

RICARDO MÜLLER HUPPES

ANÁLISE DE FALHA EM UM VASO DE PRESSÃO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Heraldo José Amorim
Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE FALHA EM UM VASO DE PRESSÃO

RICARDO MÜLLER HUPPES

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA
DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Porto Alegre
2009

HUPPES, R. M. **Análise de Falha em Vaso de Pressão**. 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos muito usados em todos os tipos de indústrias contendo fluídos pressurizados. Por serem equipamentos de alta responsabilidade, sua construção deve ser regida por normas internacionalmente reconhecidas. O rompimento de um vaso de pressão durante o teste hidrostático, em uma região onde a princípio não havia razões para a ruptura, incentivou a busca pelos principais motivos. Neste trabalho é apresentada uma metodologia de análise de falhas que tem por finalidade descobrir as razões do colapso do vaso. Ao final do trabalho são mostrados os resultados e discussões da análise e posteriormente é apontada a causa da falha.

PALAVRAS-CHAVE: Vasos de pressão, fluídos pressurizados, teste hidrostático, análise de falhas.

HUPPES, R. M. **Failure Analysis of a Pressure Vessel**. 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

Pressure vessels are widely used equipments in all types of industries containing pressurized fluids. By being equipment of high responsibility, its construction must be conducted by international standards. The disruption of a pressure vessels during the hydrostatic test, in a region where, at the beginning did not have reasons for it, stimulated the search for the reason. In this work is presented a methodology of failure analysis that has for purpose to discover the reason of the collapse of the vase. In the end of the work the results and discussions of the analysis are shown and later the cause for the rupture is pointed.

KEYWORDS: Pressure vessels, pressurized fluids, hydrostatic test, failure analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivos	01
1.2. Estrutura do Trabalho	02
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
2.1. Código ASME	02
2.2. Teste Hidrostático	03
2.3. Resistência dos Materiais	03
2.4. Tensões longitudinais e Tensões Circunferenciais	04
2.5. Mecânica da Fratura	04
2.5.1. Diagrama FAD	05
3. METODOLOGIA	06
3.1. Apresentação do Problema	06
3.2. A Inspeção	07
3.3. Levantamento de Dados	07
4. ANÁLISE DE FALHA	08
4.1. Temperatura e Região da Solda	08
4.2. Defeito no Material	08
4.3. Falha por Corrosão	12
4.4. Erro de Projeto	13
4.5. Trincas Pré-Existentes	13
4.6. Excesso de pressão	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE	17

1. INTRODUÇÃO

Vaso de pressão é definido genericamente como um recipiente estanque, de qualquer tipo, que seja capaz de conter um fluido pressurizado. Com esta definição abrangente, se incluem neste grupo desde uma simples panela de pressão de cozinha até os mais sofisticados reatores nucleares. Vasos de pressão constituem em uma grande parte das indústrias de processo os elementos mais importantes, maiores em peso, tamanho e custo unitário, podendo chegar até 60% do custo total dos materiais e equipamentos.

Diferente do que acontece com a maioria dos equipamentos, a grande maioria dos vasos de pressão não são objetos de uma linha de fabricação de indústrias, normalmente são feitos sob encomenda, com dimensões para atender a cada caso uma determinada finalidade ou condições de desempenho. Projetar um vaso de pressão inclui não apenas fazer o seu dimensionamento para resistir a pressões e cargas atuantes, como também realizar a seleção técnica e econômica dos materiais adequados, dos processos de fabricação, peças internas e detalhes. No Brasil o código usado no projeto e inspeção de vasos de pressão é o código ASME. Porém, estas normas são adequadas para a avaliação de vasos novos, é errado utilizar ditas normas na verificação de vasos em uso. Para avaliar a criticidade de defeitos de vasos em uso se deve utilizar uma norma de adequação ao uso (Fitness for service), as mais utilizadas no Brasil são a API579, e a BS7910.

Por serem elementos pressurizados, existe uma preocupação quanto a sua integridade estrutural, pois em seu rompimento ocorre descompressão explosiva gerando perdas materiais e podendo levar a perdas humanas. Após a publicação da NR-13 (Norma Regulamentadora) estabeleceram-se critérios mais rigorosos para o projeto, inspeção, manutenção e operação de vasos de pressão, tendo como objetivo principal a diminuição de acidentes envolvendo estes equipamentos.

