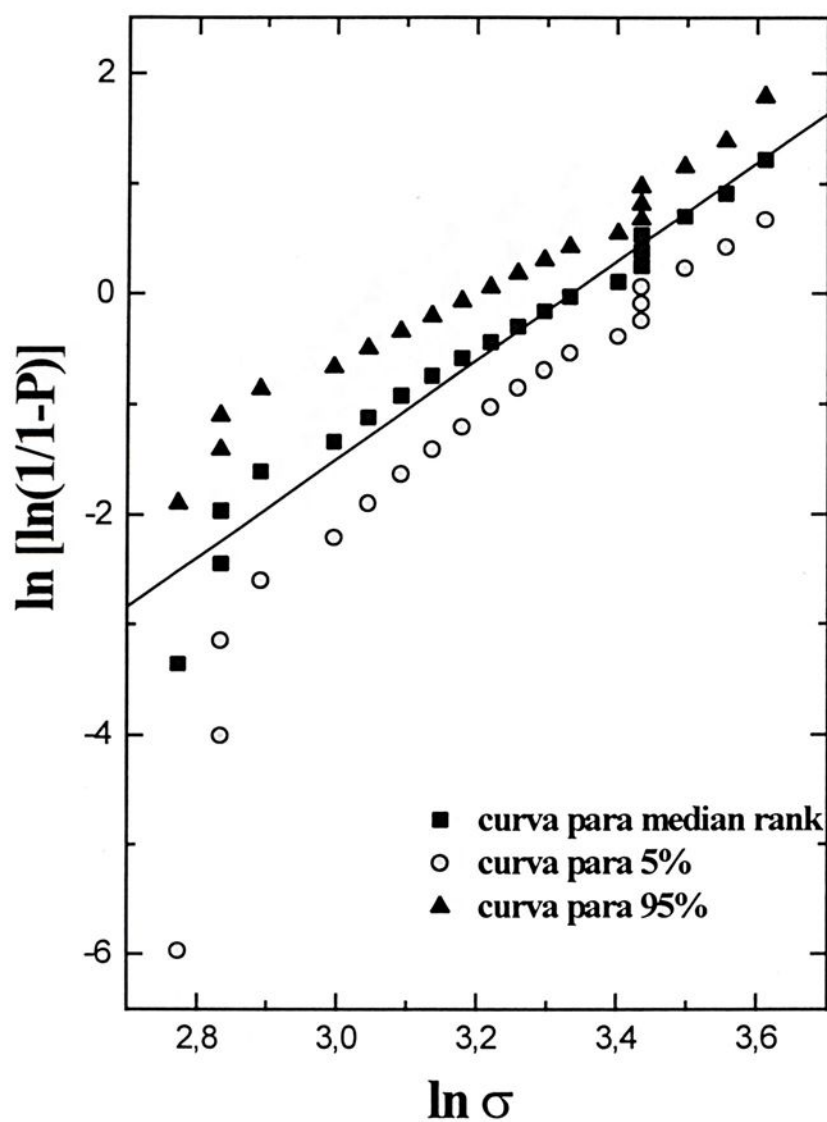


Figura 34 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código G

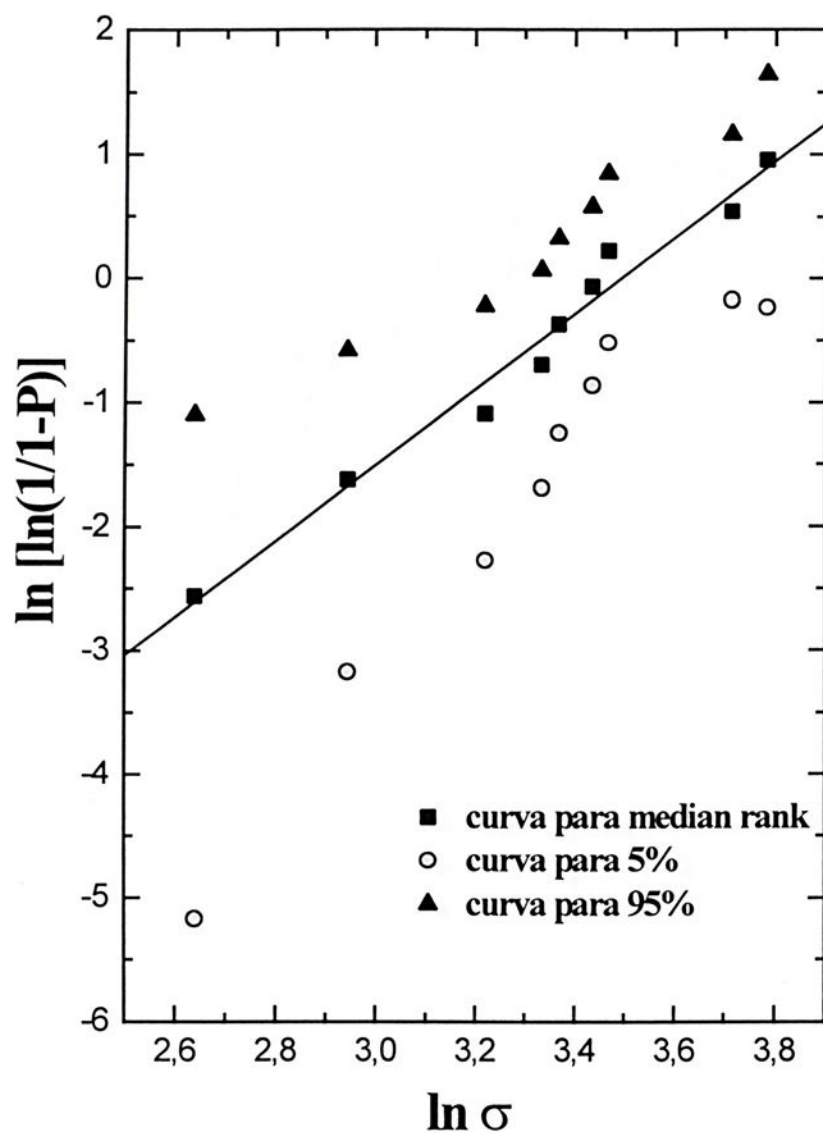


Figura 36 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tação transversal e código H

