

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ENSAIOS DESTRUTIVOS DE TUBOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS  
INTERNAMENTE COM AÇO**

**MÁRIO CÉSAR OLIVEIRA VIEIRA**

**ORIENTADOR: FLAMÍNIO LEVY NETO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: ENM DM – 151 A/2010**

**BRASÍLIA/DF: JUNHO / 2010**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ENSAIOS DESTRUTIVOS DE TUBOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS  
INTERNAMENTE COM AÇO**

**MÁRIO CÉSAR OLIVEIRA VIEIRA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Flamínio Levy Neto, PhD (ENm-UnB) (Orientador).**

---

**Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira – ENM-UnB – (Examinador Interno)**

---

**Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima – FGA/UnB.(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 21 DE JUNHO DE 2010.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, MÁRIO CÉSAR OLIVEIRA.

Ensaio Destrutivos de Tubos Poliméricos Reforçados Internamente com Aço  
xi, 210 x 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2010).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tubulações de aço

2. Estatística de Weibull

3. Ensaio destrutivos

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, M. C. O. (2009). Ensaio Destrutivos de Tubos Poliméricos Reforçados Internamente com Aço. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM DM – 151A/2010, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 36p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MÁRIO CÉSAR OLIVEIRA VIEIRA.

TÍTULO: ENSAIOS DESTRUTIVOS DE TUBOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS INTERNAMENTE COM AÇO.

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

**Mário César Oliveira Vieira**  
**Av. Rio Branco Bl 04 Apt° 103, Urias Magalhães**  
**74565-070 Goiânia-GO-Brasil.**

*Dedicatória*

*A Deus.  
A minha esposa Cynara,  
minha filha Jessica,  
minha família e os meus amigos de mestrado  
Jair, Ricardo, Ronay e Bruno.*

## ***Agradecimentos***

*Ao meu orientador, Profº Flamínio Levy Neto, pela orientação, pela grande oportunidade que me foi dada, amizade e conhecimentos passados.*

*A minha esposa Cynara por todo amor, apoio e incentivo ao longo dessa jornada.*

*Aos demais familiares que foram importantes de alguma forma.*

*Aos companheiros de mestrado Jair, Ricardo, Ronay e Bruno pelo companheirismo e amizade.*

*Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.*

*Ao Departamento de Mecânica do CEFET-Go.*

*Aos amigos e colegas que colaboraram nos ensaios realizados.*

*Enfim, a todos que colaboraram de alguma forma no decorrer dessa longa caminhada.*

## RESUMO

### ENSAIOS DESTRUTIVOS DE TUBOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS INTERNAMENTE COM AÇO

**Autor:** Mário César Oliveira Vieira

**Orientador:** Flamínio Levy Neto

**Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas**

Brasília, junho de 2010

*O presente trabalho consiste na realização de ensaios destrutivos para verificação da resistência à pressão de tubos poliméricos reforçados internamente com aço 1020, de 12,50 e 20,00 mm de diâmetro, e na junção destes, os quais são normalmente utilizados em instalações prediais, industriais, comerciais e residenciais para fluxo de gás liquefeito de petróleo (GLP). Na análise dos resultados utilizou-se uma distribuição estatística específica que é usada extensivamente em engenharia da confiabilidade, a distribuição Weibull. Tal análise serviu como referência do limite máximo de pressão que a tubulação pode suportar, bem como da confiabilidade e repetibilidade da mesma. Como resultado, obteve-se um módulo de Weibull relativamente baixo de valor 2,45 para o tubo de 12,50 mm, o que caracteriza uma dispersão grande entre os valores obtidos nos ensaios realizados, sendo a resistência média a pressão igual a 51,8 kgf/cm<sup>2</sup> e a resistência intrínseca a pressão igual a 46,80 kgf/cm<sup>2</sup>. E para o tubo de 20,00 mm obteve-se um módulo de Weibull bem mais alto de valor 32,22, o que caracteriza uma dispersão menor entre os valores dos ensaios realizados, sendo a resistência média a pressão igual a 39,9kgf/cm<sup>2</sup> e a resistência intrínseca a pressão igual a 39,70 kg/cm<sup>2</sup>.*

**Palavras-chave:** *Tubo revestido com PE, Gás Liquefeito de Petróleo, Resistência Mecânica, Análise Weibull.*

## ABSTRACT

### DESTRUCTIVE TESTING OF POLYMERIC PIPES INTERNALLY REINFORCED WITH STEEL

**Author:** Mário César Oliveira Vieira

**Advisor:** Levy Neto Flamínio

**Post-graduate degree in Mechanical Sciences**

Brasília, June 2010

*This work consists of performing destructive tests with tubes of 12.50 mm and 20.00 mm for the verification of resistance to pressure, tubes and pipes at the junction of polymeric reinforced internally with steel used in building, industrial, commercial and housing for the flow of liquefied petroleum gas (LPG). In the analysis of results was made use of a specific statistical distribution that is used extensively in reliability engineering, the Weibull distribution. This analysis served as a reference the maximum pressure that the pipe support, as well as the reliability and repeatability of the same. According to the results from the tests, getting yourself a low Weibull modulus of the value of 2.45 for the tube of 12.50 mm which features a large dispersion between the values obtained in the tests, and the average pressure on the resistance value  $51.8 \text{ kgf} / \text{cm}^2$  and the intrinsic resistance of the pressure value of  $46.80 \text{ kgf/cm}^2$ . And for the tube of 20.00 mm is getting a Weibull modulus and the highest value of 32.22, which features a smaller dispersion between the values of the tests performed, and the average pressure on the resistance value of  $39.9 \text{ kgf} / \text{cm}^2$  and the intrinsic resistance of the pressure value of  $39.70 \text{ kgf/cm}^2$ .*

**Keywords:** *tube coated with PE, Liquefied Petroleum Gas, Mechanical Strength, Weibull Analysis.*

## SUMARIO

<b>1</b>	<b>- INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>- MÉTODO DE WEIBULL</b>	<b>03</b>
<b>2.1</b>	<b>- CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL</b>	<b>05</b>
<b>2.1.1</b>	<b>- CARACTERÍSTICA DO PARÂMETRO DE FORMA <math>m</math> PARA A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL</b>	<b>06</b>
<b>2.1.2</b>	<b>- CARACTERÍSTICA DO PARÂMETRO DE ESCALA <math>X_0</math> PARA A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL</b>	<b>08</b>
<b>2.1.3</b>	<b>- CARACTERÍSTICA DO PARÂMETRO DE LOCALIZAÇÃO <math>X_u</math> PARA A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL</b>	<b>09</b>
<b>3</b>	<b>- MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>- COMPONENTE ENSAIADO</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>- ENSAIO REALIZADO</b>	<b>13</b>
<b>3.3</b>	<b>- METODOLOGIA APLICADA</b>	<b>13</b>
<b>3.4</b>	<b>- RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>- ANÁLISE DE WEIBULL</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>- CÁLCULO DO MÓDULO DE WEIBULL UTILIZANDO VALORES DE TENSÕES</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>- CÁLCULO DO MÓDULO DE WEIBULL UTILIZANDO VALORES DE PRESSÕES</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>- GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>- CONCLUSÕES</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>36</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Resultado dos testes hidrostáticos com tubo de 12,50 mm	15
Tabela 3.2 -	Resultado dos testes hidrostáticos com tubo de 20,00 mm	16
Tabela 4.1 -	Tensão de ruptura para os tubos de 12,50 mm de diâmetro	18
Tabela 4.2 -	Tensão de ruptura para os tubos de 20,00 mm de diâmetro	18
Tabela 4.3 -	Probabilidade de falha(tensão) dos corpos de prova com tubos de 12,50 mm	19
Tabela 4.4 -	Probabilidade de falha(tensão) dos corpos de prova com tubos de 20,00 mm	19
Tabela 4.5 -	Dados para o cálculo(tensão) do módulo de Weibull para tubos de 12,50 mm	20
Tabela 4.6 -	Dados para o cálculo(tensão) do módulo de Weibull para tubos de 20,00 mm	20
Tabela 4.7 -	Probabilidade de falha(pressão) dos corpos de prova com tubos de 12,50 mm	21
Tabela 4.8 -	Probabilidade de falha(pressão) dos corpos de prova com tubos de 20,00 mm	22
Tabela 4.9 -	Dados para o cálculo(pressão) do módulo de Weibull para tubos de 12,5 mm	22
Tabela 4.10 -	Dados para o cálculo(pressão) do módulo de Weibull para tubos de 20,0 mm	23

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Efeito dos valores no parâmetro de forma $m$	06
Figura 2.2 -	Efeito do Parâmetro de forma $m$ em um gráfico de probabilidade percentual, usando-se a distribuição de Weibull com o Parâmetro de escala $X_0$ fixo	07
Figura 2.3-	Efeito do parâmetro de forma $m$ no gráfico de confiabilidade de Weibull	07
Figura 2.4 -	O efeito do parâmetro de forma $m$ na função de taxa de falha de Weibull	08
Figura 2.5 -	Efeito do parâmetro de escala $X_0$ na distribuição Weibull	08
Figura 2.6 -	O efeito do parâmetro de localização sobre a distribuição de Weibull	09
Figura 3.1 -	Desenho esquemático do corpo de prova	11
Figura 3.2 -	Foto dos corpos de prova	11
Figura 3.3 -	Corte longitudinal do tubo e luva após a termofusão	12
Figura 3.4 -	Corte longitudinal do tubo e luva após a termofusão	12
Figura 3.5 -	Desenho esquemático dos equipamentos para realização dos ensaios	13
Figura 3.6 -	Foto do sistema utilizado nos testes hidrostáticos	14
Figura 3.7 -	Gráfico com o resultado dos ensaios de teste hidrostático do tubo de 12,5mm	15
Figura 3.8 -	Gráfico com o resultado dos ensaios de teste hidrostático do tubo de 20 mm	16
Figura 4.1 -	Diagrama de esforços em uma seção longitudinal	17
Figura 4.2 -	Gráfico de regressão linear com tubo de 12,50 mm com valores relativos à Tensão	24
Figura 4.3 -	Gráfico de regressão linear com tubo de 20,00 mm com valores relativos à Tensão	24
Figura 4.4 -	Gráfico de regressão linear com tubo de 12,50 mm com valores relativos à pressão	25
Figura 4.5 -	Gráfico de regressão linear com tubo de 20,00 mm com valores relativos à pressão	25
Figura 5.1 -	Gráfico de Weibull para tubo de 12,5 mm	28
Figura 5.2 -	Gráfico de Weibull para tubo de 20 mm	28
Figura 5.3 -	Probabilidade de sobrevivência do tubo de 12,5 mm	29

Figura 5.4 - Probabilidade de sobrevivência do tubo de 20 mm	30
Figura 5.5 - Foto do corpo de prova que apresentou ruptura no tubo	32
Figura 5.6 - Foto do corpo de prova que apresentou vazamento	32

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

$\sigma$	- Tensão normal
$e$	- Base do logarítmo neperiano igual a 2,71828....
E	- Ensaio de material
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo
Lbs	- Libras
$m$	- Modulo de Weibull (Parâmetro de forma)
$n$	- Número de elementos
PEAD	- Polietileno de Alta Densidade
PEBD	- Polietileno de Baixa Densidade
PEMD	- Polietileno de Média Densidade
P	- Probabilidade
Pr	- Pressão
$t$	- Espessura
$X_u$	- Parâmetro de localização
$X_o$	- Resistência Intrínseca (Parâmetro de escala)

# 1 - INTRODUÇÃO

Através de pesquisas tecnológicas para o desenvolvimento da condução de gás na América do Sul, verificou-se que o mercado estava necessitando de produtos que aumentassem a produtividade da mão de obra, durante operações de instalações e montagem, sem riscos de vazamento e sem problemas de corrosão, para a condução perfeita e segura do GLP.

O polietileno de média densidade (Peso molecular 138000 [1]) vem sendo utilizado atualmente na produção de revestimentos para tubulações metálicas de gás, unidos pelo processo da termofusão, e melhorando bastante algumas características que são valorizadas pelos profissionais da área técnica. A resistência mecânica do aço frente a possíveis esmagamentos ou perfurações acidentais, aliada a proteção contra a corrosão, proporcionadas pelo revestimento externo de polietileno, como em tubulações enterradas. Outras vantagens são a redução da mão de obra, o tempo de montagem e o acabamento das tubulações.