1.1. Objetivos

O rompimento de um vaso de pressão, visto na figura 2, usado como pulmão para um compressor de ar, figura 1, durante o teste hidrostático, chamou a atenção para o estudo de análise de falhas. O objetivo desta análise é detectar quais os possíveis fatores que levaram este equipamento ao colapso, para que estes possam ser entendidos e usados como fonte de realimentação de dados para o projetista. Desta forma a análise de falha funciona como uma ferramenta de trabalho e não apenas como uma investigação que tenha por finalidade achar o causador do incidente.



Figura 1: Vaso acoplado ao compressor.



Figura 2: Vaso após rompimento no teste hidrostático.

1.2. Estrutura do trabalho

O trabalho se estrutura da seguinte forma: após a introdução apresentada na seção 1, a seção 2 contém a revisão bibliográfica junto à teoria necessária para o desenvolvimento do trabalho. Na seção 3 é discutida a metodologia utilizada no trabalho com a apresentação do problema e de dados importantes em sua resolução. Na seção 4 é feita a análise de falhas, onde se busca o motivo da ruptura. Na seção 5 o trabalho é concluído com uma discussão dos resultados obtidos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Temas importantes na dissertação desta monografia são a dissertação feita por Jorge dos Santos Pereira Filho (2004) com o título de “*Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vasos de Pressão*” e a apostila de Guilherme Victor P. Donato (2008), “*Avaliação de Integridade Segundo API-579*”. Estes dois textos contribuíram com uma revisão de conceitos sobre mecânica da fratura, curvas FAD (Failure Assessment Diagram), cálculos de fatores de intensidade de tensão e procedimentos da API-579.

A dissertação de mestrado do Eng. Carlos Alberto Cassou (1999) com o título “*Metodologia de Análise de Falhas*”. Nesta metodologia temos o passo a passo de uma análise de falha, desde a primeira abordagem a fratura, como proceder, até a descoberta dos possíveis fatores que levaram falha.

A monografia desenvolvida por Pablo Vinícius Bassani (2009) sob o título de “*Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579*”, onde o trabalho foi desenvolvido em cima do mesmo vaso de pressão usado neste trabalho, porém com a finalidade de comprovar se a falha poderia ser gerada por uma trinca pré-existente.

2.1. Código ASME

Todos os projetos em vasos de pressão devem seguir algum código internacionalmente reconhecido, como a norma inglesa BS-5500, o código alemão A.D. Merkbatter, o código francês SNCTTI e o código ASME, mais conhecido e utilizado.

Antes de ser criado um código que padronizasse o projeto de vasos de pressão, acidentes com equipamentos pressurizados eram comuns e normalmente envolviam consequências de grande porte. O código ASME foi criado pela Associação Americana de Engenheiros Mecânicos e é um texto normativo que abrange não apenas critérios, fórmulas de cálculos e exigências de detalhe de projeto, mas também regras, detalhes e exigências relativas à fabricação, montagem e inspeção de vasos de pressão bem como os materiais a serem empregados. Ele apresenta-se dividido em seções, sendo que a seção VIII, Pressure Vessels, trata de vasos de pressão. Esta seção por sua vez divide-se em três partes. A divisão 1 contém regras para a construção dos vasos, não exigindo uma análise mais detalhada dos esforços atuantes, sua integridade é dada através de grandes coeficiente de segurança nos cálculos. A divisão 2 permite uma melhor análise das tensões atuantes, e permite a construção de vasos com espessuras menores, visto que esta utiliza fatores de segurança mais apropriados. A divisão 3 é utilizada para vasos com pressão muito elevada.

As normas de projeto foram estabelecidas não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo e projeto de vasos de pressão, mas principalmente assegurar as condições mínimas de segurança para a operação.

2.2. Teste Hidrostático

Teste hidrostático é um ensaio aplicado em vasos de pressão e outros equipamentos industriais pressurizados como tanques ou tubulações, com o objetivo de verificar a ocorrência de vazamento ou alguma ruptura. Estes testes são realizados com os equipamentos fora de serviço através da pressurização, utilizando um fluido incompressível, até uma grandeza de 1,3 vezes a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), simulando uma condição mais rigorosa com o objetivo de garantir que no serviço normal não ocorrerá falha ou vazamento. Após meia hora de teste, a pressão é reduzida em 1/3 e verifica-se visualmente se ocorreu algum vazamento. O teste hidrostático é considerado um ensaio não destrutivo exigido pela ASME, e deve ser realizado periodicamente ou sempre que um equipamento for fabricado, reparado ou transportado.