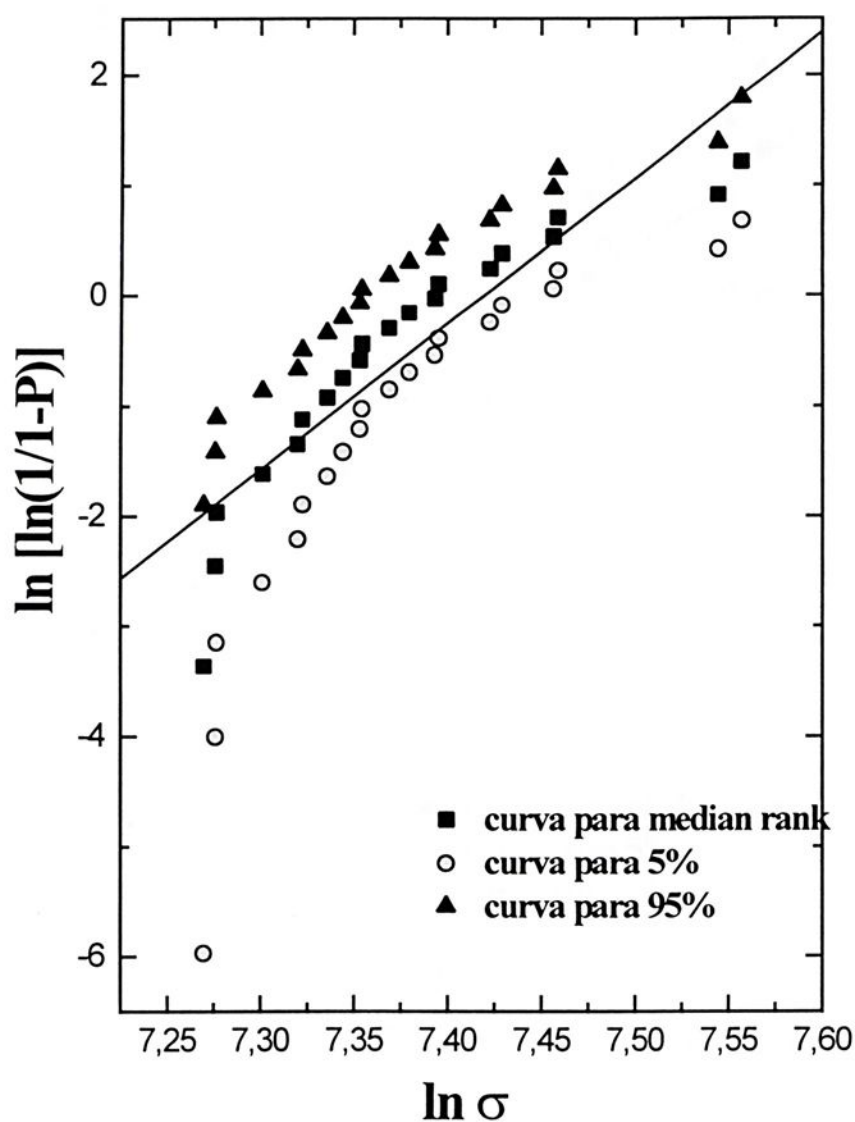


Figura 35 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código H

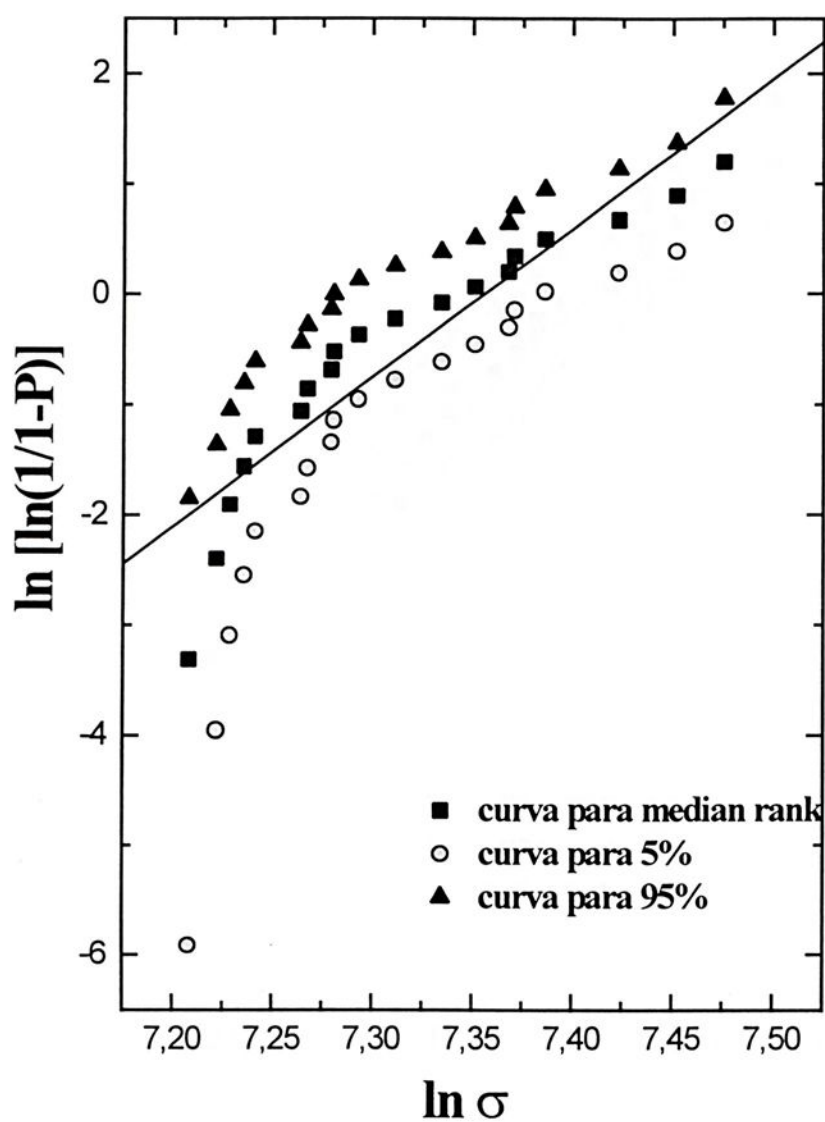


Figura 37 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código I

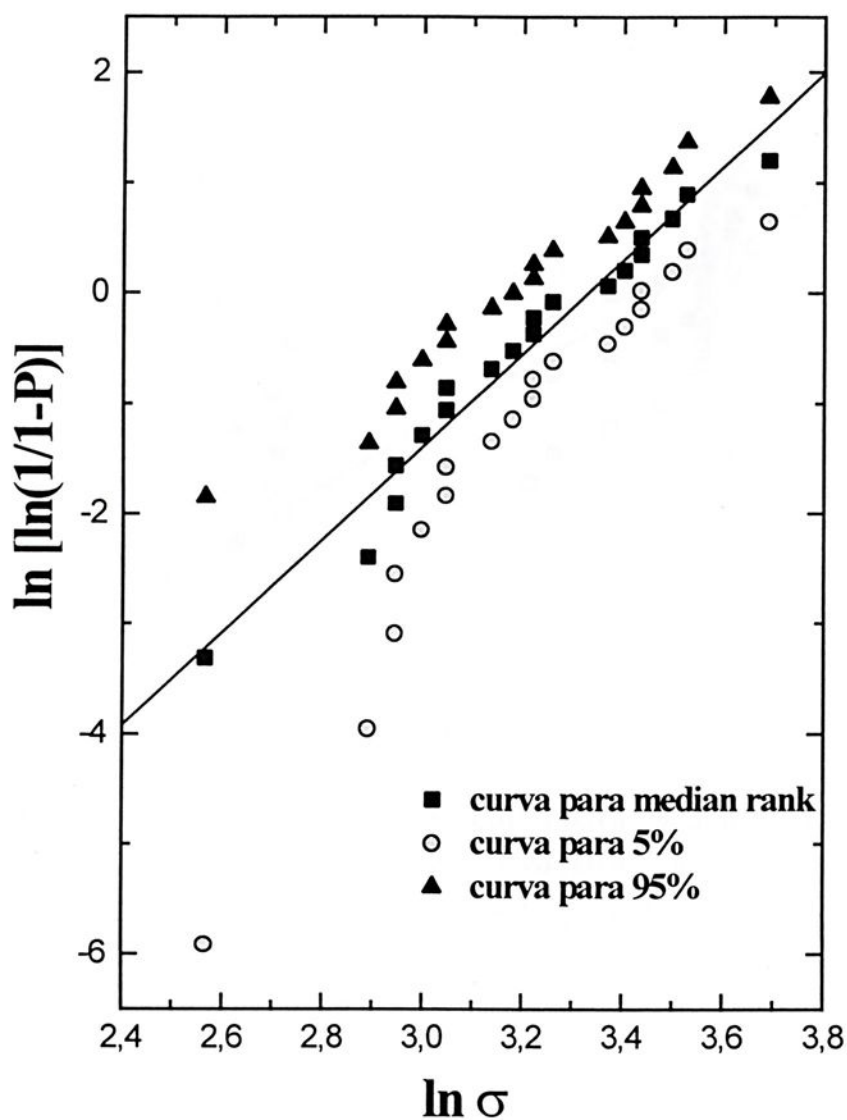


Figura 38 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas de Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código I



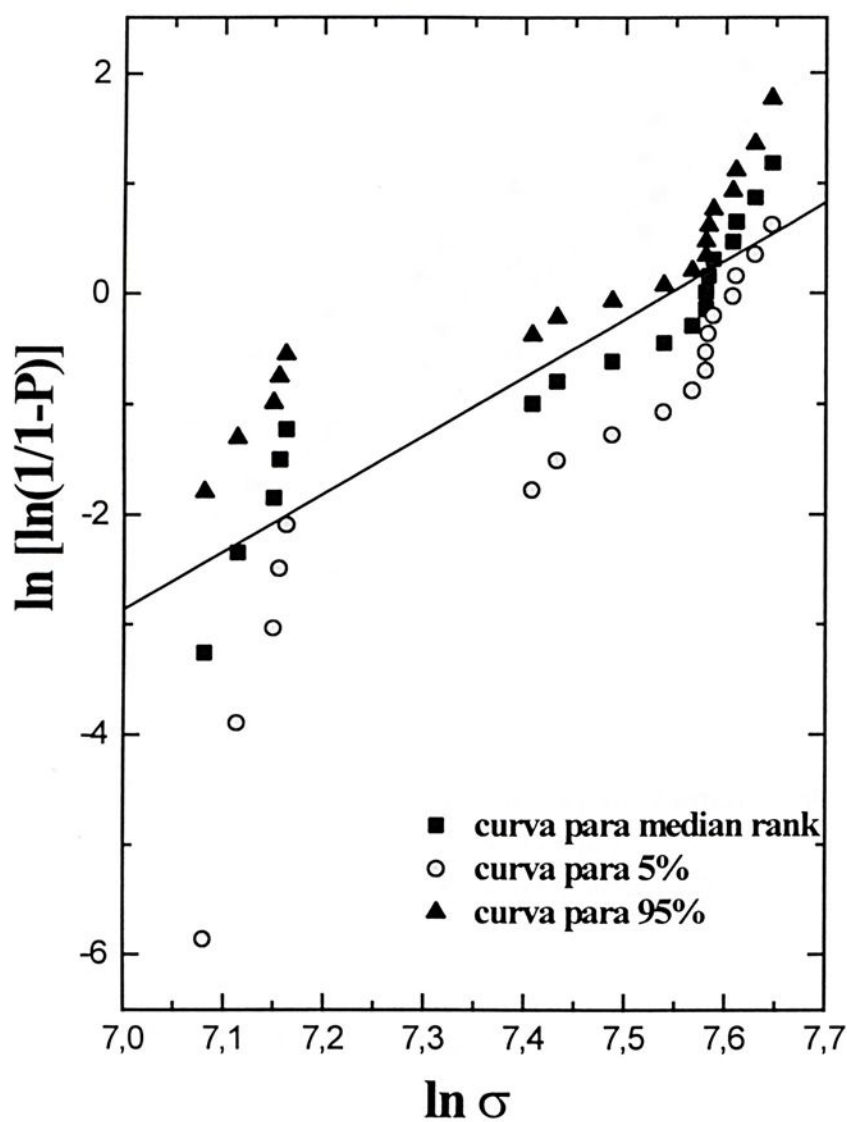


Figura 39 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração longitudinal e código J

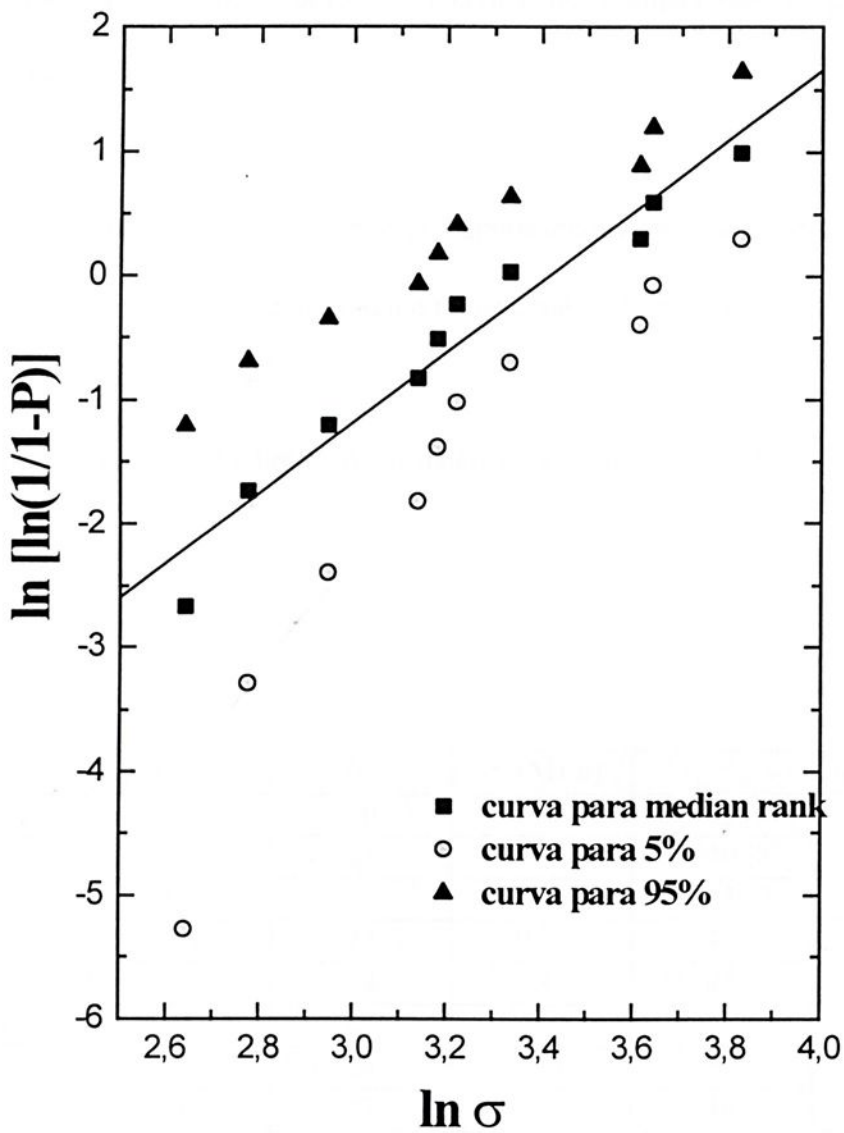


Figura 40 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para tração transversal e código J

4.5 - Tabela de dados para os ensaios de compressão longitudinal e transversal

Nas tabelas de 25 até 28 estão apresentados os valores dos limites de resistência à compressão longitudinal e transversal (σ_c) do material estudado.

Tabela 25 - Valores do limite de resistência à compressão longitudinal para o código A

Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)
1	920	20	978	39	1013
2	965	21	991	40	946
3	898	22	905	41	915
4	847	23	1034	42	882
5	833	24	797	43	952
6	1010	25	951	44	925
7	855	26	1016	45	931
8	817	27	927	46	862
9	911	28	982	47	1017
10	865	29	1036	48	910
11	827	30	973	49	833
12	853	31	952	50	883
13	897	32	932	51	931
14	867	33	980	52	915
15	917	34	937	53	900
16	881	35	951	54	937
17	957	36	991	55	870
18	936	37	946	56	810
19	937	38	852	57	921

Tabela 26 - Valores do limite de resistência à compressão longitudinal para o código B

Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)
1	939	11	884
2	908	12	891
3	815	13	862
4	933	14	1027
5	865	15	966
6	914	16	847
7	926	17	893
8	846	18	881
9	893	19	862
10	936	20	877

Tabela 27 - Valores do limite de resistência à compressão transversal para o código A

Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)
1	142	20	133
2	134	21	128
3	121	22	112
4	130	23	96
5	141	24	123
6	138	25	127
7	129	26	106
8	133	27	126
9	139	28	137
10	130	29	137
11	133	30	134
12	139	31	129
13	131	32	130
14	126	33	109
15	123	34	120
16	128	35	144
17	133	36	141
18	124	37	139
19	125	-	-

Tabela 28 - Valores do limite de resistência à compressão transversal para o código B

Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)	Nº	σ_c (MPa)
1	141	19	144	37	148
2	144	20	137	38	150
3	127	21	146	39	139
4	142	22	137	40	140
5	152	23	143	41	140
6	130	24	137	42	135
7	135	25	137	43	127
8	162	26	136	44	126
9	134	27	138	45	126
10	134	28	141	46	130
11	134	29	145	47	134
12	150	30	130	48	110
13	139	31	132	49	129
14	137	32	151	50	128
15	132	33	134	51	130
16	135	34	136	52	117
17	134	35	142	53	119
18	158	36	160	-	

4.6 - Histogramas para os dados de compressão longitudinal e transversal

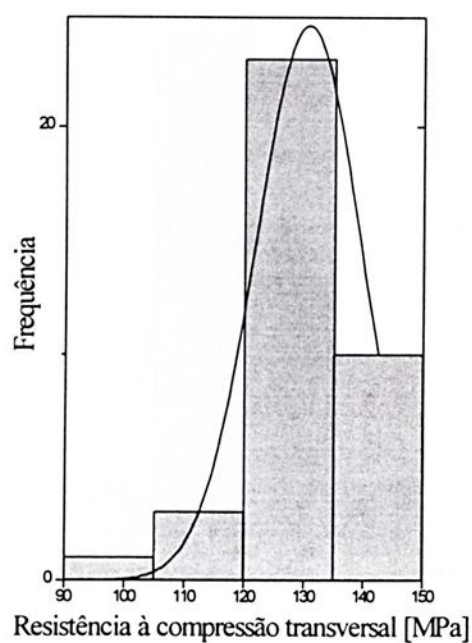
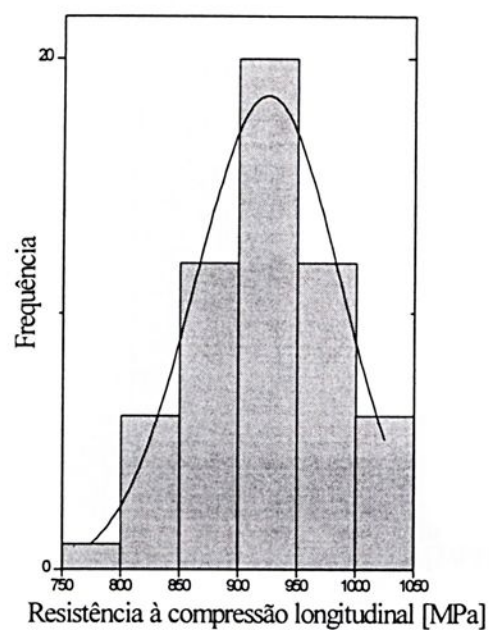