Formado através do processo de polimerização por adição do gás etileno ( $C_2H_4$ ), o polietileno possui uma das mais simples estruturas de todos os polímeros, podendo ser reproduzido através de vários processos que lhe confere características próprias de densidade, peso molecular médio, distribuição de peso molecular, o que explica a variedade de processos de transformação e de aplicações. O processo de polimerização do monômero gasoso etileno ( $CH_2=CH_2$ ) em reator, sob condições determinadas de temperatura e alta pressão, forma o polietileno de baixa densidade PEBD e alguns tipos de média densidade, PEMD, caracterizados por um alto grau de ramificações longas e curtas ao longo da cadeia principal. O processo de baixa pressão produz o PEAD e outros PEMD com ramificações de menor número e comprimento. O PEBD também é polimerizado em baixa pressão [2].

De aspecto opaco, alta espessura e toque parafínico, o PEBD é atóxico e é totalmente insolúvel na água sendo, portanto, muito utilizado no processo de extrusão para fabricação de película. Mais rígidos e opacos que o PEBD, o PEAD possui resistência a choques térmicos e baixas temperaturas, sendo bem mais permeável a gases que o PEBD. O PEMD possui propriedades intermediárias entre o PEAD e o PEBD, atuando numa boa faixa de mercado em aplicações bastante específicas. Geralmente, utiliza-se misturas de PEAD – PEBD nas mais variadas concentrações [2].

O uso de tubos de aço revestidos de polietileno, com união por termofusão, para condução de GLP em instalações prediais, industriais, comerciais e residências, apresenta

vantagens como economia de tempo na instalação e conseqüentemente financeira, além de tornar mais fácil as modificações e reparos, onde o processo da termofusão consiste em aquecer o tubo e os acessórios a uma temperatura de 260° C e depois unir os materiais pressionando um contra o outro e deixar esfriar naturalmente até os mesmos se unirem.

A parede interna dos tubos é de aço de 0,9 mm e a tubulação externa de polietileno com espessura de 2,3 mm, independentemente dos diâmetros nominais disponíveis comercialmente. Todas as conexões para termofusão são do tipo SOCKET (encaixe) e são formadas a partir de uma peça metálica em seu interior. Mediante a termofusão, os tubos e conexões aquecidos a 260°C, funde-se molecularmente, conformando assim uma tubulação, sem roscas nem colas reduzindo o risco de vazamento de gás [1].

Serão realizados ensaios de pressurização hidrostática, em dois grupos de corpos de prova, objetivando testar a resistência de tais tubos à pressão interna, com a finalidade principal de se definir uma pressão máxima de referência que a tubulação suportará. Adicionalmente, também será avaliada a repetibilidade dos resultados referentes às pressões de falha, bem como a localização das mesmas.

Através dos ensaios, serão encontrados valores das tensões de ruptura dos diversos corpos de prova cilíndricos, os quais serão analisados pelo método de Weibull, que é um método estatístico simples, usado para se prever situações na qual o experimento resulta em dados muito variáveis como, por exemplo, a resistência mecânica de materiais frágeis. Ao se aplicar sua metodologia, os dados são “normalizados”, tornando sua análise mais fácil e precisa. Em particular, serão obtidos o módulo de Weibull aparente,  $m$ , e a resistência intrínseca aparente,  $X_0$ , a partir das pressões de falha em juntas termofundidas de tubulações de aço revestidas com PEMD.

## 2 - O MÉTODO ESTATÍSTICO DE WEIBULL.

A distribuição Weibull é uma distribuição estatística das mais utilizadas na engenharia de confiabilidade, pois através da utilização das análises dos dados de vida dos materiais os profissionais podem determinar a probabilidade de falhas e a capacidade dos materiais, componentes e sistemas de realizar suas funções sem o perigo de ocorrer falhas.

É uma distribuição versátil, a qual pode assumir características de outras distribuições, por isso o método de distribuição Weibull tem se tornado uma ferramenta bastante utilizada no estudo de resultados obtidos em ensaios de materiais e experimentos que apresentam significativa variação nos resultados. Elaborada originalmente por Walodi Weibull, devido à sua simplicidade e flexibilidade de acomodar varias formas de função de risco, é uma das distribuições mais utilizadas na análise de probabilidades de falha de materiais estruturais, com resultados que indica a ocorrência de algum evento de interesse, como a falha de um material ou equipamento.

Esta distribuição descreve a probabilidade de falha e o tempo aproximado de vida dos materiais sob cargas que provocam fadiga e fraturas nestes materiais [6]. Considerando-se a distribuição das falhas na forma:

$$P=1-e^{\phi(x)} \quad (1).$$

Onde P é a probabilidade da falha ao se considerar o fator X (que pode ser a pressão aplicada ao material). Weibull propôs que  $\phi(x)$  tem que ser uma função positiva não-decrescente. A distribuição, proposta por ele, é descrita como [6]:

$$P = 1 - \exp \left[ - \left\{ \frac{x - x_u}{x_o} \right\}^m \right] \quad (2).$$

Para  $X \geq X_u$ ,  $X_o > 0$ ,  $m > 0$ .

Onde  $X_o$  é o fator de escala, que é o valor característico da distribuição, ou resistência intrínseca como a durabilidade do material, a resistência mecânica ou a pressão: m é o

parâmetro de forma da distribuição conhecido também como a inclinação da distribuição de Weibull, logaritmada duas vezes, ou simplesmente módulo de Weibull.

Isto, porque o valor  $m$  é igual à inclinação da linha reta de um gráfico de probabilidade logaritmado por duas vezes. Valor este que controla a variância dos valores medidos: quanto maior seu valor, mais estreita é a distribuição dos valores medidos, ou seja, maior é a repetibilidade dos resultados;  $X_u$  é chamado parâmetro de localização ou posição, que é o menor valor característico do parâmetro medido. A probabilidade de ocorrer uma falha se, a tensão aplicada for menor que  $X_u$  é zero.

A partir da teoria do elo mais fraco de uma corrente, Weibull descreveu o comportamento da resistência mecânica de materiais, onde o ponto com menor resistência determina a resistência do corpo inteiro. Assim, a resistência medida será sempre o menor valor de um conjunto de valores possíveis. Sendo assim, se outro ensaio for realizado, outros valores mínimos poderão ser obtidos, deste modo demonstrando que a resistência medida pode ser considerada um valor aleatório.

A equação (2) é chamada “Distribuição de Weibull com três Parâmetros”. Para simplificar, pode-se assumir  $X_u$  como zero, pois a probabilidade de ocorrer falhas (vazamentos) é a partir de 0 Kg/cm<sup>2</sup>. A distribuição resultante é a “Distribuição de Weibull com dois parâmetros” a qual será utilizada neste estudo:

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{x_0} \right)^m \right] \quad (3).$$

Através do rearranjo da equação (3) e da aplicação de logaritmo natural duas vezes, obtêm-se a equação linear (4):

$$\ln[ \ln(1/1-p) ] = m \cdot \ln.x - m \cdot \ln.x_0 \quad (4).$$

Após o ensaio de um lote de  $n$  amostras, a estimativa dos parâmetros de Weibull de um determinado material, só poderá ser realizado através de uma regressão entre a probabilidade acumulada  $P$  e os valores experimentais das pressões de falha  $P_r$ , dessa forma é necessário conhecer uma estimativa para  $P$ . A probabilidade de falha,  $P$ , para um valor, de pressão aplicada  $X$  pode ser calculada através de  $n$  dados medidos, após ordenar o conjunto de dados experimentais de modo crescente, de tal forma que  $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \dots \leq X_n$ . Utilizando-se o método proposto por WILKS [9], um estimador percentil,  $P$ , que pode ser calculado como:

$$P_i = i/n+1 \quad (5).$$

Onde  $P_i$  é a probabilidade de se ocorrer um evento de estudo caso, o valor da variável (pressão aplicada) seja  $X_i$ . De acordo com BERGMAN [8], a forma acima apresenta a menor variância apesar de existir outras formas diferentes de se estimar  $P$ .

Para a estimativa dos parâmetros  $m$  e  $X_0$ , pode-se inserir os dados em um gráfico, chamado de prot-probability, e determinar os parâmetros a partir deste, ou realizar uma regressão linear. Para proceder à regressão entre os valores das probabilidades  $P$  e os das pressões  $P_r$ , na prática tem-se utilizado o método dos mínimos quadrados lineares, que é bastante conhecido e utilizado, pois esta disponível em programas de computador, que contem planilhas e utilitários para plotar gráficos. Esse método possibilita um resultado simples e exato, que minimiza os quadrados dos desvios entre os valores estimados de uma determinada função linear e um conjunto de dados.

Aplicando-se a equação (4) ao estudo da resistência mecânica de materiais frágeis, obtém-se a Equação:

$$\ln[ \ln(1/1-p)] = m.\ln.P_p - m.\ln.P_0 \quad (6).$$

Onde  $P_p$  é considerado como pressão aplicada ao material associada à probabilidade  $P$  e  $P_0$  é a pressão de resistência característica do material.

$$\ln[ \ln(1/1-p)] = m.\ln.P_r - m.\ln.P_0 \quad (7).$$

## 2.1 – CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.

Como já mencionado, a distribuição de Weibull é bastante utilizada na análise de dados obtidos de ensaios mecânicos destrutivos, os quais podem apresentar uma significativa variação, e, conforme os valores dos parâmetros, a distribuição de Weibull pode ser usada para modelar uma variedade de comportamentos relacionados com a resistência ou à vida de um componente estrutural.

### 2.1.1 – CARACTERÍSTICA DO PARÂMETRO DE FORMA $m$ PARA A DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.

O parâmetro de forma  $m$  quantifica a dispersão dos resultados e é também conhecido como inclinação da reta de um gráfico de probabilidade logaritimado por duas vezes. Isto ocorre porque o valor de  $m$  é igual à inclinação da linha de regressão do gráfico de probabilidades. O parâmetro  $m$  é um número puro, isto é, um valor adimensional, diferentes valores do parâmetro de forma, o qual pode influenciar sobre o comportamento da distribuição, conforme gráficos das figs. 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, com valores apenas demonstrativos e considerando os valores 0.5, 1 e 3 para  $m$ .

A forma como o valor de  $m$  influencia o comportamento físico dos itens que está sendo representado se torna mais evidente quando, observa-se como os seus diferentes valores afetam a confiabilidade, conforme gráfico da fig. 2.1.

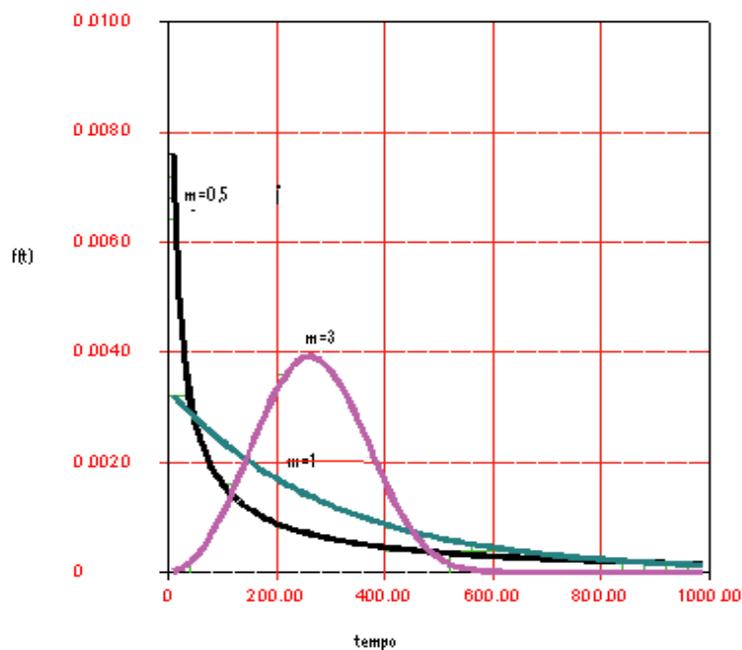


Fig. 2.1 – Efeito dos valores no parâmetro de forma  $m$ [11].

No gráfico da fig. 2.2 pode-se ver porque este parâmetro é referido como a inclinação, pois as três linhas representadas possuem o mesmo parâmetro de escala.