Até o ano de 2004 o teste hidrostático exigido pela ASME usava um valor de 1,5 vezes a PMTA. Após a mudança na norma, o valor usado nos testes é de $1,3 \cdot PMTA$. Devido ao vaso em questão ser projetado antes desta revisão no código, o valor do teste hidrostático será mantido em 1,5 vezes a PMTA.

2.3. Resistência dos Materiais

Deformação elástica e Deformação plástica

Todo material quando submetido a um carregamento externo sofre deformação. Estas deformações acontecem tanto no sentido da carga como no sentido transversal. Após a remoção das cargas, o material voltar a dimensão original ou segue com uma deformação em sua forma. Na figura 3 pode-se ver um gráfico de tensão pela deformação. Se um material sofre uma carga do ponto inicial "O" até o ponto "A", e após a carga ser retirada o material volta as suas dimensões iniciais, este fenômeno é chamado de deformação elástica. Se uma carga for aplicada passando do ponto "A" e chegar, por exemplo, ao ponto "B", quando a carga for retirada o material retornará em uma reta paralela a reta O-A e sofrerá uma deformação permanente, expressa pelo ponto "C". A este fenômeno se dá o nome de deformação plástica ou escoamento. No gráfico ainda é vista a tensão máxima admissível pelo material, que é a parte mais alta da curva e o ponto "D" que é o ponto onde ocorre a ruptura do material.

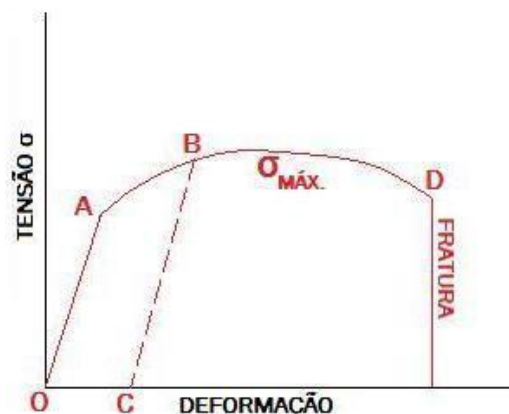


Figura 3: Curva Tensão x deformação

Fratura frágil e Fratura Dúctil

Todos os materiais se rompem quando submetidos a cargas na qual a tensão seja maior que a sua resistência mecânica. O comportamento ao longo desse processo pode classificar os

materiais em dois grupos distintos. Os materiais que fraturam sem ceder são classificados como materiais frágeis, estes apresentam fratura frágil e consomem pouca energia antes da ruptura. Os que cedem antes de fraturar são denominados materiais dúcteis, apresentam fratura dúctil e possuem um grande consumo de energia antes de seu rompimento. Em um gráfico de tensão por deformação como a figura 3, os materiais frágeis romperiam antes de chegar ao ponto “A” e os materiais dúcteis após este ponto, ou seja, materiais frágeis não sofrem escoamento.

2.4. Tensões longitudinais e Tensões circunferenciais

As tensões normais σ_1 e σ_2 mostradas nas figuras 4 e 5 são as tensões principais aplicadas na superfície de um vaso de pressão. A tensão σ_1 é conhecida por tensão circunferencial, e a tensão σ_2 é denominada tensão longitudinal.

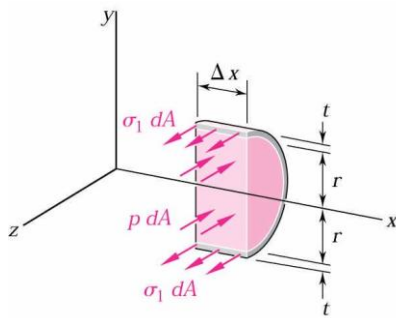


Figura 4: Tensão circunferencial σ_1

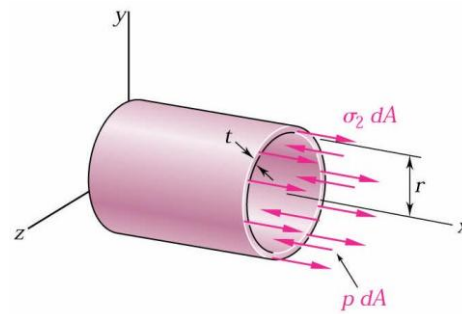


Figura 5: Tensão longitudinal σ_2

Pela figura 4, a resultante das forças internas $\sigma_1 \cdot dA$ é igual ao produto de σ_1 pela área da seção transversal $2 \cdot t \cdot \Delta x$ da parede, enquanto que a resultante das forças de pressão $p \cdot dA$ é igual ao produto de p pela área $2 \cdot r \cdot \Delta x$.