Figura 41 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à compressão para o código A

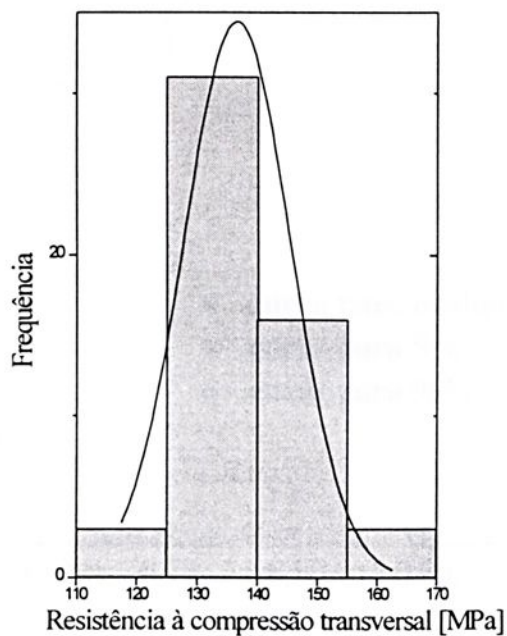
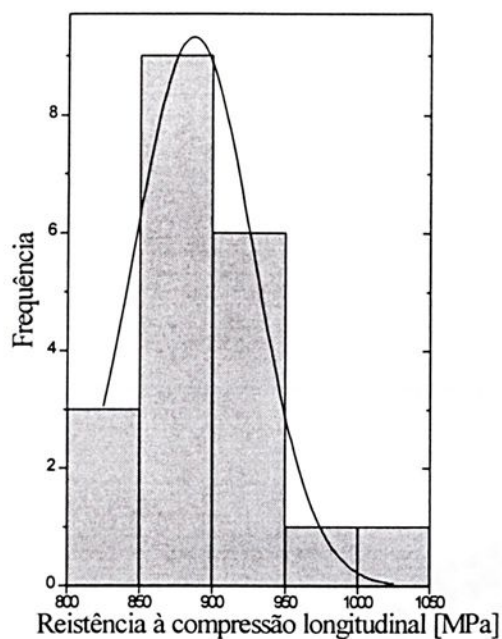


Figura 42 - Histogramas dos valores dos limites de resistência à compressão para o código B

4.7 - Curvas de distribuição de probabilidade de Weibull para compressão longitudinal e transversal

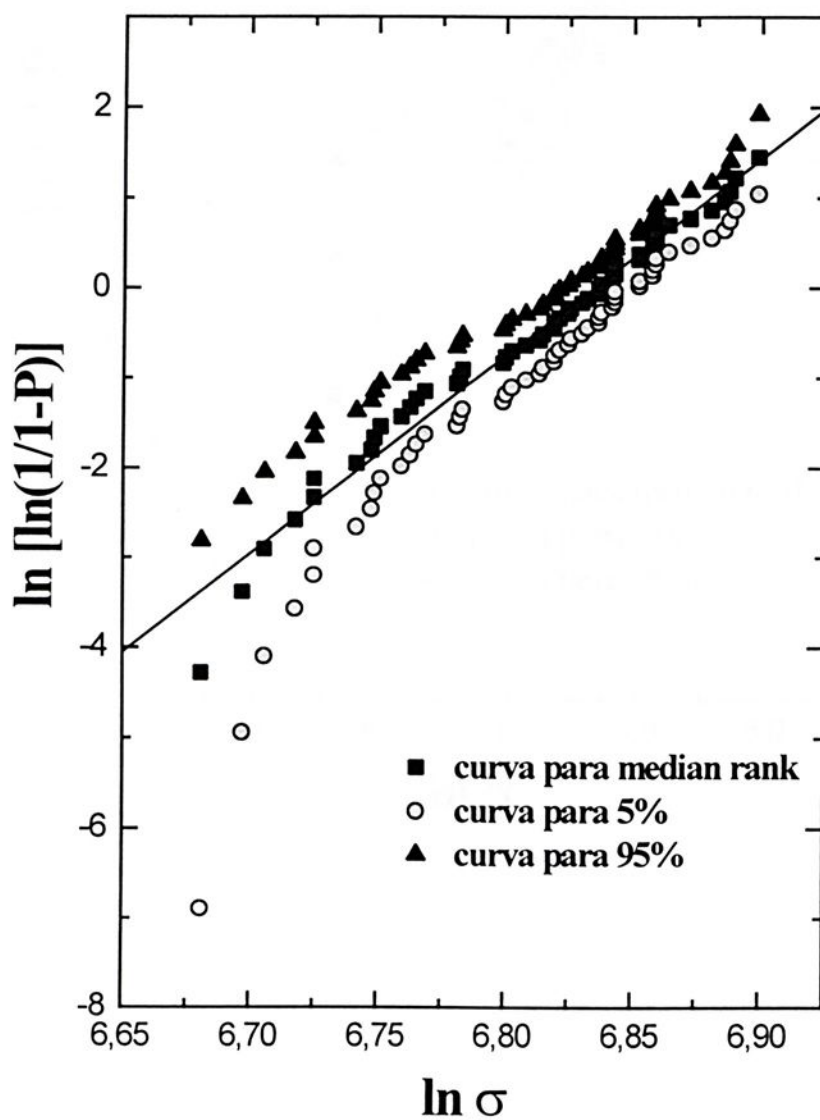


Figura 43 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para compressão longitudinal e código A

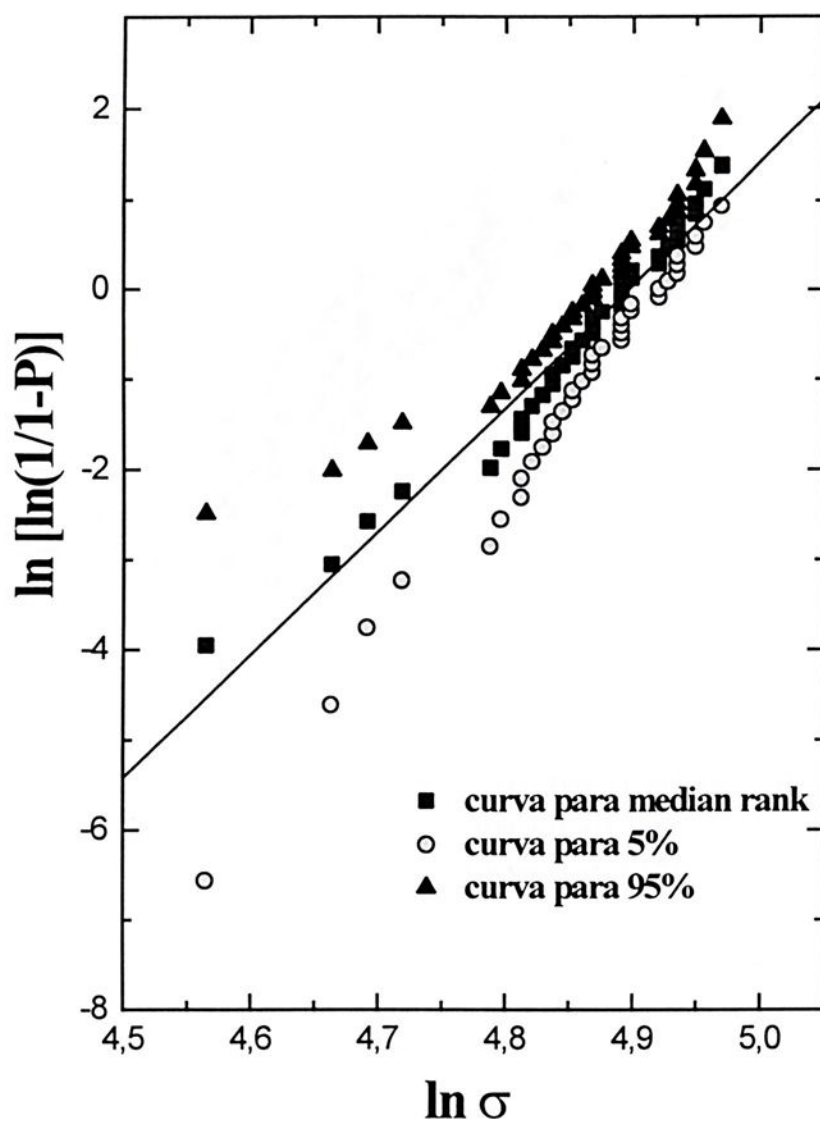


Figura 44 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para compressão transversal e código A

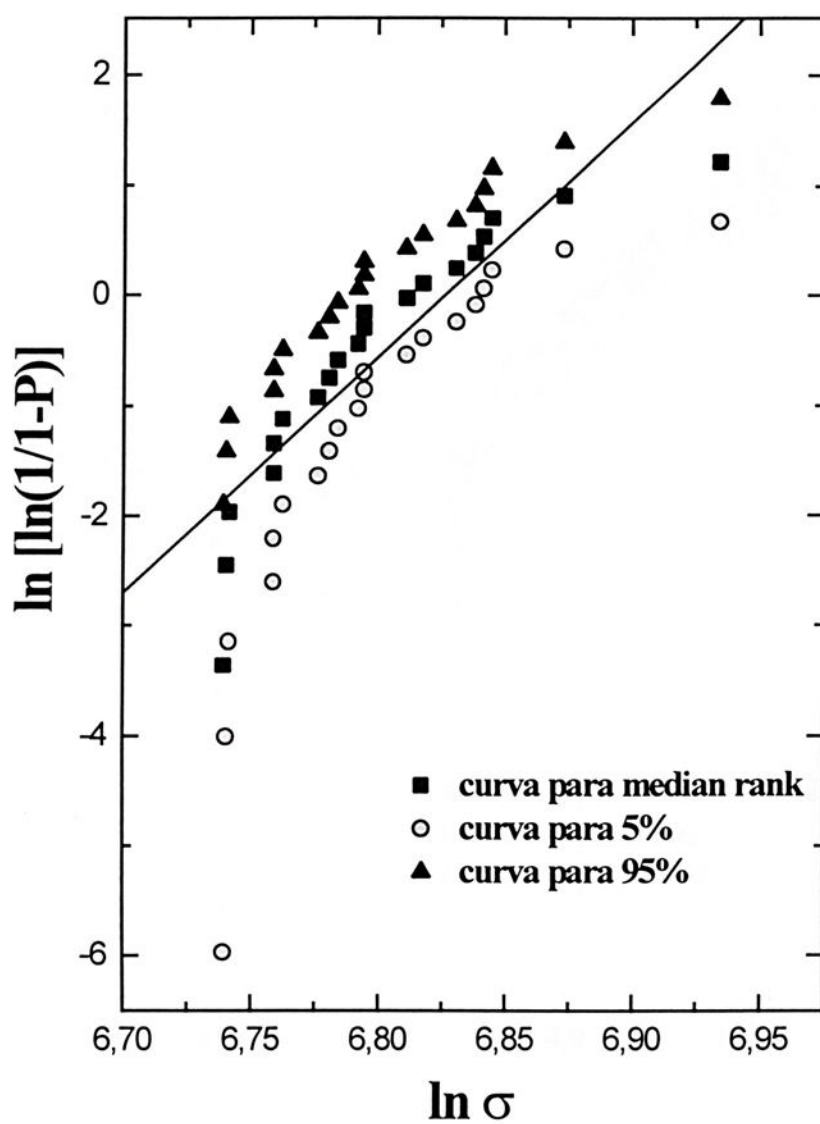


Figura 45 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para compressão longitudinal e códigoB