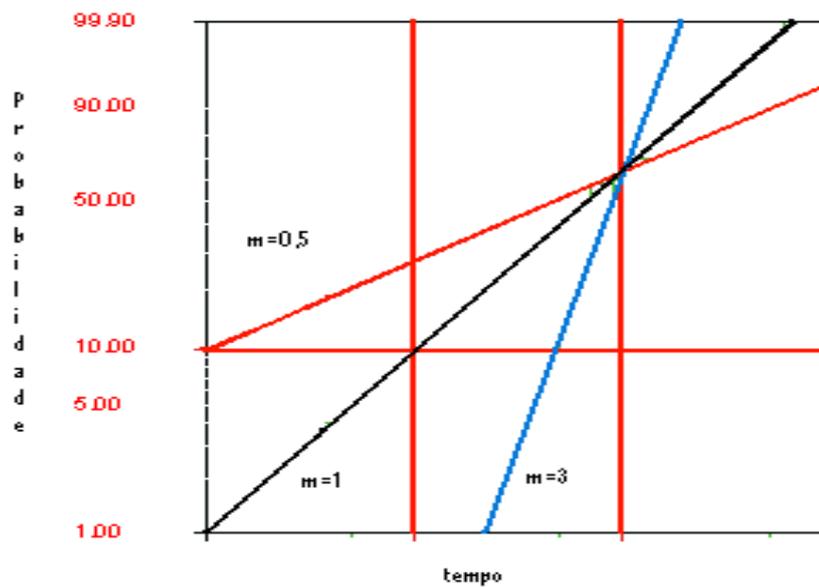


Fig. 2.2 – Efeito do Parâmetro de forma  $m$  em um gráfico de probabilidade percentual, usando-se a distribuição de Weibull com o Parâmetro de escala  $X_0$  fixo[11].

No gráfico 2.3 a linha com  $m = 0,5(m < 1)$  diminui drasticamente e monotonicamente para  $0 < m < 1$ , e para  $m = 1$  ela decresce monotonicamente, mas menos acentuada do que para  $0 < m < 1$ , para  $m = 3 (m > 1)$  ela diminui com o aumento do tempo onde, após passar por um ponto de inflexão ela diminui drasticamente.

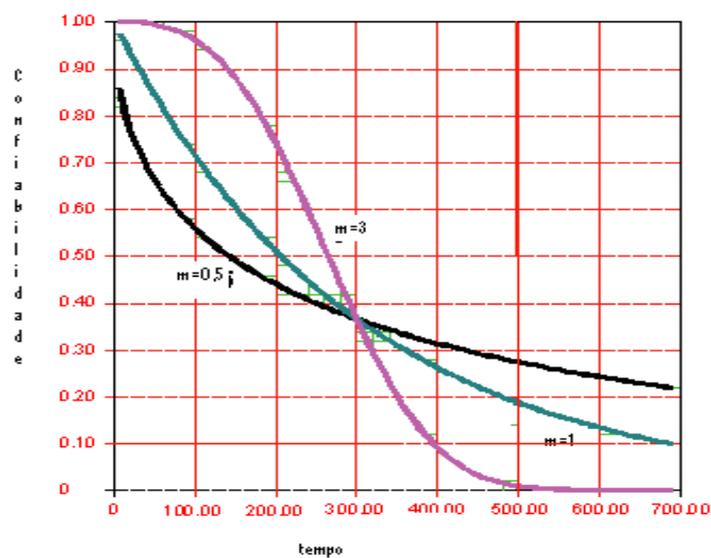


Fig. 2.3 – Efeito do parâmetro de forma  $m$  no gráfico de confiabilidade de Weibull[11].

Pode-se observar no gráfico da fig. 2.4, onde taxa de falha é a freqüência que um sistema falha, expressado geralmente em horas. E as amostras com  $m < 1$  apresentam uma taxa de falha que diminui com o tempo, as amostras com  $m = 1$  apresenta uma taxa de falha constante e amostras com  $m > 1$  possuem uma taxa de falha que aumenta com o tempo.

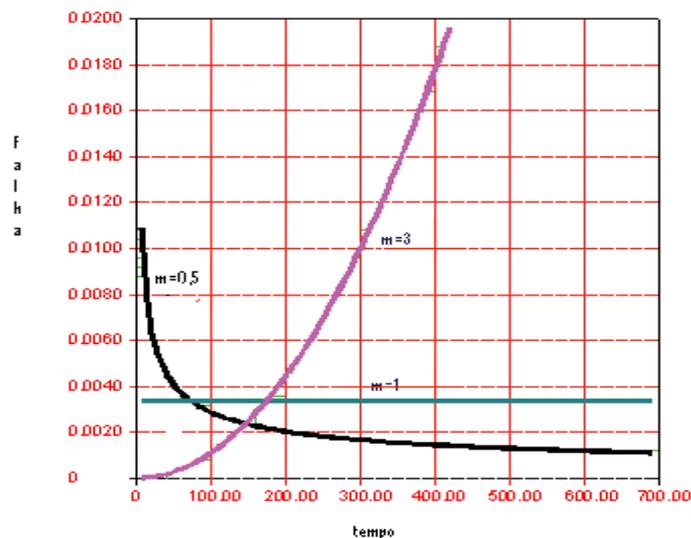


Fig. 2.4 – O efeito do parâmetro de forma  $m$  na função de taxa de falha de Weibull[11].

### 2.1.2 – CARACTERISTICA DO PARÂMETRO DE ESCALA $X_0$ PARA A DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.

A alteração do parâmetro de escala  $X_0$  tem o mesmo efeito sobre a distribuição que uma mudança da escala do eixo das abscissas. Aumentando o valor de  $X_0$  e mantendo  $m$  constante o pico da curva ira diminuir conforme gráfico(valores demonstrativos) da fig. 2.5:

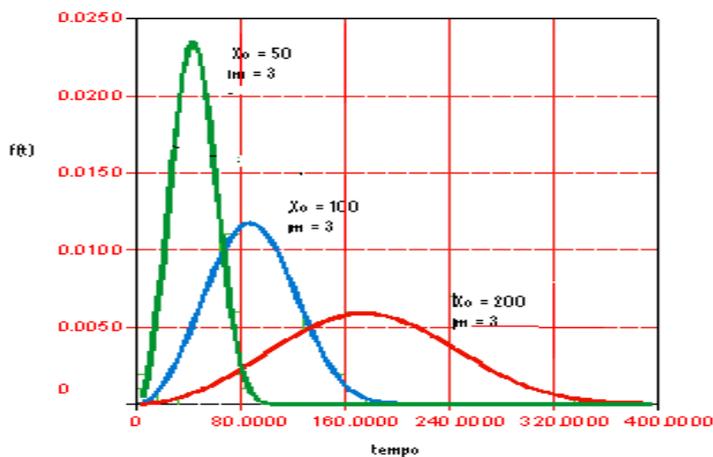


Fig. 2.5 - Efeito do parâmetro de escala  $X_0$  na distribuição Weibull[11].

### 2.1.3 – CARACTERÍSTICA DO PARÂMETRO DE LOCALIZAÇÃO $X_u$ PARA A DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.

O parâmetro de localização  $X_u$  localiza a distribuição ao longo do eixo da abscissa, alterando o valor de  $X_u$  a distribuição e sua função, tendem a se deslocar tanto para a direita quanto para a esquerda, conforme gráfico(valores demonstrativos) da fig. 2.6:

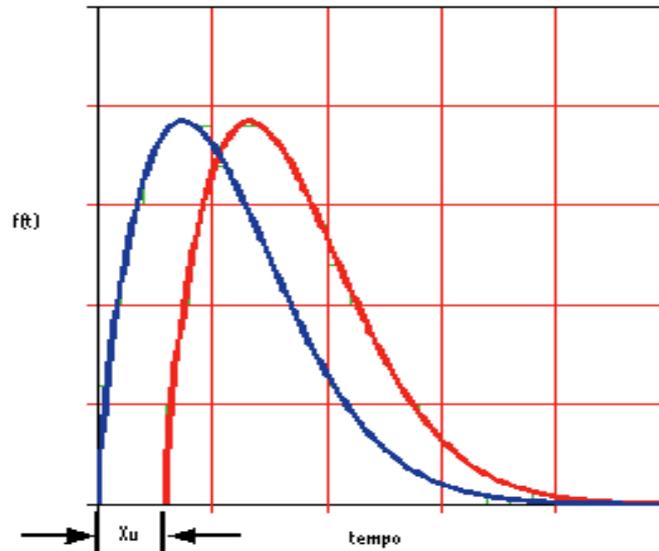


Fig. 2.6 – O efeito do parâmetro de localização sobre a distribuição de Weibull[11].

### **3 – MATERIAIS E MÉTODOS.**

O objetivo dos ensaios é obter resultados sobre o comportamento mecânico, quanto à resistência a pressão, de dois grupos de tubos e acessórios (luvas, cotovelos), com diâmetros nominais diferentes, em particular nas junções dos mesmos. Os corpos de prova serão tubos de aço carbono com costura, ambos revestidos com polietileno de média densidade (PEMD - Peso molecular 138000 [1]), e assim, testar sua resistência à pressão interna, na montagem de tubulações para GLP, conforme ilustrado nas Figuras 3.1 e 3.2.

Segundo o método de Weibull para se obter resultados confiáveis é necessário um número mínimo de amostras, e, conforme IMASAVA [5], o número mínimo de ensaios para se obter um resultado confiável é de 10 ensaios, sendo que o ideal seria em torno de 30 a 40 ensaios, sendo que o estudo consiste basicamente em: (a) realizar n ensaios, (b) anotar os resultados, (c) aplicar o método Weibull, (d) construir o gráfico com os valores anotados (tensão), e as retas obtidas através da regressão, (e) analisar os resultados.

#### **3.1 – COMPONENTE ENSAIADO.**

Os componentes ensaiados foram divididos em 02 grupos de amostras, com 10 corpos de prova cada, sendo um com diâmetro de 12,50 mm, e a outra com diâmetro de 20,00 mm. Todos compostos por 01(um) adaptador com rosca interna, tubo de aço, 01(um) adaptador com rosca externa todos revestidos com polietileno, 01(uma) Tampa de aço, todos pré-fabricados, sendo que o tubo e os adaptadores foram unidos pelo processo da termofusão. Os corpos de prova com o diâmetro de 12,5 mm, mediam 40 cm de comprimento, e a estrutura interna dos tubos era constituída por: tubo de aço com 0,9 mm de espessura, diâmetro interno de 12,7 mm e diâmetro externo de 14,5 mm, e o revestimento externo de polietileno com espessura de 2,3 mm e 14,5mm de diâmetro interno e 19,1mm de diâmetro externo. Os corpos de prova com o diâmetro de 20,0 mm, mediam 40 cm de comprimento, e a estrutura interna dos tubos era constituída por: tubo de aço com 0,9 mm de espessura, diâmetro interno de 20,0 mm e diâmetro externo de 21,8 mm, e o revestimento externo de polietileno, com espessura de 2,3 mm e 21,8 mm de diâmetro interno e 26,4 mm de diâmetro externo.

O material ensaiado nos dois casos foi constituído por uma composição unificada de um tubo de aço carbono (1020) com costura, revestido com polietileno de média densidade, conforme fig. 3.2.