$$\text{Resolvendo para a equação de equilíbrio } \Sigma F_z = 0, \quad \sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t} \quad (2.1)$$

Na figura 5, as forças que atuam sobre o corpo livre consistem nas forças internas $\sigma_2 \cdot dA$, na parede, onde $dA = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot t$, e nas forças de pressão elementares $p \cdot dA$ exercidas na porção de fluido incluída no corpo livre, onde este $dA = \pi \cdot r^2$.

$$\text{Resolvendo para a equação de equilíbrio } \Sigma F_x = 0: \quad \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{2t} \quad (2.2)$$

Conclui-se que a tensão circunferencial σ_1 é o dobro da tensão longitudinal σ_2 .

No estudo de vasos de pressão este conceito é fundamental, pois se deve evitar ao máximo soldas e outros trabalhos no sentido longitudinal.

2.5. Mecânica da Fratura

Quando um equipamento possui algum defeito, este equipamento é reprovável segundo os códigos de projeto, entretanto, dependendo do tipo de defeito e das condições de trabalho deste equipamento, em certos casos, ele pode continuar operando e são nestas situações que aplicamos a mecânica da fratura.

As propriedades dos materiais normalmente especificadas em códigos de projetos são a tensão de escoamento, σ_E , e o limite de resistência do material, σ_R , portanto quando for feita a seleção de material para um dado projeto, é comparado antes estes valores com os valores tabelados destes materiais, de acordo com um critério adequado, a fim de se garantir a integridade do conjunto.

Em 1913 Von Mises desenvolveu um dos critérios de resistência mais utilizados em metais, este critério considera que o material atinge sua resistência limite quando a energia específica de distorção do componente, aquela relacionada com a mudança de forma, atinge um valor crítico. Trabalhando algebricamente as expressões, é possível colocá-las em termos de tensões características. A tensão equivalente de Von Mises para o caso em estudo é a tensão crítica num ensaio de tração simples, que é igual a tensão de escoamento do material, desta forma a equação que permite verificar o comportamento do material é expressa como,

$$\sigma_{máx.}(\text{condições de contorno, geometria}) \leq \sigma_e(\text{material, } \varepsilon, \text{temperatura})$$

Este critério não leva em conta as falhas que acontecem por fratura frágil e desta forma tenta-se corrigir isto com o uso de um elevado coeficiente de segurança. No entanto sabe-se que muitas vezes mesmo com um coeficiente de segurança elevado há um rompimento de componentes ou estruturas devido a defeitos ou trincas com uma carga bem inferior da carga de projeto. Sob o ponto de vista da mecânica este comportamento é caracterizado como frágil e é neste ponto que surge a mecânica da fratura, atuando como uma ferramenta de suporte e aceitação para projetos com alguma falha. A mecânica da fratura é um campo complementar à resistência dos materiais e destina-se a estudos da criticidade de defeitos.

A mecânica da fratura impõe conceitos e equações para determinar se defeitos poderão se propagar de uma maneira catastrófica, ou seja, instável ou se poderão ser controlados e monitorados com uma evolução estável a fim de que não seja preciso realizar a troca deste equipamento com defeito. Dessa forma a mecânica da fratura não faz comparações entre tensões a fim de se verificar a resistência do material e sim, faz uma comparação com base em outros parâmetros.

$$Z_I(\text{geometria, tamanho do defeito, condições de contorno}) \leq Z_{Crítico}(\text{material, } \varepsilon, \text{temperatura})$$

Onde este $Z_{Crítico}$ é a tenacidade à fratura do material, para esforços no sentido de abrir a trinca e Z_I é a intensidade de tensão na ponta da trinca caso esta trinca não existisse.

Métodos para a determinação do parâmetro Z foram gerados por vários estudiosos dentre os quais destacamos os estudos de Griffith (1920) com a introdução do coeficiente G , Irwin (1952) com o coeficiente K , Wells (1961) com o coeficiente COD (δ), muito usado na Europa e Japão e J. Rice (1968) com o coeficiente J muito usado nos Estados Unidos.