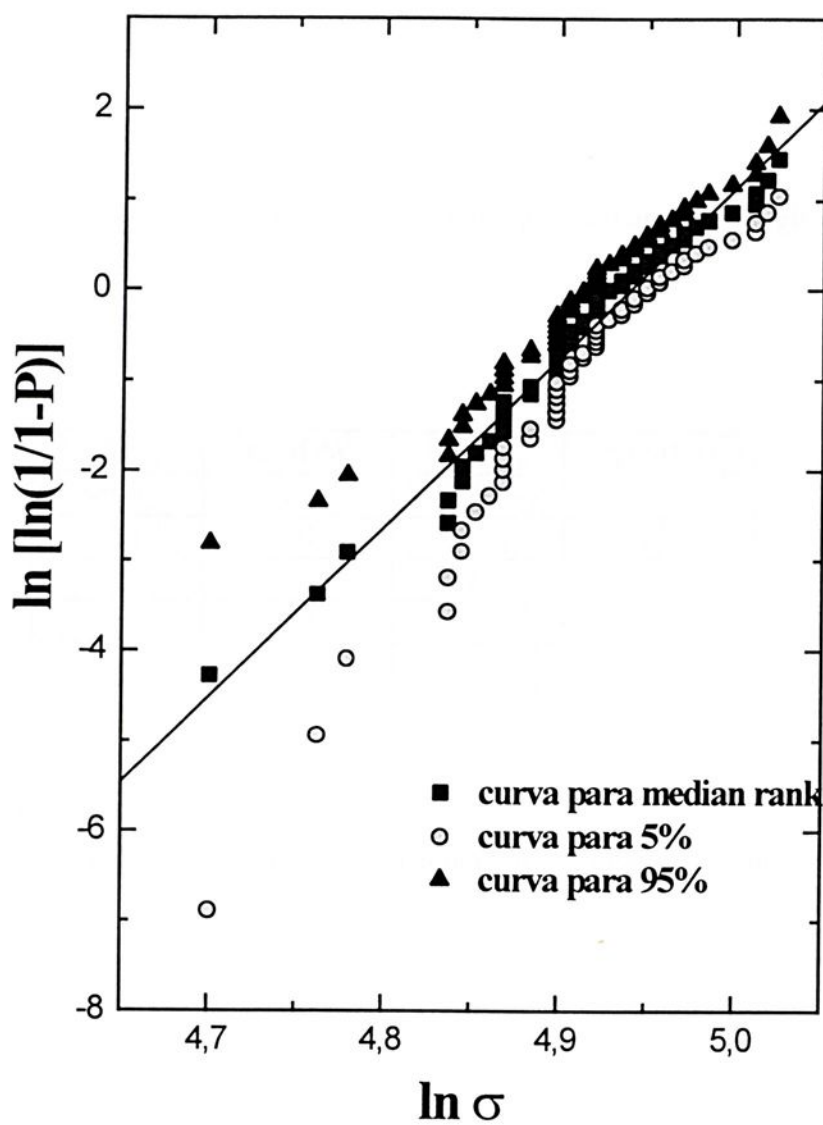


Figura 46 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para compressão transversal e código B

4.8 - Tabelas de dados para os ensaios de cisalhamento longitudinal e transversal

Tabela 29 - Valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal para o código B

Nº	τ_r (MPa)	Nº	τ_r (MPa)
1	52	6	56
2	58	7	59
3	58	8	56
4	60	9	58
5	56	-	-

Tabela 30 - Valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal para o código C

Nº	τ_r (MPa)	Nº	τ_r (MPa)
1	52	10	53
2	43	11	51
3	49	12	54
4	39	13	56
5	34	14	49
6	54	15	56
7	45	16	48
8	54	17	52
9	55	18	54

Tabela 31 - Valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal para o código B

Nº	τ_r (MPa)	Nº	τ_r (MPa)
1	60	8	62
2	59	9	59
3	65	10	60
4	58	11	69
5	62	12	66
6	69	13	69
7	59	14	-

Tabela 32 - Valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal para o código C

Nº	τ_r (MPa)	Nº	τ_r (MPa)
1	94	9	69
2	71	10	72
3	67	11	80
4	69	12	68
5	82	13	73
6	83	14	82
7	77	15	78
8	73	16	-

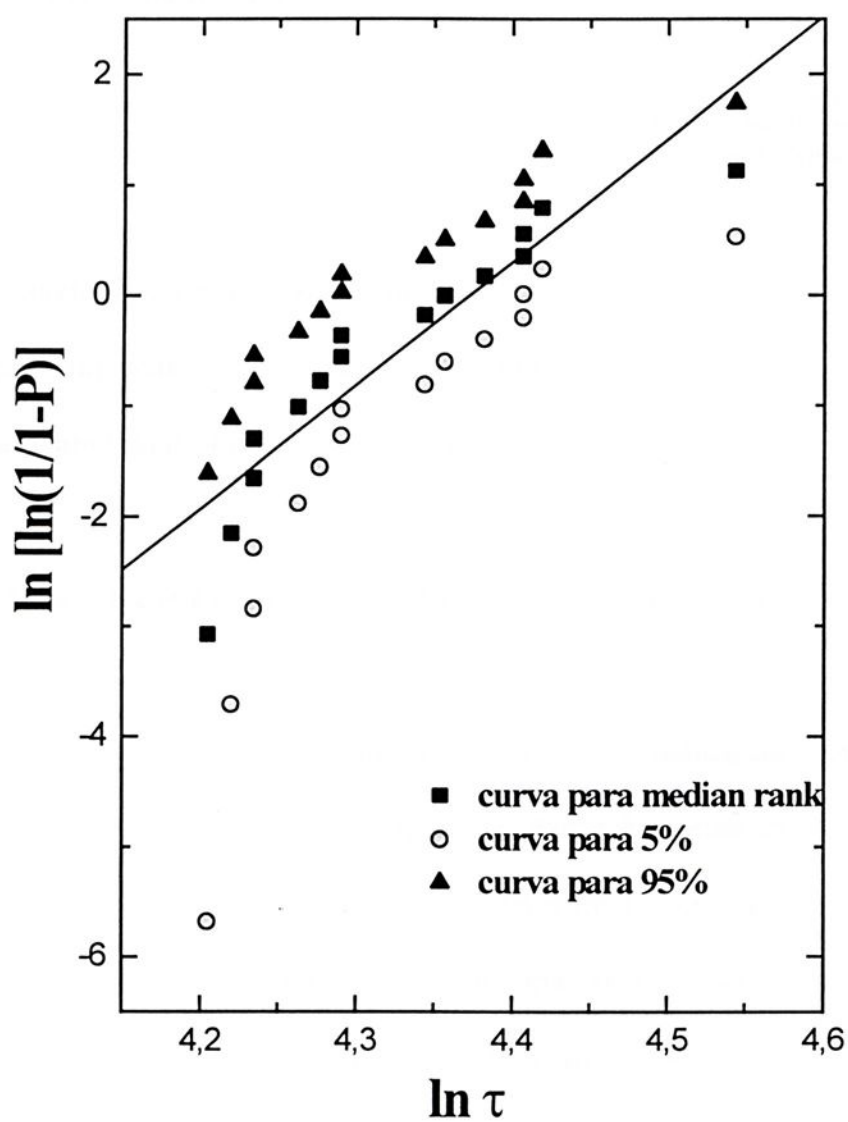


Figura 52 - Distribuição de probabilidade de Weibull. Curvas para Median Rank, 5% e 95% para cisalhamento transversal e código C

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES

**Pensar é mais interessante do
que saber, mas é menos
interessante do que olhar.
Johann Wolfgang von Goethe
(1749-1832)**

5.1 - Comentários preliminares relativos às tabelas dos valores de resistência à tração longitudinal, transversal e módulo de elasticidade; compressão e cisalhamento longitudinal e transversal:

5.1.1 - Com relação à natureza dos dados que serão analisados

Os valores de resistência à tração, compressão e cisalhamento apresentados integram um grande número de dados de caracterização mecânica (ensaios), que foram obtidos pelo CTM/SP nos anos de 1994 e 1995, com o principal objetivo de se estabelecer (ou poder se prever); o comportamento do material em situações ou esforços reais aos quais os mesmos serão futuramente submetidos.

5.1.2 - Com relação à dispersão dos valores

Pode-se verificar que os valores de resistência à tração, compressão e cisalhamento não apresentam uma dispersão significativa; no tocante a uma análise executada de uma forma menos rigorosa, levando-se somente em



consideração a verificação das tabelas apresentadas anteriormente e a diferença entre a ordem de grandeza dos valores obtidos.

5.1.3 - Com relação ao σ_t e $E(0^\circ) \gg \sigma_t$ e $E(90^\circ)$ e ao $\sigma_c(0^\circ) \gg \sigma_c(90^\circ)$

Pode ser observado que tanto para o σ_t quanto para E , os valores em tração longitudinal, ou seja, à (0°) são muito maiores que os valores observados em tração transversal (90°) .

Tomando-se as médias dos valores de limite de resistência no código A, em tração à 0° e tração à 90° pode-se afirmar que a diferença gira em torno de 6000%. Pode-se concluir então que o compósito apresenta um comportamento muito mais eficaz em tração longitudinal, onde a resistência dos filamentos pode ser aliada à resistência da matriz.

O mesmo pode ser observado para o σ_c em compressão longitudinal, ou seja, à (0°) são muito maiores que os valores observados em compressão transversal (90°) .

Com base nas médias dos valores de limite de resistência no código A, em compressão à 0° e à 90° pode-se afirmar que a diferença gira em torno de 614 %. Pode concluir que o compósito apresenta um comportamento muito mais eficaz em compressão longitudinal.



5.1.3 - Comparação dos valores médios do limite de resistência à tração, compressão e cisalhamento em ordem decrescente para os diversos códigos

Tabela 33 - Classificação do dados em ordem decrescente dos valores do limite de resistência médio à tração longitudinal e transversal

Códigos/ v_f (%)	σ , mínimo, médio e máximo à tração longitudinal (MPa)	Códigos/ v_f (%)	σ , mínimo, médio e máximo à tração transversal (MPa)
B/73,7	1961/ 2159,4/ 2282	B/73,7	14/ 32,6/ 50
G/72,2	1497/ 1935,1/ 2311	F/71,1	16/ 31,1/ 37
A/73,5	1742/ 1838,7/ 1909	H/60,9	7/ 29,2/ 58
F/71,1	1384/ 1824,5/ 2001	A/73,5	16,3/ 28,6/ 38,7
E/72,4	1520/ 1793/ 2200	J/68,0	11,6/ 27,0/ 37,7
J/68,0	1188/ 1734,5/ 2092	E/72,4	14/ 26,6/ 46
C/71,6	1381/ 1657,5/ 1992	G/72,2	11/ 25,3/ 38
H/60,9	1436/1605,3/ 1914	I/59,1	14/ 25,1/ 44
I/59,1	1350/ 1507,7/ 1764	C/71,6	13/ 21,5/ 40
D/65,5	1126/ 1353,5/ 1619	D/65,5	14,7/ 20,3/ 26,4

Com o auxílio da tabela 33, pode ser observado que há uma tendência que indica uma relação entre a resistência à tração longitudinal e a fração volumétrica das fibras; o mesmo não pode ser dito para os dados em tração transversal, uma vez que não há aparentemente relação entre estas variáveis.

Tabela 34 - Classificação dos códigos em ordem decrescente com relação ao limite de resistência médio

Códigos/ V_f (%)	σ_c mínimo,médio e máximo à compressão longitudinal (MPa)	Códigos/ V_f (%)	σ_c mínimo,médio e máximo à compressão transversal (MPa)
<i>A/73,5</i>	797/ 920,65/ 991	<i>B/73,7</i>	96/ 137,25/ 144
<i>B/73,7</i>	845/ 899,75/ 1027	<i>A/73,5</</i>	

A partir da tabela 35 pode ser observado com a classificação em ordem decrescente dos valores médios do limite de resistência que para o cisalhamento longitudinal existe uma indicação que com o aumento da fração volumétrica das fibras existe também um aumento no limite de resistência; o mesmo não pode ser observado no cisalhamento transversal, onde a fração volumétrica de fibras não apresenta por si só um como um parâmetro decisivo, mas sim, em conjunto com a direção do dispositivo de cisalhamento.

5.2 - Comentários relativos aos histogramas apresentados para os limite de resistência à tração longitudinal e transversal

Como limite de resistência é considerado uma variável aleatória, e normalmente as variáveis aleatórias apresentam na maioria das vezes um aspecto muito próximo a curva de Gauss, uma Gaussiana foi sobreposta aos histogramas com a finalidade de auxiliar nas análises. O histograma é uma forma gráfica de representação dos dados, logo os histogramas apresentados somente irão fornecer uma forma de auxílio visual da distribuição dos dados.

Para a maioria dos códigos pode ser verificado que a distribuição de frequência tanto para os valores do limite de resistência à tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal, apresentam na sua grande maioria um espalhamento bastante uniforme, ou como pode ser visto bastante semelhantes às curvas de Gauss. Somente alguns casos apresentam algum tipo de anomalia, como



por exemplo as figuras 13, 14 e 18 em tração transversal e 15, 16, 19 e 20 em tração longitudinal.