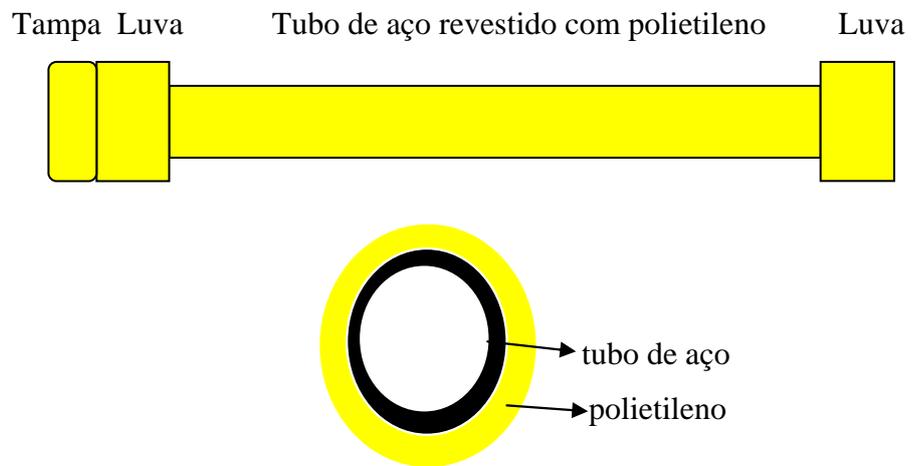


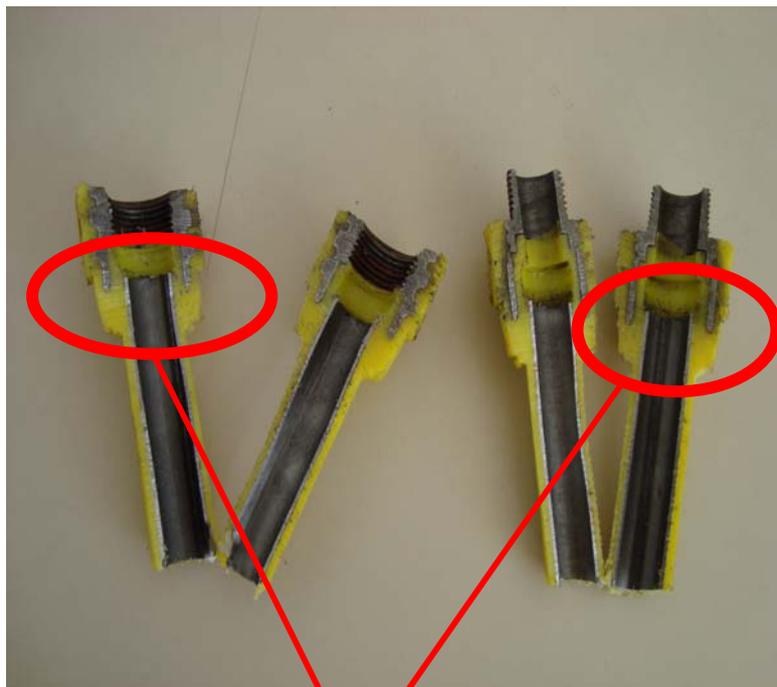
Fig. 3.1 – Desenho esquemático do corpo de prova



Fig. 3.2 – Foto dos corpos de prova



Fig. 3.3 Corte longitudinal do tubo e luva após a termofusão



Área da junção do tubo com a luva

Fig. 3.4 - Corte longitudinal do tubo e luva após a termofusão

Conforme figura 3.3, pode-se observar que o tubo e a luva são constituídos de aço revestido com polietileno e que após o processo da termofusão entre o tubo e a luva, a área da junção do tubo com a luva é constituída somente por polietileno.

### 3.2 – ENSAIO REALIZADO.

Para realização do ensaio foi aplicado o teste de resistência à pressão hidrostática, Este ensaio é utilizado em diversos tipos de equipamentos industriais que trabalham sob pressão, O teste hidrostático tem por objetivo verificar a resistência dos equipamentos a uma pressão superior a de trabalho. E deste modo, garantir o perfeito funcionamento dos equipamentos em uma situação de trabalho normal com pressões mais baixas, sem falhas e vazamentos.

Para a realização deste ensaio foi montado um sistema cujos componentes foram montados rosqueados uns aos outros, conforme fig. 3.3, com os seguintes equipamentos:

- 01 Bomba hidráulica manual;
- 01 Manômetro com escala de 0 a 100 kgf/cm<sup>2</sup> com divisões de 1kg/cm<sup>2</sup>;
- 03 Válvulas esféricas;
- 01 Mangueira de borracha.

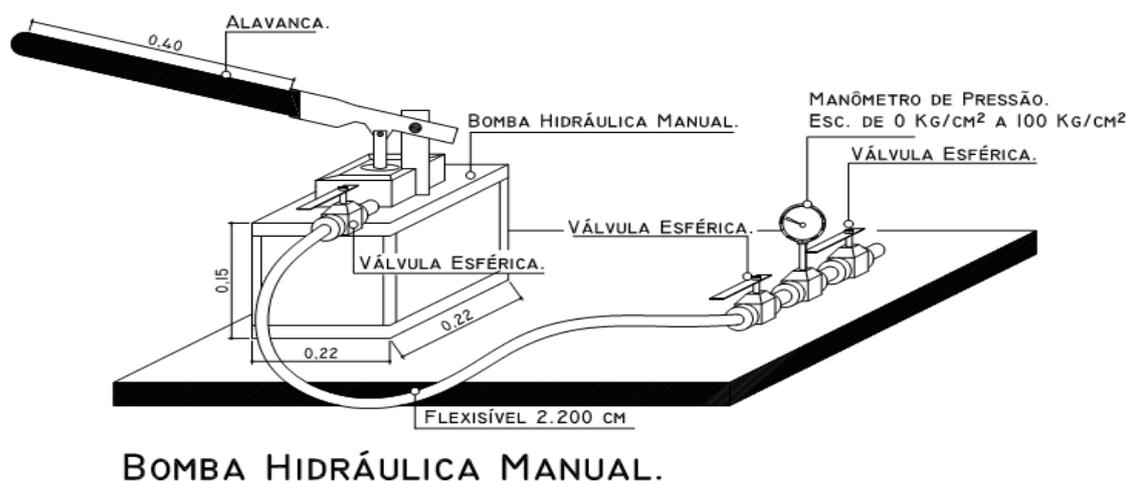


Fig. 3.5 – Desenho esquemático dos equipamentos para a realização dos ensaios.

### 3.3 – METODOLOGIA APLICADA.

O objetivo do ensaio foi o de provocar falha, ou seja, ruptura ou vazamento no material através de ensaio hidrostático. Deste modo, introduziu-se água no corpo de prova por intermédio de uma bomba manual, monitorada por um manômetro (escala de 0 a 100 kgf/cm<sup>2</sup>), o qual possibilitou no momento da falha identificar a pressão de ruptura ou de vazamento do

material ensaiado, conforme fig. 3.4. O sistema todo montado para a realização do ensaio era constituído por 01(uma) bomba manual, para água, com capacidade para 100 N/cm<sup>2</sup>, 01(uma) mangueira de borracha revestida por uma malha de aço, com resistência a 100 N/cm<sup>2</sup>, 02(duas) válvulas esféricas tripartidas com resistência a 100 N/cm<sup>2</sup> e o corpo de prova.

Após o sistema montado, foi utilizado o seguinte critério para a realização dos ensaios nos 10(dez) corpos de prova com diâmetro de 12,5 mm, e nos 10(dez) corpos de prova com diâmetro de 20,0 mm. Bombeou-se água lentamente para o interior do corpo de prova e a cada elevação de 10 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão no sistema, o material testado ficava em repouso por 10 minutos, para acomodação da estrutura dos materiais. Após este período de repouso, iniciava-se novamente o processo de bombear água para o interior do corpo de prova. E, simultaneamente a este processo, o manômetro de pressão instalado no sistema era monitorado para realizar a medição da pressão imposta ao sistema, cujos, resultados estão no gráfico da fig. 3.5 e 3.6.



Fig. 3.6 - Foto do sistema utilizado nos testes hidrostáticos.

### **3.4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.**

Após a realização dos ensaios com os corpos de prova, confeccionado com tubos de aço carbono revestidos com polietileno, anotou-se os valores obtidos nos ensaios conforme

demonstrado na tabela 3.1, referente aos corpos de prova dos tubos de 12,5 mm e na tabela 3.2 os valores referente aos ensaios com os corpos de prova dos tubos de 20,0 mm, que foram obtidos através da leitura de um manômetro, com escala de 1 kg/cm<sup>2</sup>, o qual fazia a medição da pressão do sistema. E no momento do vazamento, ou da ruptura registrava-se o valor de falha, medido pelo manômetro, sendo que as pressões identificadas foram as seguintes, conforme tabela 3.1, onde as características dos vazamentos foram: formação de um filete de água nos tubos de 12,50 mm e gotejamento nos tubos de 20,00 mm e a ruptura se dava por formação de uma bolha e depois a ruptura da mesma :

Tab. 3.1 – Resultado dos testes hidrostáticos com tubos de 12,50 mm.

	Testes Realizados									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Pressão de Falha(kgf/cm <sup>2</sup> )	25	52	51	50	51	42	63	45	93	46
Tipo de Falha R=Ruptura V=Vazamento	R	V	V	V	V	V	R	V	R	V

### Ensaio de teste hidrostático

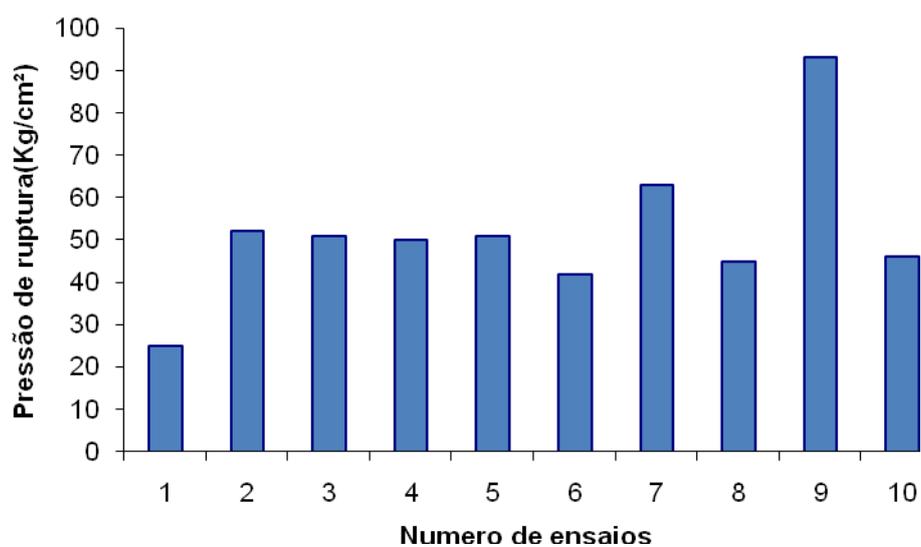
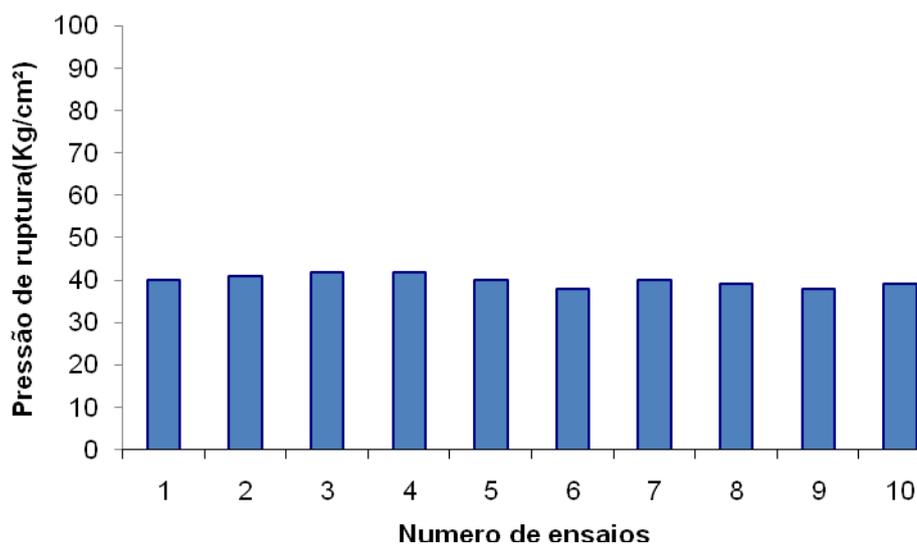


Fig. 3.7 – Gráfico com os resultados dos ensaios de teste Hidrostático com tubo de 12,5 mm.

Tab. 3.2 – Resultado dos testes hidrostáticos com tubos de 20,00 mm.

	Testes Realizados									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Pressão de Falha(kgf/cm <sup>2</sup> )	40	41	42	42	40	38	40	39	38	39
Tipo de Falha R=Ruptura V=Vazamento	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V

### Ensaio de teste hidrostático



z

Fig. 3.8 – Gráfico com os resultados dos ensaios de teste Hidrostático com tubo de 20,0 mm.

A partir dos resultados mostrados nas tabelas 3.1 e 3.2, pode-se calcular a pressão média e o desvio padrão dos ensaios realizados. Para tal operação iremos utilizar um programa de computador para calcular os valores desejados. Os valores encontrados para a pressão média e o respectivo desvio padrão foram: para o tubo de 12,5 mm 51,80 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão média e 17,38 de desvio padrão e coeficiente de variação 33,55% devido a grande dispersão dos resultados obtidos nos ensaios, e para o tubo de 20 mm 39,9 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão média e 1,45 de desvio padrão e coeficiente de variação 3,63%.