2.5.1. Diagrama FAD (Failure Assessment Diagram)

O diagrama FAD é uma ferramenta que nos permite a avaliação de componentes com defeitos a fim de se definir se estes defeitos são aceitáveis ou não. Este método consiste na construção de um gráfico no qual são representados dois parâmetros. O primeiro é o K_R , que mede o risco da fratura através da mecânica da fratura linear elástica e tem sua forma como a razão entre a intensidade de tensões na região de uma descontinuidade e a tenacidade do material. O outro parâmetro é o L_R , que mede o risco de ocorrer um colapso plástico e este é a razão entre a tensão localizada na região da descontinuidade e a tensão de colapso do material.

Na figura 6 é representado um diagrama FAD mais moderno que o original. A curva original deste diagrama iniciava em valores de K_R igual a 1 e termina em L_R igual a 1. Isso se deve ao fato de o antigo diagrama FAD não levar em consideração o encruamento dos materiais.

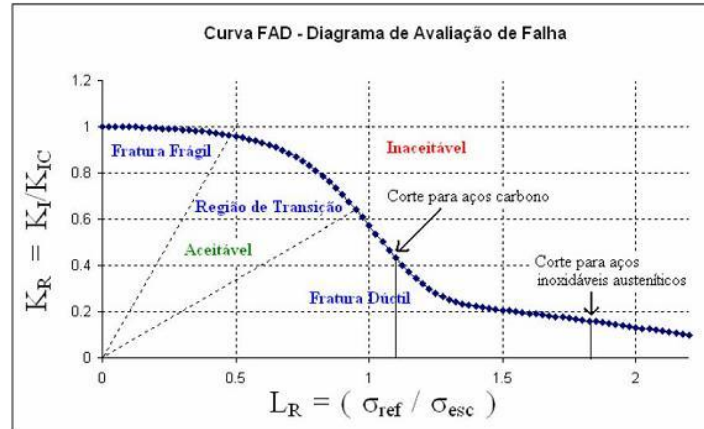


Figura 6: Diagrama FAD (fonte: PEREIRA FILHO 2004)

Os valores de K_R e L_R são coordenadas do diagrama e representam um ponto cuja interpretação possui dois caminhos distintos. Se o ponto estiver abaixo da curva, a falha não é considerada crítica e o equipamento pode seguir operando normalmente. Se o ponto está acima da curva a descontinuidade é considerada crítica. Para determinar o tipo de fratura ou sua segurança é feita uma reta da origem até o ponto. Caso este ponto esteja abaixo da curva, a distância entre a curva e o ponto é considerado a segurança do equipamento, caso esteja fora da curva, o ponto em que a reta cruzar a curva indica o tipo de mecanismo de colapso. Para valores baixos de L_R espera-se uma fratura frágil assim como para valores baixos de K_R é de se esperar uma fratura Dúctil.

3. METODOLOGIA

3.1 Apresentação do Problema

Na indústria usa-se ar comprimido em grande escala, e este deseja-se que esteja em uma faixa de pressão conhecida e normalmente que não tenha uma variação elevada. Para isso se utilizam os compressores, onde estes por sua vez, necessitam de um reservatório normalmente chamado de pulmão de ar. Estes equipamentos possuem um pressostato que liga o compressor assim que a pressão cai para um valor pré-determinado e torna a desligá-lo logo que a pressão desejada é atingida. Como já visto anteriormente, o vaso em questão neste trabalho trata-se justamente de um pulmão de ar, projetado em suas dimensões para suportar certa pressão e carregamentos.

Na parte inferior do casco, o vaso possui um dreno para eventualmente quando nas paredes dos vaso condensar água e por gravidade, esta escoar para o fundo do vaso, se tenha uma maneira de drená-la. Esta drenagem deve ser realizada com frequência pois a água que se forma no fundo do vaso facilita o processo de oxidação e corrosão. Os esforços ao longo do tempo podem vir a provocar descontinuidades significativas, embora o vaso seja pintado por dentro para dificultar esta corrosão.

Outro detalhe importante deste pulmão de ar é o fato de possuir uma solda longitudinal ao longo de sua lateral. O fato desta solda ser na lateral do vaso não foi ao acaso, dado que o local de uma solda é a região mais propícia a iniciação de falhas por ser onde o material sofre alterações microestruturais e se apresentam tensões residuais. Ainda tem o fato de que processos de soldagem estão sujeitos a defeitos como falta de penetração, falta de fusão e outros. Por este motivo a solda longitudinal deste vaso se encontra na sua lateral, pois se estivesse localizada na parte inferior do vaso, poderiam somar-se os efeitos da solda com os da corrosão dando mais chances ao rompimento. Na parte inferior ainda tem a pressão de coluna d'água do teste hidrostático que embora neste caso seja uma carga muito pequena em

relação a pressão interna, é mais um fato a ser observado já que é este o local que o vaso sofreu a fratura.