5.3 - Comentários relativos às curvas de distribuição de probabilidade de Weibull

5.3.1 - Com relação ao módulo de Weibull (m)

No tocante ao módulo de Weibull (m) pode ser dito que quanto maior o módulo menor é o espalhamento dos valores do limite de resistência para o material, logo para tração e compressão longitudinal os valores do módulo de Weibull são sempre maiores, o que significa um menor espalhamento. Já para o cisalhamento longitudinal os valores do módulo de Weibull se apresentam ligeiramente maiores o que significa um menor espalhamento.

5.3.2 - Com relação à determinação do intervalo de 90° de confiança

Após o levantamento das curvas de Weibull, onde são plotados além dos valores medianos, as curvas para 5% e 95%, algumas conclusões no que diz respeito à uma faixa de valores de limite de resistência com uma confiabilidade de 90%, pode ser encontrado; como pode ser observado na figura 54.



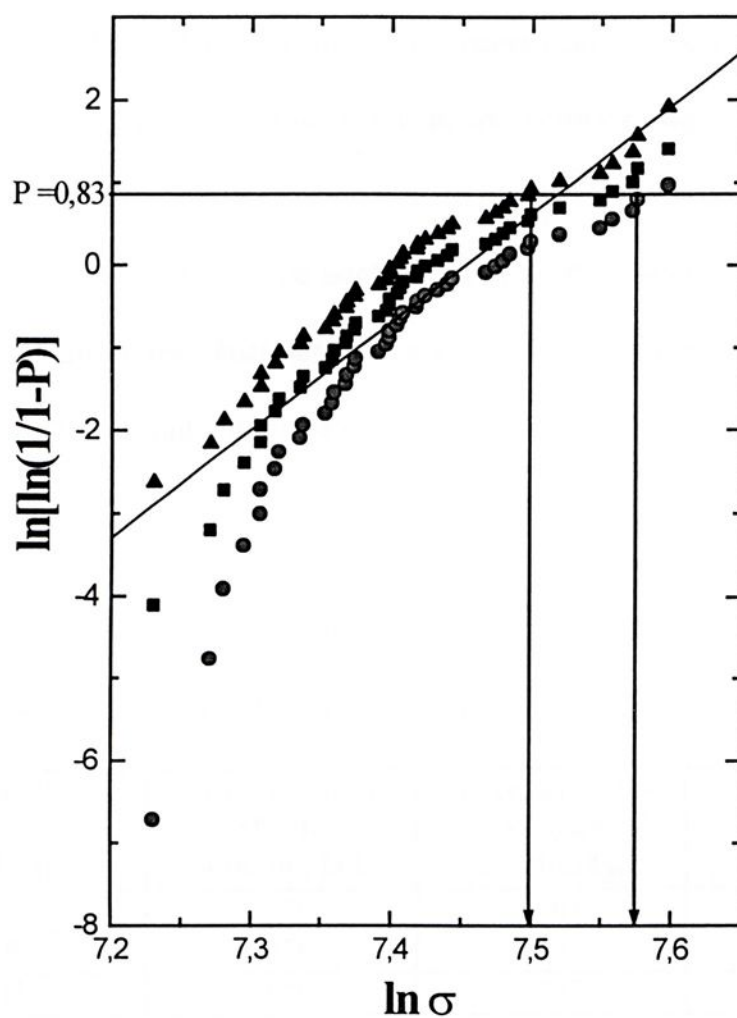


Figura 53 - Determinação do limite de confiança de 90% à partir da curva de Weibull

No eixo das ordenadas $[\ln \ln(1/(1-P))]$, para um valor de probabilidade de aproximadamente $P = 0,83$, o que corresponde a 90% de probabilidade, é traçada

uma reta que se intercepta com as curvas dos limites de confiança de 5% e de 95%. Assim que a reta intercepta as curvas, ela é rebatida para o eixo das abcissas, onde a faixa dos valores de limite de resistência à tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal com uma confiabilidade de 90% possa ser definida.

Os extremos da faixa de confiança (5% e 95%) assim como os valores médios do limite de resistência a tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal, são mostrados nas tabelas, a seguir.

Tabela 36 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à tração longitudinal

Tração longitudinal (MPa)	Valores do σ_t com 5% de confiabilidade	Valores do σ_t com 95% de confiabilidade	Valores do σ_t médio
A	1920	1863	1838,7
B	2276	2231	2159,4
C	1939	1755	1657,5
D	1686	1510	1353,5
E	2208	1939	1793,0
F	1939	2208	1824,5
G	2441	2165	1935,1
H	1920	1669	1605,3
I	1755	1572	1507,7
J	2100	1939	1734,5

Tabela 37 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à tração transversal

Tração transversal (MPa)	Valores do σ_t com 5% de confiabilidade	Valores do σ_t com 95% de confiabilidade	Valores do σ_t médio
<i>A</i>	62,2	37,7	28,6
<i>B</i>	54,6	44,7	32,6
<i>C</i>	36,6	25,3	21,5
<i>D</i>	27,9	23,3	20,3
<i>E</i>	37,3	30,6	26,6
<i>F</i>	44,7	36,6	31,1
<i>G</i>	37,3	30,6	25,3
<i>H</i>	46	31,8	29,2
<i>I</i>	40,4	30,6	25
<i>J</i>	49,4	36,6	27

Tabela 38 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à compressão longitudinal

Compressão longitudinal (MPa)	Valores do σ_c com 5% de confiabilidade	Valores do σ_c com 95% de confiabilidade	Valores do σ_c médio
<i>A</i>	992,3	943,9	920,6
<i>B</i>	1.032,8	925,2	899,7

Tabela 39 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência à compressão transversal

Compressão transversal (MPa)	Valores do σ_c com 5% de confiabilidade	Valores do σ_c com 95% de confiabilidade	Valores do σ_c médio
<i>A</i>	151,2	144	128,9
<i>B</i>	150	144	137,2

Tabela 40 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal

Cisalhamento longitudinal (MPa)	Valores do σ_t com 5% de confiabilidade	Valores do σ_t com 95% de confiabilidade	Valores do τ_r médio
<i>B</i>	61,6	58,6	57,00
<i>C</i>	60,3	54,6	49,89

Tabela 41 - Determinação do intervalo de confiança de 90% e comparação com a média dos valores do limite de resistência ao cisalhamento transversal

Cisalhamento transversal (MPa)	Valores do σ_t com 5% de confiabilidade	Valores do σ_t com 95% de confiabilidade	Valores do τ_r médio
<i>B</i>	68,7	66,00	62,85
<i>C</i>	94,63	81,45	75,87

Pode ser observado com o auxílio das tabelas anteriores, que a grande maioria dos valores médios dos limites de resistência à tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal se encontram próximos da faixa de 90% de confiabilidade, ou seja, a média dos valores está situada nas proximidades de uma faixa bastante aceitável de confiabilidade, de onde se pode concluir que o uso do material em estruturas onde um alto grau de confiabilidade é exigido pode ser aceitável.

5.4 - Análise estatística dos dados para tração, compressão e cisalhamento longitudinal e transversal

Nas tabelas à seguir serão apresentados todos os parâmetros estatísticos que se mostram necessários para uma análise estatística minuciosa dos valores de resistência à tração, compressão e cisalhamento do compósito.

Curvas de Weibull serão apresentadas onde o módulo de Weibull possa ser definido com a finalidade de se caracterizar o espalhamento dos valores do limite de resistência do material, levando em consideração fatores como a variação dos códigos e dos ângulos de corte, segundo a orientação original das fibras no material.

Alguns dos parâmetros estatísticos que serão largamente empregados no decorrer do trabalho são: média (σ , τ e E), desvio-padrão, variância e coeficiente



analisadas de uma maneira bastante clara, havendo necessidade para tal de serem apresentadas em dois grupos distintos:

- comparação entre os ângulos, e
- comparação entre os códigos.

5.4.1 - Comparação dos dados entre os ângulos

Nas tabelas de 42 a 51 serão apresentados os valores das médias-
aritméticas do limite de resistência à tração, compressão e cisalhamento e módulo
de elasticidade, desvio-padrão, variância, coeficiente de variação e módulo de
Weibull para os códigos de A até J; e ângulos de corte de 0° e 90° (longitudinal e
transversal, respectivamente). Estes dados serão apresentados em forma de
tabelas, para que se tornem mais claros para efeito de análise.



Tabela 42 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código A

$v_f = 73,5\%$; $v_v = 1,97\%$ $\rho = 1,60 \text{ g/ml}$	CÓDIGO A	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_i) [MPa]	1838,7	28,61
Média Aritmética (E) [GPa]	160,13	10,20
Desvio-Padrão (s) [MPa]	59,44	10,42
Variância (s^2) [MPa ²]	3533,1	108,58
Coefficiente de Variação (cv) [%]	3,23	36,42
Módulo de Weibull (m)	32,03	3,04

Tabela 43 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B

$v_f = 73,7\%$; $v_v = 2,4\%$ $\rho = 1,59 \text{ g/ml}$	CÓDIGO B	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_i) [MPa]	2159,4	32,64
Média Aritmética (E) [GPa]	148,59	10,29
Desvio-Padrão (s) [MPa]	92,27	12,48
Variância (s^2) [MPa ²]	8513,7	155,75
Coefficiente de Variação (cv) [%]	4,27	38,24
Módulo de Weibull (m)	26,57	2,75

Tabela 44 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código C

$v_f = 71,6\%$; $v_v = 2,5\%$ $\rho = 1,58 \text{ g/ml}$	CÓDIGO C	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_t) [MPa]	1657,5	21,52
Média Aritmética (E) [GPa]	140,52	8,91
Desvio-Padrão (s) [MPa]	149,18	7,09
Variância (s^2) [MPa ²]	22.254,6	50,27
Coefficiente de Variação (cv) [%]	9,00	32,95
Módulo de Weibull (m)	13,08	3,56

Tabela 45 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código D

$v_f = 65,5\%$; $v_v = 3,9\%$ $\rho = 1,53 \text{ g/ml}$	CÓDIGO D	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_t) [MPa]	1353,5	20,34
Média Aritmética (E) [GPa]	126,6	10,34
Desvio-Padrão (s) [MPa]	157,3	4,93
Variância (s^2) [MPa ²]	24.746	24,30
Coefficiente de Variação (cv) [%]	11,62	24,24
Módulo de Weibull (m)	9,34	4,09

Tabela 46 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos),do material para o código E

$v_f = 72,4\%$; $v_v = 3,4\%$ $\rho = 1,60 \text{ g/ml}$	CÓDIGO E	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_t) [MPa]	1793,0	26,64
Média Aritmética (E)	189,06	8,39
Desvio-Padrão (s) [MPa]	186,93	7,04
Variância (s^2) [MPa ²]	3.494,8	49,56
Coefficiente de Variação (cv) [%]	10,43	26,43
Módulo de Weibull (m)	10,76	3,79

Tabela 47 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos),do material para o código F

$v_f = 71,1\%$; $v_v = 3,9\%$ $\rho = 1,56 \text{ g/ml}$	CÓDIGO F	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_t) [MPa]	1824,5	31,11
Média Aritmética (E) [GPa]	140,22	8,87
Desvio-Padrão (s) [MPa]	196,25	6,08
Variância (s^2) [MPa ²]	38.514	36,97
Coefficiente de Variação (cv) [%]	10,76	19,54
Módulo de Weibull (m)	9,01	4,85

Tabela 48 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código G

$v_f = 72,2\%$; $v_v = 5,5\%$ $\rho = 1,55 \text{ g/ml}$	CÓDIGO G	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_v) [MPa]	1935,1	25,33
Média Aritmética (E) [GPa]	138,35	8,90
Desvio-Padrão (s) [MPa]	268,80	6,29
Variância (s^2) [MPa ²]	72.253	39,56
Coefficiente de Variação (cv) [%]	13,89	24,83
Módulo de Weibull (m)	7,97	4,49

Tabela 49 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código H

$v_f = 60,9\%$; $v_v = 1,75\%$ $\rho = 1,53 \text{ g/ml}$	CÓDIGO H	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ_v) [MPa]	1605,3	29,22
Média Aritmética (E) [GPa]	122,4	10,89
Desvio-Padrão (s) [MPa]	134,87	9,51
Variância (s^2) [MPa ²]	1818,9	90,44
Coefficiente de Variação (cv) [%]	8,40	32,55
Módulo de Weibull (m)	13,19	3,06

Tabela 50 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos),do material para o código I

$v_f=59,1\%$; $v_v=3,6\%$ $\rho = 1,50 \text{ g/ml}$	CÓDIGO I	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ) [MPa]	1507,7	25,10
Média Aritmética (E) [GPa]	116,47	12,81
Desvio-Padrão (s) [MPa]	123,37	6,43
Variância (s^2) [MPa]	15.220	41,39
Coefficiente de Variação (cv) [%]	8,18	25,62
Módulo de Weibull (m)	13,52	4,22

Tabela 51 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos),do material para o código J

$v_f=68,00\%$; $v_v=6,1\%$ $\rho = 1,52 \text{ g/ml}$	CÓDIGO J	
	TRAÇÃO 0°	TRAÇÃO 90°
Média Aritmética (σ) [MPa]	1734,5	27,0
Média Aritmética (E) [GPa]	151,44	10,20
Desvio-Padrão (s) [MPa]	329,41	10,36
Variância (s^2) [MPa]	108.510	107,33
Coefficiente de Variação (cv) [%]	18,99	38,37
Módulo de Weibull (m)	5,27	2,84

Pode ser observado nas tabelas anteriores, na comparação entre os ângulos de orientação do corte do material (0° e 90°) mantendo constantes os códigos, que com relação ao desvio-padrão, os resultados obtidos são na grande maioria dos

casos inferiores à 10% da média dos valores do limite de resistência para à tração longitudinal, e em alguns casos os valores são bastante similares.