## 4 – ANÁLISE DE WEIBULL.

Para o cálculo do módulo de Weibull utilizou-se dois parâmetros, um com o valor das tensões normais circunferenciais ( $\sigma$ ), calculadas através da equação (10) e outro com o valor das pressões de falha ( $P_r$ ).

### 4.1 – CÁLCULO DO MÓDULO DE WEIBULL UTILIZANDOS VALORES DE TENSÕES.

Outra maneira de se analisar os resultados será calcular uma resultante de tensão circunferencial nominal em tubo cilíndrico com uma dada pressão( $P_r$ ) no seu interior, será usada a relação entre força por unidade de comprimento  $Nt$ , na direção vertical, com a pressão, o raio e a espessura. Se  $P_r$  é a pressão do fluido conhecida e  $t$  a espessura da parede do tubo,  $R$  é o raio e  $L$  o comprimento, demonstrada na figura 4.1, então o somatório das forças na direção vertical será:

$$2.Nt.L=2.R.L.P_r \quad (8)$$

Então, como:

$$Nt = \sigma. t \quad (9)$$

A tensão circunferencial na parede do tubo pode ser determinada por:

$$\sigma = \frac{RP_r}{t} \quad (10)$$

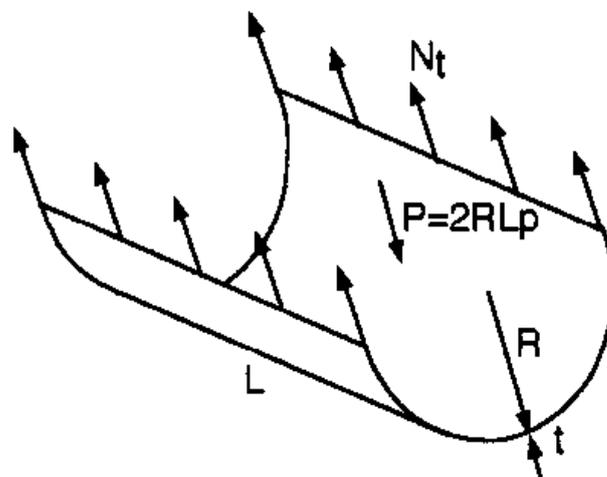


Figura 4.1 – Diagrama de esforços em uma seção longitudinal.

Com os resultados obtidos nos ensaios de teste hidrostático, e aplicando à teoria do cálculo de tensões usando-se a equação (10), calculou-se a tensão de ruptura de cada ensaio, conforme os resultados demonstrados na tabela 4.1 e 4.2

Tab. 4.1 – Tensão de ruptura para os tubos de 12,50 mm de diâmetro.

Ensaio	Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Espessura do tubo polietileno (cm)	Raio do tubo PE (cm)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )
E1	25	0,23	0,625	67,93
E2	52	0,23	0,625	141,30
E3	51	0,23	0,625	138,59
E4	50	0,23	0,625	135,87
E5	51	0,23	0,625	138,59
E6	42	0,23	0,625	114,13
E7	63	0,23	0,625	171,20
E8	45	0,23	0,625	122,28
E9	93	0,23	0,625	252,72
E10	46	0,23	0,625	125,00

Tab. 4.2 – Tensão de ruptura para os tubos de 20,00 mm de diâmetro.

Ensaio	Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Espessura do tubo polietileno (cm)	Raio do tubo PE (cm)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )
E1	40	0,23	1,00	173,91
E2	41	0,23	1,00	178,26
E3	42	0,23	1,00	182,61
E4	42	0,23	1,00	182,61
E5	40	0,23	1,00	173,91
E6	38	0,23	1,00	165,22
E7	40	0,23	1,00	173,91
E8	39	0,23	1,00	169,57
E9	38	0,23	1,00	165,22
E10	39	0,23	1,00	169,57

Com os resultados dos ensaios na forma de tensão, deve, seguir os passos que o método de Weibull estabelece para a análise dos resultados obtidos nos ensaios, os quais, organiza-se na ordem crescente com os valores das tensões e logo depois se atribui um valor de probabilidade de falha, conforme equação (5). O menor valor da tensão terá a menor probabilidade e o maior valor à maior probabilidade, conforme tabela 4.3 e 4.4.

Tab. 4.3 - Probabilidades de falha(para tensão) dos corpos de prova com tubos de 12,50 mm

Ensaio Realizado	Tensão(Kgf/cm <sup>2</sup> )	Índice de ensaios	Probabilidade de Falha (Pi=i/n+1)	Probabilidade Pi x100(%)
E1	67,93	1	0,09	9,09
E6	114,13	2	0,18	18,18
E8	122,28	3	0,27	27,27
E10	125	4	0,36	36,36
E4	135,87	5	0,45	45,45
E5	138,59	6	0,54	54,54
E3	138,59	7	0,63	63,63
E2	141,3	8	0,72	72,72
E7	171,2	9	0,81	81,81
E9	252,72	10	0,90	90,9

Tab. 4.4 - Probabilidades de falha(para tensão) dos corpos de prova com tubos de 20,00 mm

Ensaio Realizado	Tensão(Kgf/cm <sup>2</sup> )	Índice de ensaios	Probabilidade de Falha (Pi=i/n+1)	Probabilidade Pix100(%)
E6	165,22	1	0,09	9,09
E9	165,22	2	0,18	18,18
E8	169,57	3	0,27	27,27
E10	169,57	4	0,36	36,36
E1	173,91	5	0,45	45,45
E5	173,91	6	0,54	54,54
E7	173,91	7	0,63	63,63
E2	178,26	8	0,72	72,72
E3	182,61	9	0,81	81,81
E4	182,61	10	0,90	90,9

Para se calcular o módulo de Weibull é preciso calcular  $\ln(P_r)$ , e  $\ln[\ln(1/(1-P_i))]$ , conforme demonstrado nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tab. 4.5 – Dados para o cálculo(tensão) do módulo de Weibull para tubos de 12,50 mm.

Ensaio Realizado	Tensão de Falha (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\ln P_r$	$\ln[\ln(1/(1-P))]$
E1	67,93	4,21848	-2,3506
E6	114,13	4,73734	-1,606
E8	122,28	4,80631	-1,1442
E10	125,00	4,82831	-0,7941
E4	135,87	4,9117	-0,5006
E5	138,59	4,93152	-0,2376
E3	138,59	4,93152	0,0115
E2	141,30	4,95089	0,2618
E7	171,20	5,14283	0,5334
E9	252,72	5,53228	0,8745

Tab. 4.6 – Dados para o cálculo(tensão) do módulo de Weibull para tubos de 20,00 mm.

Ensaio Realizado	Tensão de Falha (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\ln P_r$	$\ln[\ln(1/(1-P))]$
E6	165,22	5,10728	-2,3506
E9	165,22	5,10728	-1,606
E8	169,57	5,13327	-1,1442
E10	169,57	5,13327	-0,7941
E1	173,91	5,15854	-0,5006
E5	173,91	5,15854	-0,2376
E7	173,91	5,15854	0,0115
E2	178,26	5,18324	0,2618
E3	182,61	5,20735	0,5334
E4	182,61	5,20735	0,8745

Com os dados obtidos nos ensaios, bem como com o cálculo das probabilidades utilizando os dados dos ensaios E1 e E9, pode-se calcular o módulo de Weibull referente ao tubo de 12,5 mm:

$$m = \frac{0,8745 - (-2,3506)}{5,5322 - 4,2184} = 2,45$$

E, novamente utilizando os valores obtidos nos ensaios e o cálculo das probabilidades e utilizando os dados dos ensaios E6 e E4, pode-se calcular o módulo de Weibull referente ao tubo de 20,0 mm:

$$m = \frac{0,8745 - (-2,3506)}{5,1072 - 5,2073} = 32,22$$

#### 4.2 – CÁLCULO DO MÓDULO DE WEIBULL UTILIZANDO VALORES DE PRESSÕES.

Agora, com os resultados dos ensaios referentes às pressões registradas pelo manômetro, deve-se, seguir os passos que o método de Weibull estabelece para a análise dos resultados obtidos, conforme tabela 4.7 para tubos de 12,5 mm e tabela 4.8 para tubos de 20,0 mm.

Tabela 4.7 - Probabilidade de falha(pressão) dos corpos de prova com tubos de 12,5 mm

Ensaio Realizado	Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Índice de ensaios	Probabilidade de Falha (Pi=i/n+1)	Probabilidade % (Pix100)
E1	25	1	0,09	9,09
E6	42	2	0,18	18,18
E8	45	3	0,27	27,27
E10	46	4	0,36	36,36
E4	50	5	0,45	45,45
E5	51	6	0,54	54,54
E3	51	7	0,63	63,63
E2	52	8	0,72	72,72
E7	63	9	0,81	81,81
E9	93	10	0,90	90,90

Tabela 4.8 - Probabilidade de falha(pressão) dos corpos de prova com tubos de 20 mm

Ensaio Realizado	Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Índice de ensaios	Probabilidade de Falha ( $P_i=i/n+1$ )	Probabilidade % ( $P_i \times 100$ )
E6	38	1	0,09	9,09
E9	38	2	0,18	18,18
E8	39	3	0,27	27,27
E10	39	4	0,36	36,36
E1	40	5	0,45	45,45
E5	40	6	0,54	54,54
E7	40	7	0,63	63,63
E2	41	8	0,72	72,72
E3	42	9	0,81	81,81
E4	42	10	0,90	90,90

Para o desenvolvimento da equação (7) é preciso calcular  $\ln(P_i)$  e  $\ln[\ln(1/1-P_i)]$ , para os dois ensaios, conforme os valores demonstrados nas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.9 – Dados para o calculo(pressão) do módulo de Weibull para tubos de 12,5 mm.

Ensaio Realizado	Pressão de Falha (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\ln P_r$	$\ln[\ln 1/(1-P)]$
E1	25	3,21	-2,3506
E6	42	3,73	-1,6060
E8	45	3,80	-1,1442
E10	46	3,82	-0,7941
E4	50	3,91	-0,5006
E5	51	3,93	-0,2376
E3	51	3,93	0,0115
E2	52	3,95	0,2618
E7	63	4,14	0,5334
E9	93	4,53	0,8745

Tabela 4.10 – Dados para o cálculo (pressão) do módulo de Weibull para tubos de 20,0 mm.

Ensaio Realizado	Pressão de Falha (kgf/cm <sup>2</sup> )	ln P <sub>r</sub>	ln[ln1/(1-P)]
E6	38	3,63	-2,3506
E9	38	3,63	-1,6060
E8	39	3,66	-1,1442
E10	39	3,66	-0,7941
E1	40	3,68	-0,5006
E5	40	3,68	-0,2376
E7	40	3,68	0,0115
E2	41	3,71	0,2618
E3	42	3,73	0,5334
E4	42	3,73	0,8745

Com os dados obtidos nos ensaios e com o cálculo das probabilidades utilizando os dados dos ensaios E1 e E9, pode-se calcular o módulo de Weibull referente ao tubo de 12,5 mm:

$$m = \frac{0,8745 - (-2,3506)}{4,5325 - 3,2188} = 2,45$$

E, novamente com os valores obtidos nos ensaios e o cálculo das probabilidades e utilizando os dados dos ensaios E6 e E4, pode-se calcular o módulo de Weibull referente ao tubo de 20,0 mm:

$$m = \frac{0,8745 - (-2,3506)}{3,6375 - 3,7376} = 32,22$$

#### 4.3 – GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR.

Como se pôde observar, o valor do módulo de Weibull(m) para o cálculo baseado tanto nos valores das tensões quanto nos valores das pressões são iguais. Portanto para uma melhor análise dos resultados será utilizado o método da regressão linear. Com o auxílio de um software, pode-se determinar a função correspondente a reta de regressão linear dos ensaios realizados onde ln(Pr) é o eixo das abscissas e ln[ln1/(1-P)] o eixo das ordenadas, conforme gráfico das fig. 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