3.2 A Inspeção

Na inspeção do vaso foi feita uma verificação visual externa, procurando alguma deformação, corrosão ou formação de trincas, depois foi medida a espessura por ultrassom e após isso foi realizado o teste hidrostático. Com a medição de espessura, observou-se que o vaso de pressão estava dentro das dimensões de projeto, com espessuras das paredes variando entre 2.9 mm e 3.2 mm. O dimensionamento do vaso em seu exterior também estava de acordo com o projeto, sendo o vaso um cilindro horizontal de tampos toriesféricos.

Após inspeção externa e verificação de espessura, verificou-se que o vaso estava pronto para o teste hidrostático. É feita então a realização do teste, durante o qual ocorreu a falha do vaso. De acordo com os técnicos que realizaram o teste, o vaso rompeu antes da pressão de 1,91 MPa sem eles notarem qualquer vazamento. Na figura 7 pode-se notar a grande deformação plástica que ocorreu antes da fratura. Após o rompimento foram novamente feitas medições de sua espessura, principalmente na região da fratura, e observou-se uma espessura mínima em torno de 2,4 mm como pode ser observado na figura 8.



Figura 7: Estricção da zona da fratura.



Figura 8: Medição de espessura na região da fratura.

3.3 Levantamento de dados

Na figura 9 podem ser vistos os dados fornecidos pelo fabricante na etiqueta que fica junto ao vaso. Entre as informações, as mais importantes para o presente estudo são a pressão de teste hidrostático (PTH): 19,14 bar (1,914 MPa) e a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA): 12,76 bar (1,276 MPa).



Figura 9: Etiqueta de fabricação do pulmão.

Segundo o fabricante, o material empregado no vaso de pressão é um SA-414 Gr D (semelhante a um aço 1015), material comumente usado para a fabricação destes tipos de equipamento. Na seção II do código ASME a tensão de ruptura (σ_{rup}) para este material que é 415 MPa, a tensão de escoamento (σ_{esc}) é 240 MPa, a tensão de admissível (σ_{adm}) 118 MPa. Se o teste hidrostático é 1.5 vezes a pressão admissível, a tensão usada em seu teste hidrostático é $\sigma_{adm} \cdot 1,5 = 177$ MPa, valor este que estaria abaixo da tensão de escoamento que é de 240 MPa.

4. ANÁLISE DE FALHA

Uma peça ou componente é considerado como tendo falhado quando ocorre uma das três seguintes condições:

- a- Quando fica totalmente inoperante;
- b- Quando ainda opera, mas não consegue mais cumprir sua função satisfatoriamente;
- c- Quando ocorre uma séria deterioração, tornando-o inconfiável ou inseguro para continuar operando, precisando ser removido para reparo ou ser substituído.

Em uma análise de falha é feito um estudo sobre todas as possibilidades deste equipamento ter falhado. Nesta seção será visto que existem muitos fatores que podem levar ao rompimento em um vaso de pressão.

4.1 Temperatura e Região da Solda

Em vasos de pressão submetidos a altas temperaturas pode ocorrer fluência, esta é uma deformação plástica quando o metal fica submetido a cargas constantes e exposto a um ambiente de elevadas temperaturas, acima da metade do ponto de fusão da liga. Se um vaso de pressão estiver em temperaturas muito baixas, isso pode fazer com que o material fique com características de material frágil o que não é desejável para vasos de pressão. Nenhuma das hipóteses de temperatura é aplicada ao vaso em questão sendo que o rompimento foi em um teste hidrostático e mesmo em operação, ele não sofre grandes mudanças de temperatura.

A região da solda é um local propício ao aparecimento de trincas, pois esta região sofre alteração na microestrutura e é um local onde se apresentam tensões residuais, devido a isto, se dá grande importância tanto nos cálculos de projeto como nas inspeções. Como o presente vaso rompeu em uma região sem soldas, podemos concluir que este não é o motivo do rompimento.

4.2 Defeito no material

Corte do Vaso de pressão

Para que pudessem ser feitos todos os testes necessários em uma análise de falha, foi preciso cortar a fratura em seu contorno, figura 10, e ainda, fazer a remoção de uma parte do vaso para serem confeccionados corpos de prova para o ensaio de tração. Os cortes foram feitos a uma distância de 50 mm da fratura para que sua análise não fosse prejudicada.