Já em tração transversal os valores dos desvios-padrão são superiores à 10%, o que pode ser explicado devido ao fato das propriedades das fibras não exercerem um papel tão importante, restando somente as propriedades da resina como o fator chave e responsável pelas propriedades de resistência.

Isto significa dizer que sendo o desvio-padrão uma medida de espalhamento dos pontos experimentais, que uma grande maioria dos pontos estão concentrados em uma determinada faixa de valores, ou seja, os valores médios dos limites de resistência podem ser considerados como sendo bastante representativos da amostra.

No que se refere aos valores médios do limite de elasticidade (E), com os cálculos do desvio-padrão (não apresentados), pode ser notado que os valores dos mesmos estão bastante coerentes com os dados apresentados, e girando em torno de 10% desses valores.

Possíveis explicações podem ser encontradas para que esses resultados possam ser esclarecidos. Na verdade não existe uma relação simples para poder se prever a resistência à tração transversal, ao contrário da resistência à tração longitudinal que é determinado quase que inteiramente por um fator simples, isto é, a resistência da fibra ($\sigma_{\parallel} = \sigma_f V_f$).¹

Existem diversos fatores que governam a resistência à tração transversal, inclusive fatores relacionados às propriedades da fibra e da matriz como,



resistência à adesão interfacial, presença e distribuição de vazios, tensões internas e a distribuição da deformação devido a interação entre fibras e vazios.

Na resistência à tração transversal em um laminado pode ser dita que é pequena ou quase inexistente uma interface adesiva, e a mesma é determinada pela resistência da resina.¹

Tabela 52 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código A

$v_f = 73,5\%$; $v_v = 1,97\%$ $\rho = 1,60 \text{ g/ml}$	CÓDIGO A	
	COMPRESSÃO 0°	COMPRESSÃO 90°
Média Aritmética (σ_c) [MPa]	920,65	128,92
Desvio-Padrão (s) [MPa]	58,86	10,41
Variância (s^2) [MPa ²]	3.464,38	108,35
Coefficiente de Variação (cv) [%]	6,39	8,07
Módulo de Weibull (m)	21,97	13,67

Tabela 53 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B

$v_f = 73,7\%$; $v_v = 2,4\%$ $\rho = 1,59 \text{ g/ml}$	CÓDIGO B	
	COMPRESSÃO 0°	COMPRESSÃO 90°
Média Aritmética (σ_c) [MPa]	899,76	137,25
Desvio-Padrão (s) [MPa]	45,60	10,01
Variância (s^2) [MPa ²]	2.079,67	100,27
Coefficiente de Variação (cv) [%]	5,07	7,30
Módulo de Weibull (m)	21,37	18,86

Pode ser observado nas tabelas anteriores, na comparação entre os ângulos de orientação do corte do material (0° e 90°), mantendo constantes os códigos que com relação ao desvio-padrão dos resultados obtidos são na grande maioria dos casos inferiores à 10% da média do valores do limite de resistência à compressão longitudinal e transversal.

No tocante ao coeficiente de variação (cv), pode-se dizer que o material está de acordo com o que foi enunciado anteriormente na literatura; ou seja, quanto menor o coeficiente de variação mais seguro é o material, visto que para a compressão longitudinal o coeficiente de variação é ligeiramente menor do que para a compressão transversal.

Deve ser salientado que tanto para compressão longitudinal quanto para compressão transversal, os valores do coeficiente de variação (cv) e do módulo de Weibull (m), apresentam praticamente a mesma ordem de grandeza o que pode indicar que em compressão a variação nos ângulos de corte do material não exerce uma influência muito significativa, no tocante ao espalhamento dos valores de resistência e em termos de segurança do material.

Possíveis explicações podem ser encontradas para que esses resultados possam ser esclarecidos. Na verdade não existe no momento muito o que se estudar a respeito de falhas por compressão. Do mesmo modo que a tração transversal e a resistência ao cisalhamento, a resistência à compressão longitudinal depende de fatores como fibra e propriedades da resina, interface adesiva e



quantidade de vazios. O modo de falha está particularmente ligado à fração volumétrica das fibras e também às propriedades da resina.¹

Tabela 54 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código B

$v_f = 73,7\%$; $v_v = 2,4\%$ $\rho = 1,59 \text{ g/ml}$	CÓDIGO B	
	CISALHAMENTO 0°	CISALHAMENTO 90°
Média Aritmética (τ_r) [MPa]	57,00	62,85
Desvio-Padrão (s) [MPa]	2,35	4,22
Variância (s^2) [MPa ²]	5,50	17,81
Coeficiente de Variação (cv) [%]	4,11	6,72
Módulo de Weibull (m)	19,94	15,46

Tabela 55 - Parâmetros estatísticos com dados comparados segundo a orientação de corte (ângulos), do material para o código C

$v_f = 71,6\%$; $v_v = 2,5\%$ $\rho = 1,58 \text{ g/ml}$	CÓDIGO C	
	CISALHAMENTO 0°	CISALHAMENTO 90°
Média Aritmética (τ_r) [MPa]	49,89	75,87
Desvio-Padrão (s) [MPa]	6,12	7,41
Variância (s^2) [MPa ²]	37,40	54,84
Coeficiente de Variação (cv) [%]	12,26	9,76
Módulo de Weibull (m)	8,32	11,17

Pode ser observado nas tabelas anteriores que, na comparação entre os ângulos de orientação do corte do material (0° e 90°), mantendo constantes os

códigos que com relação ao desvio-padrão os resultados obtidos estão na maioria dos casos, praticamente em torno dos 10% da média dos valores do limite de resistência ao cisalhamento longitudinal e transversal. De forma análoga à tração e compressão, os valores dos limites de resistência podem ser considerados como sendo bastante representativos da amostra.

Como pode ser observado, devido a uma diferença muito pequena na ordem de grandeza dos valores para cisalhamento longitudinal e transversal, tanto do coeficiente de variação (cv) quanto do módulo de Weibull (m), que em cisalhamento a mudança na orientação do corte do material não é um fator tão significativo comparado com os resultados obtidos para os ensaios de tração.

Possíveis explicações podem ser encontradas para que esses resultados possam ser esclarecidos. A resistência ao cisalhamento intralaminar depende da direção dos dispositivos de cisalhamento, os extremos correspondem a tensão de cisalhamento τ_{12} e τ_{21} aplicada paralela às fibras e perpendicular às fibras.¹

Análogo a tração e a compressão, a resistência ao cisalhamento depende dos efeitos da concentração de tensões associado à presença de fibras e vazios e ainda da resistência da adesão interfacial.¹

5.4.2 - Comparação dos dados entre os códigos

Para que uma comparação mais efetiva dos dados possa ser realizada entre os códigos (que indicam a fração volumétrica de fibras presentes no material),

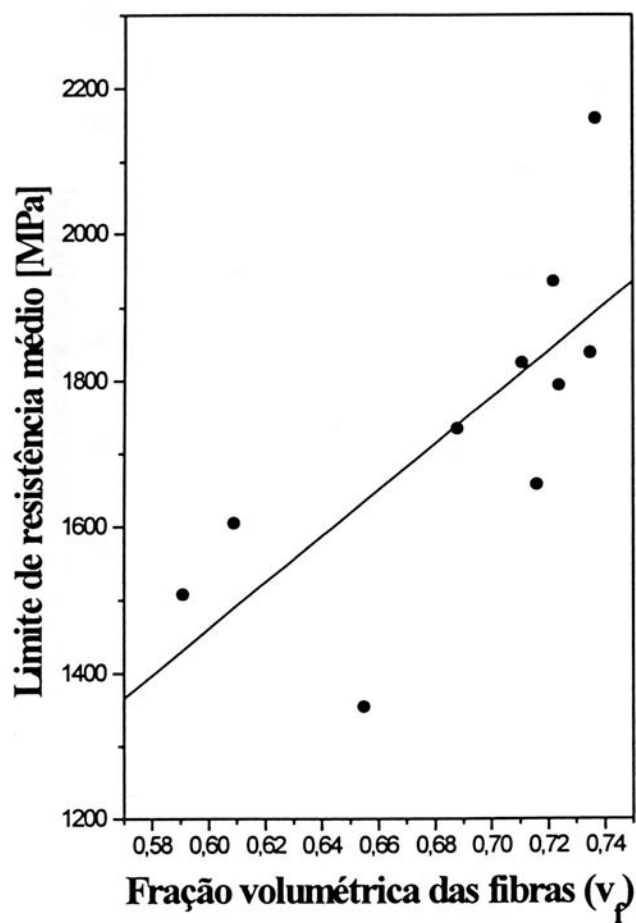


onde os ângulos serão mantidos constantes, os mesmos serão apresentados na forma de tabelas, como mostrado nas tabelas 56, 57 e 58.

Tabela 56 - Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos que indicam a fração volumétrica das fibras contidas no material

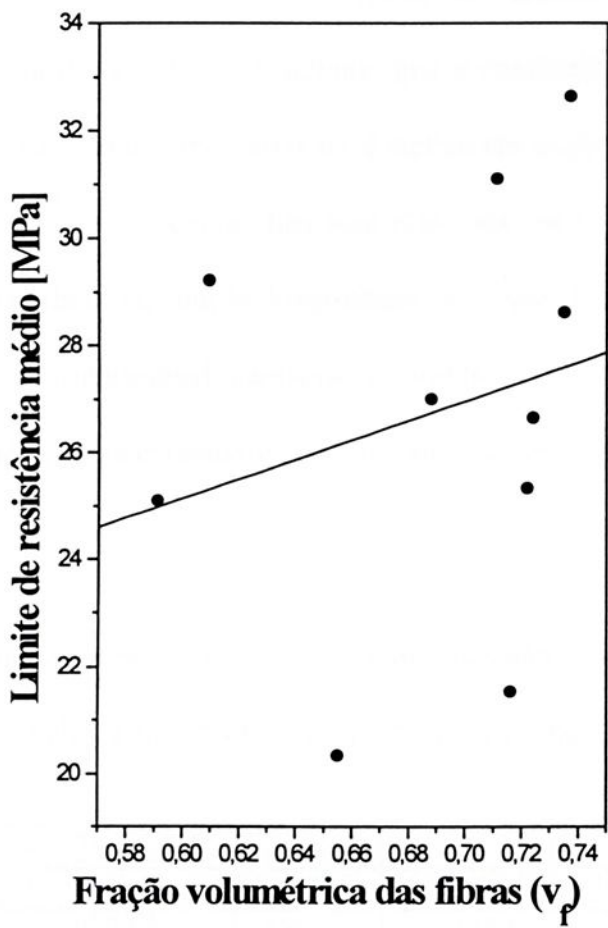
Códigos	0°					90°				
	σ_t (MPa)	E (GPa)	s (MPa)	cv (%)	m	σ_t (MPa)	E (GPa)	s (MPa)	cv (%)	m
A	1838,7	160,13	59,44	3,23	32,03	28,61	10,20	10,42	36,42	3,04
B	2159,4	148,59	92,27	4,27	26,57	32,64	10,29	12,48	38,24	2,75
C	1657,5	140,52	149,18	9,00	13,08	21,52	8,91	7,09	32,95	3,56
D	1353,5	126,60	157,31	11,62	9,34	20,34	10,34	4,93	24,24	4,09
E	1793,0	189,06	186,93	10,43	10,76	26,64	8,39	7,04	26,43	3,79
F	1824,56	140,22	196,25	10,76	9,01	31,11	8,87	6,08	19,54	4,85
G	1935,18	138,35	268,80	13,89	7,97	25,33	8,90	6,29	24,83	4,49
H	1605,3	122,40	134,87	8,40	13,19	29,22	10,89	9,51	32,55	3,06
I	1507,7	116,47	123,37	8,18	13,52	25,10	12,81	6,43	25,62	4,22
J	1734,5	151,44	329,41	18,99	5,27	27,00	10,20	10,36	38,37	2,84

O que também pode ser verificado foi a influência da fração volumétrica da fibra nos valores da resistência média longitudinal e transversal do material, como será mostrado no gráfico a seguir, incluindo a equação da reta e seu coeficiente de correlação (r) :



Para a resistência à tração longitudinal - $Y = -435,45 + 3.159,04.X$, $r = 74\%$

Figura 54 - Influência da fração volumétrica das fibras no limite de resistência médio à tração longitudinal



Para a resistência à tração transversal - $Y = 14,29 + 18,09.X$, $r = 25\%$

Figura 55 - Influência da fração volumétrica das fibras no limite de resistência médio à tração transversal

Pode ser concluído com bastante clareza a partir das curvas apresentadas, entre fração volumétrica das fibras e limite de resistência médio a tração longitudinal e transversal, respectivamente, que o coeficiente de correlação (r), que indica associação entre duas variáveis, é melhor em tração longitudinal.