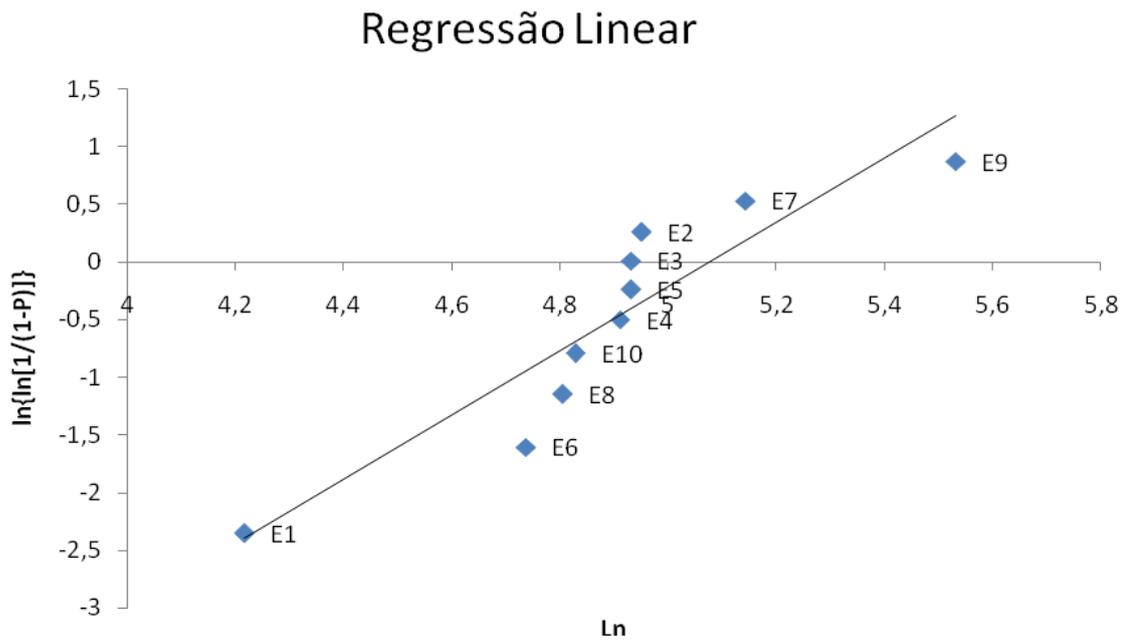


Fig. 4.2 – Gráfico de regressão linear com tubo de 12,50 mm com valores relativos a tensão.

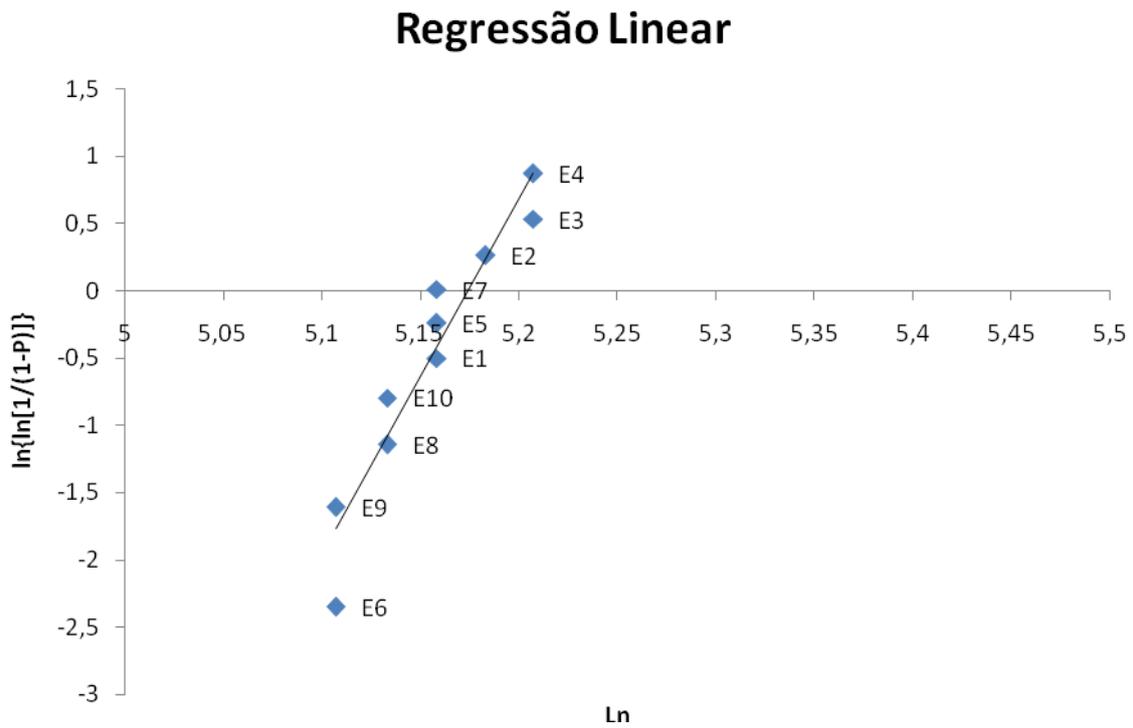


Fig. 4.3 – Gráfico de regressão linear com tubo de 20,00 mm com valores relativos a tensão.

## Regressão Linear

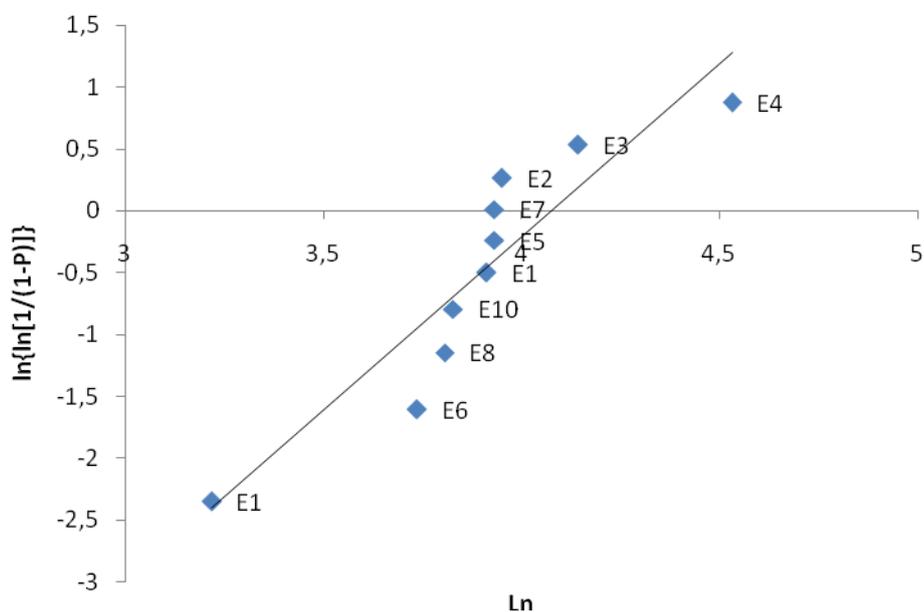


Fig. 4.4 – Gráfico de regressão linear com tubo de 12,50 mm com valores relativos a pressão.

## Regressão Linear

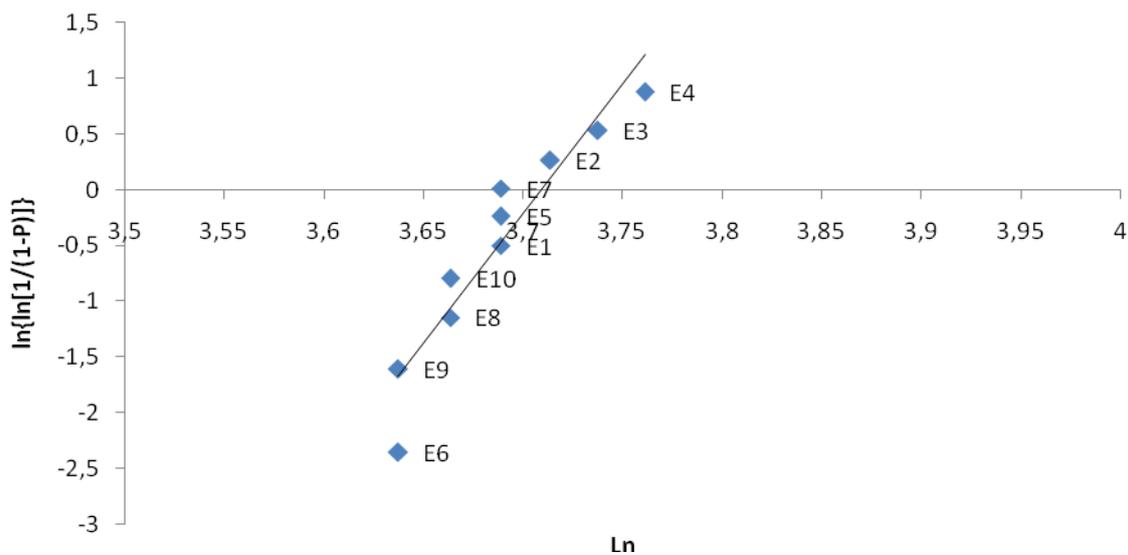


Fig. 4.5 – Gráfico de regressão linear com tubo de 20,00 mm com valores relativos a pressão.

A partir dos gráficos de regressão linear, pode-se determinar a função que corresponde a reta de regressão linear dos ensaios realizados. Sendo que, para o tubo de 12,5 mm, chegou-se a seguinte equação da reta,  $y = 2,79x - 14,18$  com os valores correspondentes as tensões, e  $y = 2,79x - 11,39$  utilizando os valores correspondentes as pressões.

Para o tubo de 20,0 mm, a equação da reta encontrada para os valores das tensões foi  $y = 26,38 - 136,5$ , e  $y = 26,38x - 97,75$  para os valores das pressões.

## 5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos e os gráficos de regressão linear conforme figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, confirmam a Teoria de Weibull de que, quanto mais a reta dos gráficos se desloca para a direita, à resistência do material é maior, caracterizando um material mais resistente, e que quando o coeficiente angular da reta (Módulo de Weibull,  $m$ ) tiver uma tendência de aumento na distribuição, os ensaios terão um resultado mais homogêneo e uma menor dispersão entre os resultados dos ensaios, fatos que se pode identificar nos resultados obtidos. O material com o tubo de 12,5 mm teve uma dispersão bem maior, entre os ensaios e conseqüentemente tem-se um Módulo de Weibull mais baixo, igual a 2,45. Já o tubo de 20,0 mm a dispersão entre os resultados foi menor o que ocasionou um Módulo de Weibull mais alto, igual a 32,22.

Deve-se notar que a relação entre o raio ( $R$ ) e a espessura ( $t$ ),  $R/t$ , é bem maior para o tubo de 20,0 mm de diâmetro, pois ambos têm a mesma espessura total de parede, ou seja, somando-se a do tubo interno, de aço, e a do revestimento externo, de polietileno. Adicionalmente, a equação (10), que fornece a tensão normal de membrana, circunferencial, é mais precisa para tubos de parede fina, em particular com  $R/t > 10$  [13]. Nas extremidades dos tubos, devido às conexões e às descontinuidades geométricas, aparecem momentos fletores acoplados às tensões de membrana. Estes momentos fletores serão tão mais significativos quanto menor for a relação ( $R/t$ ). Assim, era de se esperar que o tubo de diâmetro 20,0 mm apresentasse menor dispersão nos resultados.

Admitindo que a resistência intrínseca aparente do material seja considerada para a probabilidade  $P = 1/e$  (0,37), que permite uma sobrevivência de 37% do material, e através do cálculo da interpolação linear pode-se determinar o valor da resistência intrínseca aparente do material ensaiado. O resultado da interpolação linear utilizando os resultados referentes a tensão interna foi de 127,20 kg/cm<sup>2</sup> e que transformado por intermédio da equação(10) a mesma corresponde a 46,80 kg/cm<sup>2</sup> de pressão para o tubo de 12,50 mm, e 172,55 kg/cm<sup>2</sup> que corresponde a 39,70 kg/cm<sup>2</sup> de pressão para o tubo de 20,00 mm. Utilizando também o método de interpolação linear, calcula-se o valor da resistência intrínseca aparente dos materiais a pressão que é de 46,80 kgf/cm<sup>2</sup> para o tubo de 12,5 kg/cm<sup>2</sup> e 39,70 kg/cm<sup>2</sup> para o tubo de 20,00 mm, como se pode observar o valor da resistência intrínseca do material é o mesmo para os dois parâmetros utilizados, tanto pressão quanto tensão, para o calculo do modulo de Weibull. Sendo assim para critério de análise de resultados, será utilizado os resultados relativos a pressão de falha.