Figura 10: Peças cortadas do vaso para análise.

Seleção e Preparação de seção para Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica foram retirados dois pedaços do vaso de pequenas dimensões, um no sentido longitudinal e outro no sentido transversal e os dois pedaços foram embutidos em baquelite conforme figura 11. Foi feita uma marcação na parte de traz do baquelite para se ter controle de qual peça era o corte na longitudinal e o na transversal.

Depois de embutidas, as peças precisam ser lixadas, passando por lixas de diferentes numerações, que variam com sua rugosidade, ou seja, quanto maior seu número menos atrito ela gera. As lixas usadas foram, em ordem, a lixa 120, 220, 320, 400, 600, 1200, sendo que para se passar de uma lixa para outra não se deve existir resquícios da lixa anterior. Portanto faz-se o uso da lixa em um sentido e quando se passa de uma lixa para outra gira-se o baquelite em 90°.

Depois de se ter passado por todas as lixas, é necessário fazer o polimento da superfície para eliminar as ranhuras da área a ser analisada, e após isso, é feito um ataque químico com ácido nítrico 2% em álcool etílico para se visualizar a microestrutura em um microscópio.

Por se tratar de um material de baixo carbono, 0,13% conforme será visto a seguir na análise química, pode-se ver a formação de ferrita (parte clara) e perlita (parte escura) nas fotos tiradas pelo microscópio, figura 12. Na foto se percebe também o sentido da laminação da chapa em sua microestrutura.

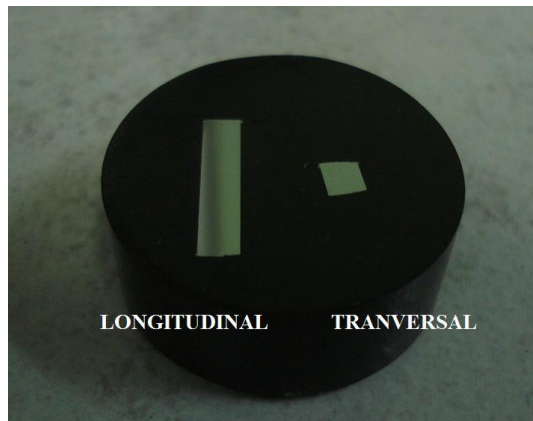


Figura 11: Amostras embutidas em baquelite

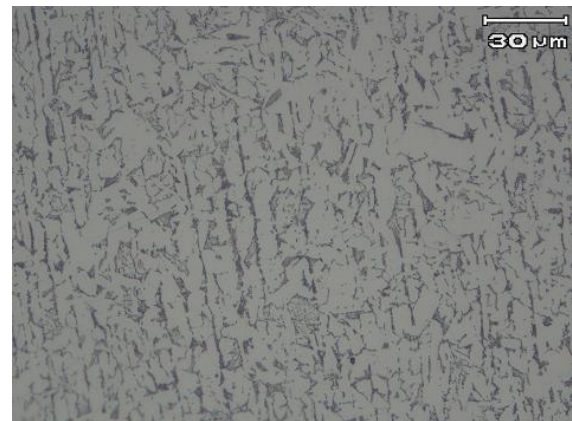


Figura 12: Vista do material no microscópio 500x.

Análise Química:

Faz parte da análise de falhas, a análise química das peças para verificar se o material se enquadra dentro das especificações recomendadas. Para se fazer a análise química da peça não é preciso fazer uma grande preparação como se faz para uma análise em microscópio. Na análise química, apenas se retira um pedaço do material e caso necessário, remove-se a tinta e se faz a limpeza. Na figura 13 pode-se ver o material de onde foram obtidas as amostras submetidas à análise química. A figura 14 contém a percentagem de cada substância química presente no material onde o resultado mais importante é o percentual de carbono (0,13%). Com uma leve diferença entre os resultados obtidos e a composição especificada não deve ser concluído que tal desvio seja responsável pela falha.

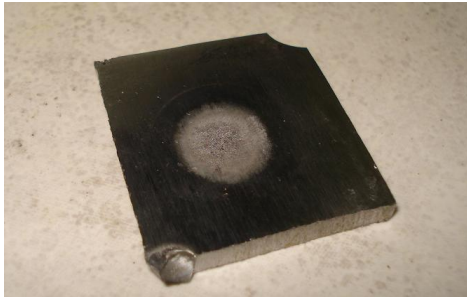


Figura 13: Foto do metal após análise química.