Pela inclinação das curvas fica bem claro que com o aumento da fração volumétrica das fibras em tração longitudinal, o limite de resistência médio a tração sofre um considerável aumento, o mesmo não ocorrendo em tração transversal onde a curva permanece praticamente com uma inclinação constante.

Tabela 57 - Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos que indicam a fração volumétrica das fibras contidas no material

<i>Códigos</i>	<i>0°</i>		<i>90°</i>	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
$\sigma_c (MPa)$	920,65	899,75	128,92	137,25
$s (MPa)$	58,86	45,60	10,41	10,01
$s^2 (MPa^2)$	3.464,38	2.079,67	108,35	100,27
$cv (\%)$	6,39	5,07	8,07	7,30
m	21,97	21,37	13,67	18,86

O que pode ser verificado nas tabela anterior é que, no tocante a influência da fração volumétrica da fibra juntamente com os valores da resistência média à compressão longitudinal e transversal do material, é que um aspecto que está

diretamente ligado a este fator é o modo de falha do material compósito; que também é influenciado pelas propriedades da resina.

Um fato que possivelmente poderia explicar a vantagem no tocante aos resultados obtidos em compressão longitudinal, poderia ser dado pela ocorrência de modos de falhas diferentes em alguns sistemas fibra-resina, como por exemplo, em carbono-epoxi, onde a falha é dominada pela resistência da fibra.¹

Tabela 58 - Parâmetros estatísticos sendo comparados entre os códigos que indicam a fração volumétrica das fibras contidas no material

Códigos	0°		90°	
	B	C	B	C
τ_r (MPa)	57,00	49,89	62,85	75,87
s (MPa)	2,345	6,12	4,22	7,41
s^2 (MPa ²)	5,50	37,40	17,81	54,84
CV (%)	4,11	12,26	6,72	9,76
m	19,94	8,32	15,46	11,17

A influência da fração volumétrica de fibra para a resistência ao cisalhamento, pode ser observada através da figura 56. É que para baixas frações volumétricas de fibras o fator concentrador de tensões é relativamente insensível ao v_f , mas ele aumenta rapidamente quando v_f é maior do que 0,60.¹

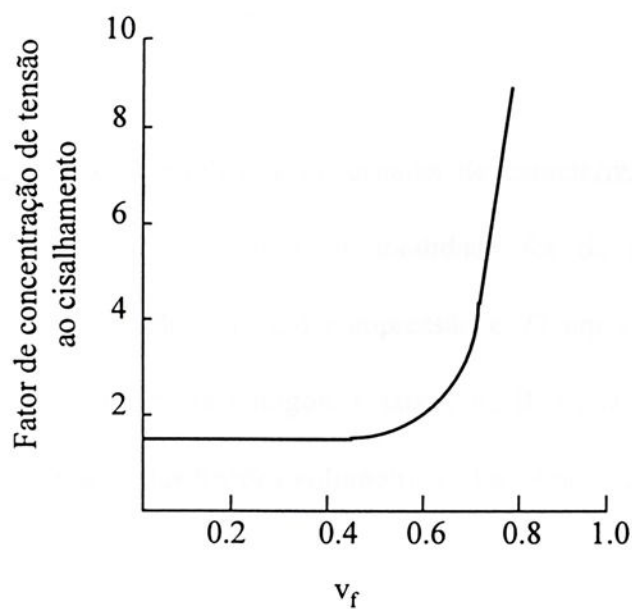


Figura 56 - Fator de concentração de tensão ao cisalhamento x fração volumétrica das fibras

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

1. Foram apresentados resultados de ensaios de caracterização mecânica em tração, compressão e cisalhamento. A totalidade foi de 617 dados, assim distribuídos: 382 em tração, 157 em compressão e 77 em cisalhamento. Estes valores foram distribuídos em códigos, a saber: A, B, C, D, E, F, G, H, I e J representando a variação das frações volumétricas das fibras.

3. Os corpos de prova de tração, compressão e cisalhamento foram retirados a 0° e a 90° em relação à orientação das fibras e confeccionados de acordo com as normas ASTM D 3039, ASTM D 3410 e IOSIPESCU SHEAR TEST FIXTURE SPECIMEN, AND ALIGNMENT TOOL WORKINGS DRAWINGS, respectivamente.

4. Para cada lote de resultados foram obtidos os valores da média aritmética, desvio-padrão, variância, coeficiente de variação e módulo de Weibull. Fazendo uma comparação entre os valores máximos e mínimos do desvio-padrão para cada lote de amostras.

5. Foram construídos histogramas para todas as condições analisadas e também a distribuição normal dos valores. O que pode ser observado, foi que a grande parte dos dados seguiu uma distribuição normal, exceto em alguns casos, visto que os valores do limite de resistência são considerados como sendo variáveis aleatórias.

6. A distribuição de Weibull é considerada como uma distribuição de valores extremos e utilizada com frequência para amostras de tamanhos reduzidos. Existem também diversos métodos para se estimar os parâmetros de Weibull, o método escolhido no trabalho foi o método da regressão linear, visto que é um método de fácil execução e que fornece uma boa confiabilidade nos resultados.

7. Foram construídas curvas do median rank, 5% e 95%, objetivando encontrar o módulo de Weibull, que dá uma indicação do espalhamento dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica, e também a determinação de uma faixa de valores de resistência que representem efetivamente a amostra.

8. O que pode ser observado através da literatura é que o parâmetro de forma β é fortemente influenciado pelo controle do processo e manufatura, e do tamanho da amostra; sendo menos fortemente pela orientação das camadas, meio e entalhes. E através do trabalho realizado foi observado que o parâmetro de forma β estava dentro do que se esperava, e também situado em torno do que pode ser chamado de β para um controle de qualidade bastante rigoroso; onde o mesmo deve estar situado na faixa de 16-26.²³



9. Pode-se concluir para os ensaios de tração, com base na tabela abaixo que:

0° longitudinal					
	v_f [%]	σ_t [MPa]	s [Mpa]	cv [%]	m
<i>B</i>	73,7	2159,4	92,27	4,27	26,57
<i>A</i>	73,5	1838,7	59,44	3,23	32,03
<i>E</i>	72,4	1793,0	186,93	10,43	10,76

a) que o melhor ângulo é o de 0°, uma vez que as propriedades das fibras, que são bastante superiores às da resina podem ser utilizadas.

b) que o melhor código é o B, seguido dos códigos A e E, respectivamente, sendo também os que proporcionam os valores de limite de resistência mais elevados.

10. Para os ensaios de compressão longitudinal e transversal, não puderam ser extraídos muitas informações a respeito do ângulo e do código, visto que a diferença na v_f ser muito pequena. (ordem de 0,27%)

11. Para os ensaios de cisalhamento longitudinal pode ser observado que existe uma relação clara entre a fração volumétrica das fibras e os valores do limite de resistência com os códigos na seguinte ordem:

0° longitudinal					
	v_f [%]	τ_r [MPa]	s [Mpa]	cv [%]	m
<i>B</i>	73,7	57,00	2,35	4,11	19,94
<i>C</i>	71,6	49,89	6,12	12,26	8,32

Já para o cisalhamento transversal o mesmo não pode ser dito, uma vez que os dispositivos de cisalhamento também exercem uma forte influência nos resultados dos testes.

CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Término de um programa específico, em linguagem Pascal 5.0, para o cálculo dos parâmetros de Weibull; incluindo outros métodos para a estimativa dos mesmos.
2. Aplicação da função densidade de probabilidade de Weibull somente nas fibras de carbono, antes da confecção do material compósito; para determinação de sua resistência; e checar se as mesmas se encontram em níveis de resistência adequado para sua posterior aplicação.
3. Acompanhar todo o processo de manufatura da resina (matriz), desde a seleção de agentes de cura específicos, incluindo a seleção de equipamentos adequados para a cura.
- 4 . Realizar ensaios mecânicos de tração, compressão e cisalhamento em corpos de prova confeccionados somente com a resina que irá compor o material compósito.
5. Realizar os ensaios de tração, compressão e cisalhamento do mesmo material compósito à temperaturas diferentes da ambiente.



CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 VINSON, J. R., CHOU, T. W. *Composite materials and their use in structures*. London: Applied Science Publ. /c1975/. 438 p.
- 2 ANDREWS, E.H. *Fracture in polymers*. London: Oliver & Boyd / c1968/ 204p.
- 3 MEYERS, M. A., CHAWLA, K. K. Reforçamento por fibras; Materiais Conjugados. In:___ *Princípios de metalurgia mecânica*. São Paulo: Edgar Blücher /1982/. p.359-79.
- 4 HAUGEN, E. B. Modern statistical materials selection. Part 1. Some basic concepts. *Materials Engineering*, v.96, n 1, p. 21-5, 1982
- 5 RICKERBY, D.G. Theoretical aspects of the statistical variation of strength. *J. Mat. Sci.*, v. 15, p. 2466-70, 1980.
- 6 HULL, D. *An introduction to composite materials*. Cambrigde: Cambrigde Univ. /c1981/. 246p.
- 7 WEETON, J. W., PETERS, D.M. e THOMAS, K.L. *Engineers guide to composite materials*. Ohio: ASM /c1987/. pag. irreg.



- 8 AL-QURESHI, H. A. *Composite materials; fabrication and analysis*. 2. ed. São José dos Campos: CTA/1984/. pag. irreg.
- 9 MARINUCCI, G. *Desenvolvimento de núcleo alveolar (colméia) não- plano aplicado a estruturas sanduíche*. São Paulo, 1992. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 10 PARDINI, L.C., MARTINS, J.R.S. *Aspectos relativos à interface fibra/matriz em materiais conjugados*. São José dos Campos: IPD - CTA. p. 147-58 (Relatório Técnico).
- 11 ENGINEERED materials handbook: composites . Ohio: ASM / c1987/ . v.1
- 12 DONNET, J.B., EHRBURGER, P. Carbon fiber in polymer reinforcement. *Carbon*, v.15, p. 143-52, 1977.
- 13 KOMINAR, V., WAGNER, H.D. Some matrix failure peculiarities of unidirecional fibre-reinforced plastics and layers in laminated composites. *Composites*, v. 25, n. 1, p.5-10, 1992.
- 14 CALDWELL, D.L. Determination of interfacial strength of composites. In: ANNUAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPOSITES, 3, 1987, Detroit,



Michigan. *Proccedings...* Michigan: ASM, 1987. p. 299-303.

- 15 LEE, H., NEVILLE, K. *Epoxy Resins : their application and technology*. New York: Mc Graw Hill, 1957. 305p.
- 16 HANCOX, N.L. *Fibre composite hybrid materials*. London: Applied Science Publ. /c1981/. 290p.
- 17 GUIGON, M., KLINKLIN, E. The interface and interphase in carbon fibre-reinforced composites. *Composites*, v. 25, n. 7, p. 534-9, 1994.
- 18 ADAMS, D.F., DONER, D.R. Transverse normal loading of a unidirectional composite. *J.Comp. Mat.*, v. 1, p. 152-64, 1967.
- 19 DALLEMAND, J.E. How to sumarize data. In: STATISTICS for the Engineer. Warrendal : Society of automotive Enginneers, s.d. p. 1-13
- 20 CRESPO, A.A. *Estatística fácil*. s.l. : Saraiva, 1994. cap. 6, p. 54-78.
- 21 YEN, C.S. *Fatigue statistical analysis*. cap. 5. p.141-69
- 22 COSTA NETO, P.L.O. *Estatística*. São Paulo: Edgard Blucher/ c1977/. 264p.