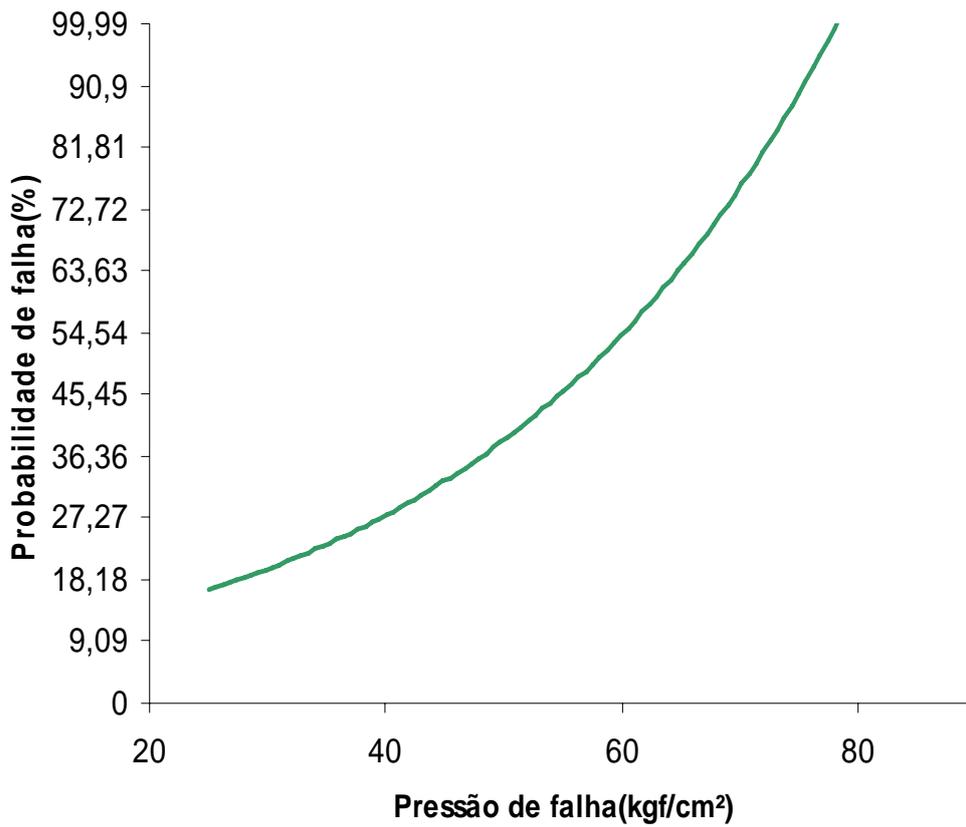


Fig. 5.1 – Gráfico de Weibull para o tubo de 12,5 mm.

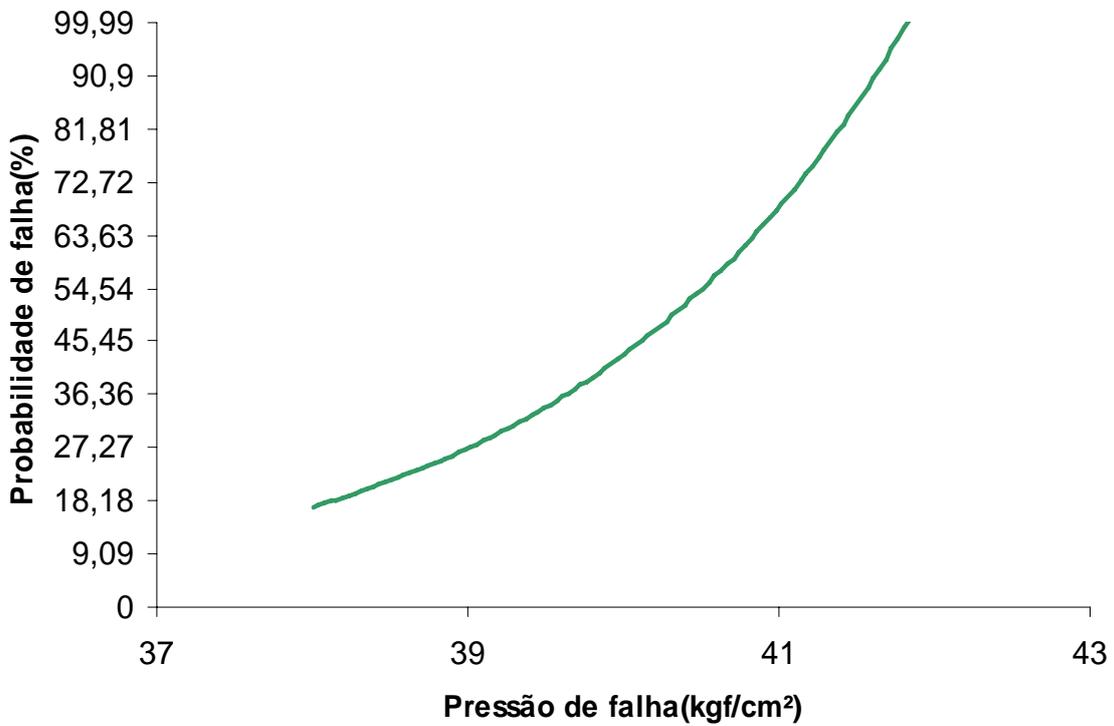


Fig. 5.2 – Gráfico de Weibull para o tubo de 20 mm.

Pode-se observar nos gráficos das fig. 5.1 e 5.2 que a probabilidade de falha aumenta à medida que a pressão aumenta, e que quanto maior o módulo de Weibull menor é a curvatura do gráfico.

Considerando o conceito de que a resistência intrínseca,  $X_0$  é calculada para  $P = 1/e(0,37)$ , e aplicado aos resultados obtidos, verifica-se que quando a pressão interna aplicada ao tubo for nula ( $P_r=0$ ) a tendência é de que todos os tubos sobrevivam com,  $P_i = 1$ , ou seja a probabilidade de falha é nula e a probabilidade de sobrevivência é de 100%, pode-se afirmar também que quanto maior era a pressão interna dos tubos mais sua probabilidade de falha aumentava e sua probabilidade de sobrevivência diminuía conforme os valores demonstrados nos gráficos das fig. 5.3 e 5.4.

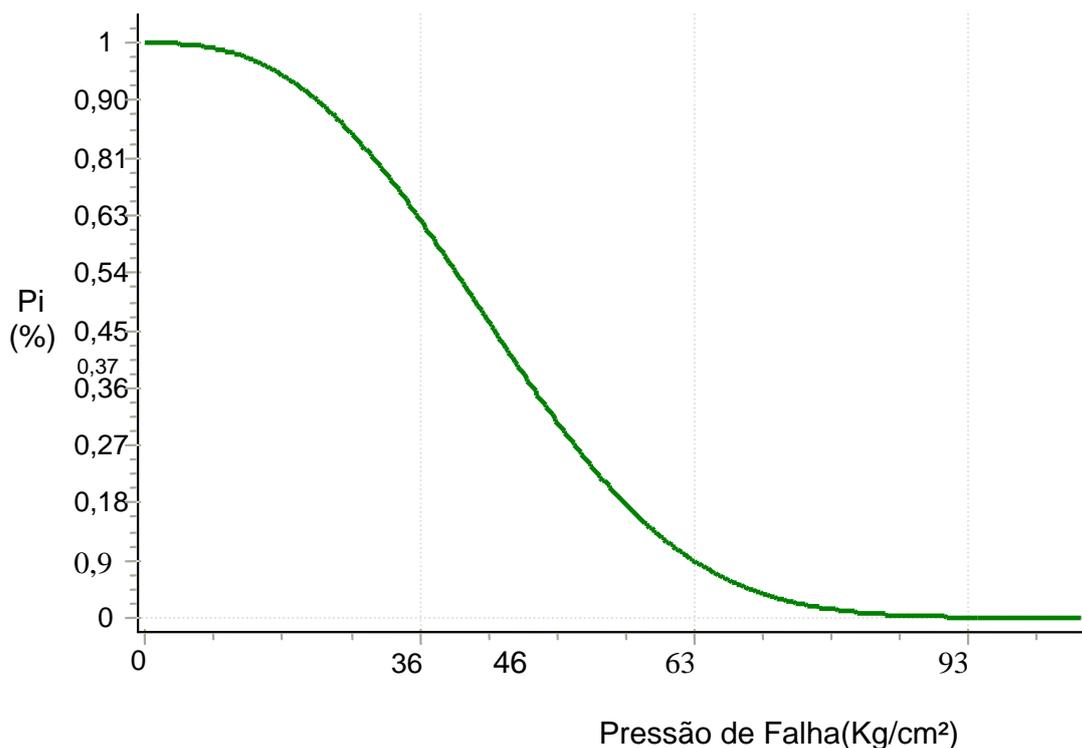


Fig. 5.3 – Probabilidade de sobrevivência do tubo de 12,5 mm.

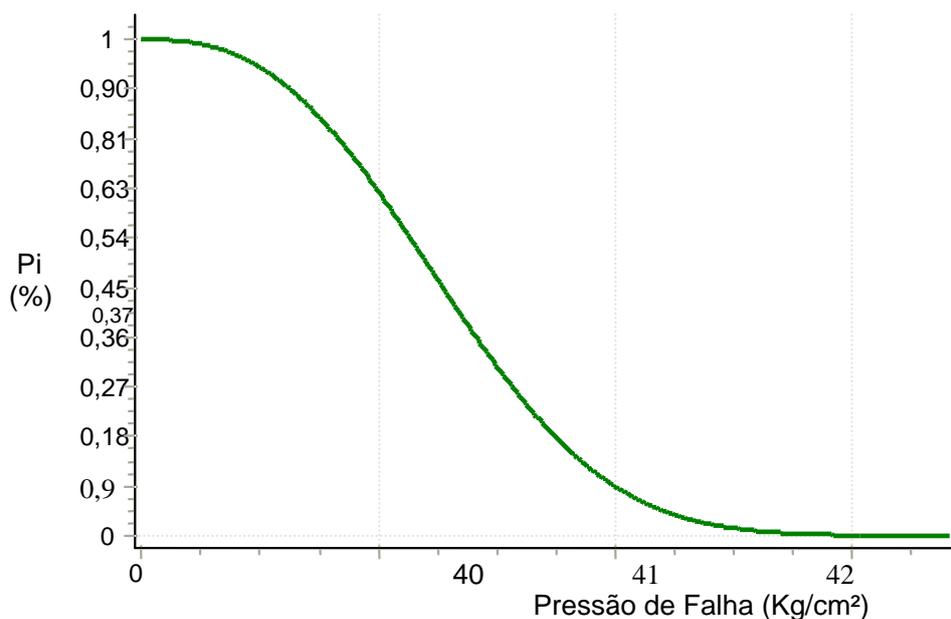


Fig. 5.4 – Probabilidade de sobrevivência do tubo de 20 mm.

Conforme os ensaios realizados nos corpos de prova com tubo de 12,5 mm, verificou-se que em 70% das falhas foi devido à ocorrência de vazamento, e conforme exemplo da figura 5.6 onde ocorreu o vazamento de fluido na junção do tubo com a conexão, ocorridos nos ensaios E2, E3, E4, E5, E6, E8, E10, e 30% das falhas ocorreu devido à ruptura na parede do polietileno, conforme exemplo da figura 5.5 ocorridos nos ensaios E1, E7, E9. Conforme os resultados obtidos, pode-se verificar que a falha mais comum foi a de vazamento, o qual ocorreu sempre na área da junção do tubo com a conexão, sugerindo que esta área onde ocorre o processo da termofusão é um local crítico de possível falha do material. Como em todo ensaio, alguns valores não são totalmente compatíveis com a realidade e ocorrem por erros ou falha do material, conforme ocorrido no ensaio E1(25 kg/cm²).

Neste caso verificam-se três situações distintas: em 01 ensaio (E1) ocorreu uma falha precoce, o que sugere um erro no processo da termofusão, provavelmente ocasionado por impurezas na superfície das peças ou temperatura abaixo do ponto fusão dos materiais, em outros 07 ensaios (E2, E3, E4, E5, E6, E8, E10) verificou-se que o diferencial da pressão entre a menor e a maior não foi tão grande(10 kg/cm²), apesar de se distinguir duas faixas de valores de pressão, uma de 42 kg/cm² a 46 kg/cm², e outra de 50 kg/cm² a 52 kg/cm², e por fim, 02 ensaios (E7, E9) com pressões mais altas 63 kg/cm² e 93 kg/cm². Analisando os 07

ensaios (E2, E3 E4, E5, E6, E8, E10) pode-se verificar uma distribuição mais homogênea dos resultados obtidos, e que o coeficiente angular (Weibull) teria uma tendência de aumento, ocasionando uma maior inclinação em sua reta, além do deslocamento desta mais para a direita, pois a dispersão dos valores observados seria menor. Nos outros 02 ensaios o processo de termofusão proporcionou uma melhor fusão das peças, porém, se a grande maioria fosse executada neste padrão, o coeficiente angular (Modulo de Weibull) seria ainda maior e a reta estaria localizada mais à direita. Já os ensaios realizados com os corpos de prova de tubo de 20 mm, verificou-se que 100 % das falhas foram devidos a vazamentos, como também, uma baixa dispersão entre os resultados, o que ocasionou um coeficiente angular (Modulo de Weibull) bem mais alto(32,22), que o ensaio com o tubo de 12,5 mm que foi de 2,45. E comparando os gráficos 4.1 e 4.2, verifica-se que o gráfico 4.2, com a reta da regressão linear referente aos ensaios do tubo de 20 mm é mais inclinada que a do gráfico 4.1, com os resultados da reta de regressão linear do ensaio com o tubo de 12,5 mm. Tal fato sugere que o processo da termofusão do ensaio do tubo de 20 mm foi mais bem executado, pois o resultado do ensaio não proporcionou um diferencial muito grande entre a menor pressão de falha que foi de 38 kgf/cm<sup>2</sup> e a maior pressão de falha que foi de 42 kgf/cm<sup>2</sup>. Neste caso o diferencial entre as pressões foi de 4 kgf/cm<sup>2</sup> e o desvio padrão de apenas 1,45, sendo portanto totalmente diferente do ensaio com o tubo de 12,5 mm que teve um diferencial de 68 kgf/cm<sup>2</sup>, pois a menor pressão de falha foi de 25 kgf/cm<sup>2</sup> e a maior pressão de falha foi de 93 kgf/cm<sup>2</sup> e um desvio padrão de 17,38, demonstrando que os resultados do ensaio do tubo de 20 mm foi melhor que os resultados do ensaio com o tubo de 12,5 mm.

A pressão de um fluido dentro de um tubo circular e de seção transversal constante produz a mesma tensão normal circunferencial ( $\sigma$ ) através de toda sua extensão. Porém, pode haver variações no processo de termofusão dos acessórios(defeitos de fabricação). Em decorrência destes fatores, poderá ser verificado que para a mesma probabilidade de sobrevivência os níveis de pressão para a mesma amostra serão diferentes. E, conforme resultados dos ensaios, a probabilidade de sobrevivência dependerá do diâmetro do tubo utilizado que fica associado à pressão aplicada ao material. O ideal é que a mesma nunca seja maior do que sua resistência intrínseca. Outro fator importante é a execução dos serviços, pois nos ensaios com os tubos de 12,5 mm houve uma grande dispersão de resultados que pode caracterizar algum erro de montagem ou de acompanhamento dos ensaios.

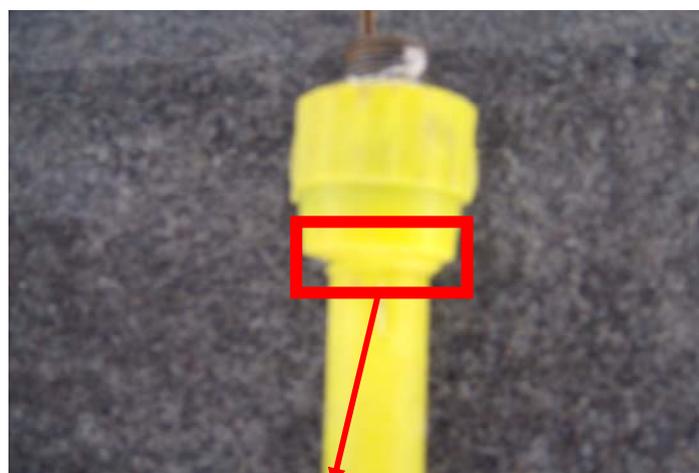
Apesar das diferenças verificadas entre os resultados obtidos para os dois grupos de ensaios, podemos afirmar que a utilização dos tubos revestidos com polietileno é viável em instalações residenciais e comerciais, pois são instalações em que se trabalha com pressões

que variam, de 2,5 kgf/cm<sup>2</sup> a 12 kgf/cm<sup>2</sup>. E ainda analisando os resultados obtidos na tabela 4.7 e o demonstrado no gráfico 5.3, pode-se verificar que a resistência intrínseca do material é de 46 kgf/cm<sup>2</sup>, e que ficou próximo aos valores onde se teve uma maior concentração de falhas, que corresponde a uma faixa de valores que começa pelo ensaio E6 com o valor de 42 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão, depois passando pelos ensaios E8 (pressão 45 kgf/cm<sup>2</sup>), E10 (pressão 46 kgf/cm<sup>2</sup>), E4 (pressão 50 kgf/cm<sup>2</sup>), E5 (pressão 51 kgf/cm<sup>2</sup>), E3 (pressão 51 kgf/cm<sup>2</sup>) e termina com o ensaio E2 com o valor de 52 kgf/cm<sup>2</sup>, cujo valor médio das pressões que é de 48 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão, o que determina ser uma faixa crítica de tensões, a qual provoca a falha do material na junção dos tubos, sendo assim o recomendado, é trabalhar com pressões sempre abaixo desta zona crítica que engloba os valores de 42 kgf/cm<sup>2</sup> a 52 kgf/cm<sup>2</sup>.



Ponto de falha

Fig. 5.5 – Foto do corpo de prova que apresentou ruptura no tubo.



Área onde ocorreu vazamento.

Fig. 5.6 - Foto de um corpo de prova que apresentou vazamento.

Pode-se observar também que o módulo de Weibull do material com tubo de 12,5 mm foi baixo, no valor de 2,45 o qual se deve à grande dispersão dos valores obtidos, pois, se a dispersão fosse menor e mais homogênea o módulo de Weibull seria maior. Devido ao baixo valor do módulo de Weibull, o que pode caracterizar uma impresição do material testado, pois, a partir de 25 kgf/cm<sup>2</sup> o material não mantém um padrão satisfatório, pois, ocorre falha entre 42 kgf/cm<sup>2</sup> e 46 kgf/cm<sup>2</sup> e depois entre 50 kgf/cm<sup>2</sup> e 52 kgf/cm<sup>2</sup> e mais dois valores altos de 63 kgf/cm<sup>2</sup> e 93 kgf/cm<sup>2</sup>. Diferentemente o grupo 02 obteve um módulo de Weibull mais alto, no valor de 32,22, pois conforme já mencionado a dispersão entre os resultados foi bem menor.

## 6 – CONCLUSÕES.

Os módulos de Weibull obtidos nos ensaios foram 2,45, para o tubo com diâmetro de 12,5 mm, e 32,22 para o tubo com diâmetro de 20 mm, com suas resistências intrínsecas nos valores de 46,80 kgf/cm<sup>2</sup> e 39,70 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Estas resistências representam a pressão necessária para a mesma probabilidade de sobrevivência de cada material ensaiado. E em cada caso o valor da resistência intrínseca variou conforme o diâmetro do material, sendo que para o material com o diâmetro maior, de 20 mm, obteve-se um módulo de Weibull maior devido à baixa dispersão dos valores obtidos nos ensaios. Porém, o valor da resistência intrínseca de 39,70 kgf/cm<sup>2</sup> é menor que os 46,80 kgf/cm<sup>2</sup> do tubo com diâmetro de 12,5 mm, tal fato se deve aos materiais possuírem a mesma espessura, sendo 0,9 mm do tubo de aço e 2,3 mm do revestimento de polietileno.

Com base em todos os ensaios realizados e conforme as figuras 5.4 e 5.5 pode-se observar que para todas as falhas apresentadas pelos materiais de 12,5 mm e 20 mm, a mesma sempre ocorre na junção do tubo com a conexão, local este, onde se realiza a termofusão existe uma área formada somente por polietileno conforme figuras 3.3 e 3.4, e que apesar desta área ser composta somente por polietileno é capaz de suportar a pressão do GLP, desde que os limites máximos de pressão determinada para as tubulações sejam respeitados. Tanto nos casos de vazamento, quanto nos de ruptura, a falha se deu neste local, o que caracteriza este como o local mais provável de se ocorrer uma falha. Portanto o trabalho de termofusão deve ser realizado obedecendo-se, rigorosamente, todos os procedimentos, pois uma termofusão mal feita irá reduzir bastante à resistência ou causar uma falha precoce do material. Fato este, que deve ter ocorrido no ensaio E1, pois o mesmo falhou com uma pressão de 25 Kgf/cm<sup>2</sup>, demonstrando assim que uma termofusão mal feita compromete realmente a resistência deste material.

E baseado no valor médio das pressões do tubo de 12,50mm que foi de 48 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão, o que determina ser uma faixa crítica de tensões, na qual pode ocorrer falha na junção dos tubos, onde o ideal é trabalhar sempre com pressões abaixo desta zona crítica que engloba os valores de 42 kgf/cm<sup>2</sup> a 52 kgf/cm<sup>2</sup>.

Pode-se observar que as resistências intrínsecas dos materiais ensaiados são bem próximas e que o método de Weibull possibilita a realização de um estudo mais preciso sobre o material e o tubo como um todo, o que permite determinar um valor ao qual se possa

trabalhar, com confiabilidade, sem ultrapassar o limite da resistência do material em sua junção.

Baseado, nestes valores chega-se à conclusão de que o material analisado é recomendado para a utilização em redes de Gás LP . Sendo assim, o recomendado é que este material deve ser utilizado em instalação que trabalham com baixa pressão, como instalações residenciais e comerciais, que trabalha com pressão entre 2 kgf/cm<sup>2</sup> e 5 kgf/cm<sup>2</sup>. Porém, toda instalação, por medida de segurança, deve ser submetida aos testes de estanqueidade e hidrostático, sendo que este deve ser realizado a uma pressão 1,5 maior que a pressão de trabalho dimensionada, para a rede, pois podem ocorrer erros graves no processo da termofusão comprometendo a segurança das instalações de Gás LP e nas instalações ao ar livre deve ser utilizada com certas restrições, pois o polietileno não pode ficar exposto aos raios ultravioleta, pois causam o ressecamento e a degradação do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] [www.grupodema.com.br](http://www.grupodema.com.br) consultado em maio de 2009.
- [2] [www.planetaplastico.com.br/consultado](http://www.planetaplastico.com.br/consultado) consultado em maio de 2009.
- [3] [www.lamav.ufscar.br](http://www.lamav.ufscar.br) consultado em maio de 2009
- [4] CONFIABILIDADE Conceitos Básicos de. **Reliasoft**, Edição 3, Maio 2005. Disponível em: <http://www.dee.ufrn.br/~tavares/arquivos>.
- [5] IMASAVA, F.J. Gouvêa, M.T.: Xavier C Rodrigues. S. Uso do microcomputador nos cálculos do método de Weibull para a medida da resistência dos materiais frágeis.
- [6] Weibull, W. A Statistical distribution functions of wide applicability, journal of applied mechanics 18p. 293-302 1951.
- [7] KAO, J.H.K computer methods for smarting Weibull parameters in reliability studies. IRE transactions on Realiabiy Quality Control n. 15, p.15-22, 1958.
- [8] BERGMAN, B. On the estimation of the Weibull modulus. Journal of Material Science Letters, n.3, p.689-692, 1983.
- [9] WILKS, S.S Determination of simple size for setting tolerance limits, the Annals of Mathematical Statistics 1942.n.12, p91-96, 1942.
- [10] [www.fe.up.pt](http://www.fe.up.pt) , Fac. de Engenharia da Univ. do Porto, consultado em dezembro de 2009.
- [11] [www.Weibull.com](http://www.Weibull.com), consultado em dezembro de 2009.
- [12] [www.worldlingo.com](http://www.worldlingo.com), consultado em dezembro de 2009.
- [13] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), consultado em dezembro de 2009.

[14] [www.est.ufpr.br](http://www.est.ufpr.br), consultado em dezembro de 2009.

[15] BATDORF, S.B. - Fundamentals of the statistical theory of fracture, In: Fracture Mechanics of Ceramics. Vol 3 R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman & F. F. Lange (eds) pp. 1-30 Plenum Press, New York, 1978.

[16] Telles, P.C.S., Tubulações Industriais, LTC, Rio de Janeiro, 2002.