- 23 JONES, B.H. Probabilistic design and reliability. In: CHAMIS, C.C. (Ed.) *Structural Design and Analysis Part II*. New York : Academic Press, 1975. v.8, cap.8, p.33-72. (Composite Materials)
- 24 CAMILO, G.M, MEDRANO, R.E. Métodos de estimativas de parâmetros aplicados as estatísticas de Weibull e Gauss. In: SEMINÁRIO SOBRE MODELOS ESTATÍSTICOS EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 1985, São Paulo. *Anais...* São Paulo : USP/ Pirelli S/A, 1985. p.119-40.
- 25 KELLY, A., HARRIS, M.I. A tomada de decisões e a abordagem estatística da falha. In:___ *Administração da Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 1980. p.13-45.
- 26 YOON, K.J., CHO, S.J. Influence of Weibull modulus on distribution of estimated modulus. *J. Mat. Sci Letters.*, v. 12, p. 926-27, 1993.
- 27 ZWEBEN, C., ROSEN, B.W. A statistical theory of material strength with application to composite materials. *J. Mech. Phys. Solids*, v.18, p. 189-206, 1970.
- 28 PLAIT, A. The Weibull distribution. *Industrial Quality Control*; v. 19, n. 5, p 17-



26, 1962.

- 29 BERGMAN, B. On the estimation of the Weibull modulus. *J. Mat. Sc Letters*, v. 3, p. 689-92, 1984.
- 30 CHOU, P.C., MILLER, H. Maximum likelihood estimation of a two-segment Weibull distribution for fatigue life. In: LITTLE, R. E.; EKVALL, J.C. (Eds.). *Statistical analysis of fatigue data*. Philadelphia : ASTM, 1981. p.114-28. (ASTM STP 744).
- 31 TRUSTUM, K., JAYATILAKA, A. DE S. On estimating the Weibull modulus for a brittle material. *Composites*, v. 26, n. 8, p. 1080 - 4, 1995.
- 32 LIMA, J.C., ALMEIDA, G.R., SANCHES, M.A.B. Estatística de Weibull-considerações teóricas e práticas sobre estimadores e inferências. In: SEMINÁRIO SOBRE MODELOS ESTATÍSTICOS EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 1985, São Paulo. *Anais....* São Paulo:US P; Pirelli S/A, 1985. p.1-22.
- 33 VOORWALD, H.J.C. *Estatística de Weibull*. Guaratinguetá : FEG-UNESP. p. 1-10 (Relatório Técnico).



- 34 WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, sept., p.293-7, 1951.
- 35 JOHNSON, L.G. *Theory and technique of variation research*. Amsterdam: Elsevier Publ.,1964. cap.1, p. 1-6, cap. 2, p 7-11.
- 36 TANAKA, T. et al. Evaluation of Weibull parameters for statistic strengths of ceramics by Monte Carlo simulation. *Mat. Sci. Res. Intern.*, v. 1, n. 1, p. 51-8, 1995.
- 37 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites*. ASTM D 3039. Philadelphia: ASTM, 1986. 5p.
- 38 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *Standard test method for compressive properties of unidirectional or crossply fiber-resin composites*. ASTM D 3410. Philadelphia: ASTM, 1987. 8p.
- 39 ADAMS, D.F. et al. *Iosipescu shear test fixture specimen, and alignment tool working drawings*. Laramie, Wyoming: Univ. of Wyoming, Composite Materials Research Group, 1983.



- 40 RICHETTO, K.C.S. *Estudo da interface fibra/resina em materiais compósitos sob ação de cargas estáticas*. Guaratinguetá 1996, 124p. Dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá



APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Programa para o cálculo do módulo de Weibull

```
program Weibull;

uses Dos,Crt,Graph,Printer;

label 1,2,5,10,15;

var
  {Variables for the Graphics}
  GraphDriver,d,e: integer;
  GraphMode: integer;
  ErrorCode: integer;
  cx,cy,cx1,cy1,ck,cj :integer; {Variables used for the red rectangle circle}
  rx,ry,rx1,ry1,rrx,rry,rr1x,rr1y:integer; {Variables used for blue triangle}
  rbx,rby,rbx1,rby1,rb2x,rb2y,rb3x,rb3y:integer; {Variables used for yellow
circle}
  test:integer;

  a,v,b,c,n,nn,i,Gm,Gd: integer;
  med1,med2,med3,med4 :longint;
  x,z,y,ik,n1 :real;
  Ch,Ch1:char;
  m,j, med: array [1..100] of longint;
  k: array [1..100] of real;
  f,In_File: text;
  Filename,OFilename: string[35];
  IOCode: integer;

begin
1:  ClrScr;
   Writeln('If you use new datas press N, or if You wana use Datas wich');
   writeln('You have saved in a File press another key');
   readln(Ch1);
   If Ch1 = 'n' then
     goto 2;

   {$I-}
   repeat
     Writeln('Enter Filename and number of Values');
     Readln(OFilename,n);
```

```

Assign(In_File, OFilename);
Reset(In_File);
IOCode:=IOResult;
If IOCode < 0 then
    Writeln('File ', OFilename, ' does not exist, try again');
until IOCode = 0;
{$I+}
For I:= 1 to N Do
Begin
    Readln(In_File, m[i]);
    Writeln(m[i]);
End;
Close(In_File);
goto 15;
2:  writeln('Please give me the number of values');
5:  readln(n);
    {
    If n = 1 Then
        begin
            Writeln('The Number of values has to be bigger then 1');
            Writeln('Please try it again');
            goto 5;
        end;
    For A:=1 to n do
        Begin
            repeat
                writeln('Please give me the ', a, ' value');
                {$I-}
                readln(m[a]);
                {$I+}
                IOCode:=IOResult;
                if IOCode < 0 then
                    writeln('Bad data: please enter again');
                until IOCode = 0;
            end;

            {Calculation of the medium rank}
15:  c:=1;
        repeat
            For B:= c to n-1 do
                begin
                    if m[c] <= m[b+1] then goto 10
                    else begin
                        j[b]:=m[b+1];

```

```

                m[b+1]:=m[c];
                m[c]:=j[b];
            end;
10:            end;
            c:=c+1;
            until c = n;

            ClrScr;
            Writeln;
            Writeln('The values are ranked in the following way ');
            { Writeln(lst,'The values are ranked in the following way '); }
            For i:=1 to n do
                Begin
                    ik:=i+0.3;
                    n1:=n-0.4;
                    k[i]:=ik/n1;
                    med1 :=i*10+3;
                    med2 := med1*100;
                    med3 := n*10-4;
                    med[i] := med2 div med3;
                    Writeln;
                    Writeln('The ',i,' value is ', m[i]);
                    { Writeln(lst,'The ',i,'value is ',m[i]); }
                    Writeln('The medium rank for the ', i,'value is ',k[i]:8:3);
                    { Writeln(lst,'The medium rank for the ', i,'value is ',k[i]:8:3); }

                end;

```

{Calculation of the 95% Probability}

{Calculation of The 5% Probability}

```

Writeln;
Writeln('To go on please press ENTER');
Readln;

```



```
{Graphics }
```

```
GraphDriver:= detect;
```

```
InitGraph(GraphDriver, GraphMode, 'c:\Drivers');
```

```
ErrorCode:= GraphResult;
```

```
if ErrorCode <> grOk then
```

```
begin
```

```
  Writeln('Graphics error: ', GraphErrorMsg(errorCode));
```

```
  Writeln('Program aborted..');
```

```
  Halt(1);
```

```
end;
```

```
Line(130,360,130,50);
```

```
Line(130,360,550,360);
```

```
Line(130,60,125,60);
```

```
Line(130,110,127,110);
```

```
Line(130,160,125,160);
```

```
Line(130,210,127,210);
```

```
Line(130,260,125,260);
```

```
Line(130,310,127,310);
```

```
Line(130,360,125,360);
```

```
Line(130,360,130,365);
```

```
Line(180,360,180,363);
```

```
Line(230,360,230,365);
```

```
Line(280,360,280,363);
```

```
Line(330,360,330,365);
```

```
Line(380,360,380,363);
```

```
Line(430,360,430,365);
```

```
Line(480,360,480,363);
```

```
Line(530,360,530,365);
```

```
{ Drawing red rectangles for the medium rank }
```

```
ck := 300 div n;
```

```
cj := 400 div med[n];
```

```
cx := 130;
```

```
cy := 360;
```

```
SetColor(5);
```

```
For i:=1 to n do
```

```
begin
```

```
    Rectangle(cx,cy,2);
    cx1:= cx;
    cy1:= cy;
    cy:= cy - ck;
    nn:= cj * med[i];
    cx:= 130 + nn;
    Line(cx1,cy1,cx,cy);
    end;
    Circle(cx,cy,2);
```

```
{ Drawing yellow circles for the 5% Probanility}
```

```
rbx := 130;
rby := 360;
```

```
SetColor(1);
```

```
For e:=1 to n do
```

```
begin
```

```
    rb2x := rbx - 2;
    rb2y := rby - 2;
    rb3x := rbx + 2;
    rb3y := rby + 2;
    Circle(rb2x,rb2y,rb3x,rb3y);
    rbx1 := rbx;
    rby1 := rby;
    rbx := rbx + 400 div 7 * e;
    rby := rby - 300 div n * e;
```

```
    Line(rbx1,rby1,rbx,rby);
```

```
end;
```

```
{Drawing blue triangles for the 95% Probability}
```

```
rx:= 130;
ry:= 360;
```

```
SetColor(4);
```

```
For e:=1 to n do
```

```
begin
```

```

rrx := rx - 2;
rry := ry - 2;
rrlx := rx + 2;
rrly := ry + 2;
Triangle(rrx,rry,rrlx,rrly);
rx1 := rx;
ry1 := ry;
rx := rx + 400 div 5 * e;
ry := ry - 300 div n * e;

```

```

Line(rx1,ry1,rx,ry);

```

```

end;

```

```

SetTextStylе(SmallFont,HorizDir,4);
SetColor(7);
OutTextXY(85,55,'number');

```

```

SetColor(5);
OuttextXY(500,370,'Medium Rank');

```

```

{5% Probability}
SetColor(1);
OutTextXY(475,380,'Weibull Modulus for 5%');

```

```

{95% Probability}
SetColor(4);
OutTextXY(475,390,'Weibull Modulus for 95%');

```

```

SetTextStylе(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(7);
OutTextXY(130,420,'To go on please press ENTER');
Readln;
CloseGraph;

```

```

{Saving datas}

```

```

{$I-}
repeat
    writeln('Enter file name: ');
    readln(filename);
    Assign(f,filename);
    rewrite(f);

```

```
        IOCode:= IOResult;
        If IOCode <> 0 then
            Writeln('File ', Filename,'does not exist, try again');
until IOCode = 0;
    {$I+}
    For i:=1 to n do
        writeln(f,m[i]);
    Close(f);

    Writeln('The Data is saved in the File ', Filename);
    Writeln;
    Writeln('Do You want a new start again ?');
    Writeln('If you want to go on, please press Y otherwise press enter');
    Readln(Ch);
    If Ch = 'Y' then
        goto 1;
    If Ch ='y' then
        goto 1;

    { Writeln(1st,'The Data is saved in the File ', Filename);}
end.
```


Apêndice 2 - Tabela para o Median Rank

TABLE I
orbital numbers
(each tabulated number is a percent)

Tables I, II, and III have been supplied through the courtesy of
Dr. John S. White of the Mathematics Department of General Motors
Research Laboratories.

TABLE I
Medium names
(each tabulated number is a percent)

Tables I, II, and III have been supplied through the courtesy of Dr. John S. Niles of the Mathematics Department of General Motors Research Laboratories.

[illegible]TABLE II
FUNGICIDE RESISTANCE

RESUMO

O bom comportamento mecânico, no que diz respeito à resistência e rigidez, faz do material compósito, uma alternativa em aplicações estruturais. Além destas características a resistência ao meio ambiente e à temperaturas moderadas aumentam o seu campo de atuação. O objetivo deste trabalho de pesquisa é a análise de dados de resistência de um material compósito (fibra de carbono/resina epoxi), em solicitações de tração, compressão e cisalhamento.

Várias “condições” do compósito foram testadas, gerando um grande número de dados que foram estudados através de considerações estatísticas, tais como histogramas, distribuição normal, médias, desvios-padrão e outras.

Foi utilizada também a distribuição de Weibull, que fornece uma indicação do grau de espalhamento dos dados de resistência, para a obtenção da melhor condição do material compósito nas mais diversas solicitações.



ABSTRACT

The excellent mechanical behavior, regarding strength and stiffness, makes of the composite material, a choice in structural application. Besides these characteristics, the environmental and the moderate temperature resistance growth their field of atuation. The main target of this research is the strength data analisys of a composite material (carbon fiber/epoxy resin), in loads of tensile, compression and shear.

Several "conditions"of composite were tested, providing a large amount that were studied through of statistical considerations, such as histogram, Normal distribution, aritmetic media, standard deviation and others.

It was also used the Weibull distribution, that provide an information about the degree of scatter of strength data, with the objective to obtain the better condition to composite material in the various loads.

Autorizo a reprodução deste trabalho

Guaratinguetá, 04 de novembro de 1996

EDSON VANDER PIMENTEL