Programa: FE-10						
Comentário: Aço Baixa Liga						
Media (n=3)						
Elementos: Concentração						
Liga:						
	C	Si	Mn	P	S	Cr
	%	%	%	%	%	%
x	0.1340	0.1377	1.115	0.0125	0.0012	<0.0010
	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
	%	%	%	%	%	%
x	<0.0050	<0.0050	0.0411	<0.0100	0.0105	<0.0010
	Ti	V	W	Pb	Sn	B
	%	%	%	%	%	%
x	<0.0010	<0.0010	<0.0100	<0.0020	0.0038	<0.0001
	Fe					
	%					
x	98.54					

Figura 14: Concentração dos elementos na liga do vaso.

Ensaio de dureza:

Para ser obtido o valor da dureza do material, foi realizado o teste de dureza Vickers. Este teste consiste em marcar o material com uma ponta de diamante na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas utilizando uma carga que varia de 1 a 100 kgf. A carga é aplicada de 10 a 15 segundos fazendo com que a peça fique com a aparência, vista no microscópio, da figura 15. Após isso são medidas as diagonais da pirâmide utilizando ainda o microscópio e calcula-se a área da superfície inclinada. A dureza Vickers é o resultado da divisão entre a carga e a área da pirâmide.



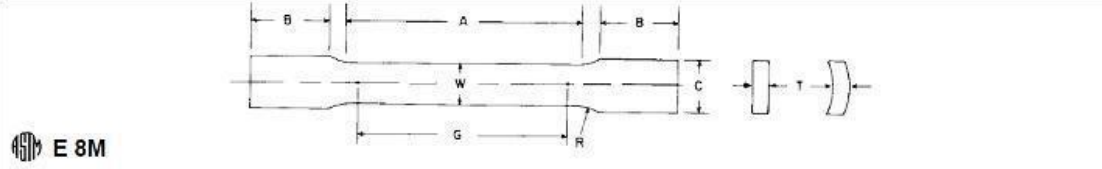
Figura 15: Foto da peça após teste de dureza Vickers (500x).

Foram feitas cinco medidas de dureza nas peças no sentido longitudinal do vaso e cinco medidas de dureza no sentido transversal. Os resultados nos sentidos longitudinais e transversais dos cortes foram muito semelhantes, de onde se conclui que a dureza nos dois sentidos é a mesma. O valor da dureza após uma média dos valores ficou em 185 HV (Vickers).

Ensaio de tração:

O principal objetivo ao se fazer este ensaio de tração é comparar a redução de espessura dos corpos de prova com a redução de espessura do vaso de pressão após o colapso.

Para fazer o ensaio de tração necessitava-se de corpos de prova padronizados. Os corpos de prova escolhidos são do tipo gravata e foram feitos de acordo com a especificação 1 da figura 16, (ASTM E 8M).



Dimensão Nominal	Especificação	Dimensão, mm						
		1	2	3	4	5	6	7
		12.5	40	40	20	20	25	25
G	50.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1	
W	12.5 ± 0.2	40.0 ± 2.0	40.0 ± 2.0	20.0 ± 0.7	20.0 ± 0.7	25.0 ± 1.5	25.0 ± 1.5	
T								
R	12.5	25	25	25	25	25	25	
A	60	60	230	60	120	60	120	
B	75	75	75	75	75	75	75	
C	20	50	50	25	25	40	40	

Figura 16: Formato dos corpos de prova tipo gravata para ensaio de tração.

Os corpos de prova foram confeccionados por uma máquina de corte por eletroerosão, e após isso ensaiados até sua ruptura, figura 17.



Figura 17: Corpos de prova após ensaio de tração.

O ensaio de tração é um teste feito em corpos de prova de dimensões pré-determinadas por uma norma onde é feito o seu tracionamento até a ruptura. Através deste ensaio, vários parâmetros podem ser medidos como poderá ser visto na tabela 1. Nesta tabela podem ser vistos os resultados dos ensaios de tração para os três corpos de prova testados.

Tabela 1: Resultados para o ensaio de tração.

CP	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]	Espessura		Comprimento Inicial lo (mm)	Comprimento Final lf (mm)	Tensão de escoamento (Rp) [MPa]	Resistência a Tração (Rm) [MPa]	Alongamento (A) [%]
				após Rompimento [mm]						
1	12,47	3,16	39,4	2,25		50	62,39	202	525	25%
2	12,48	3,15	39,3	2,27		50	62,14	200	522	24%
3	12,33	3,16	39	2,23		50	63,13	199	527	26%
							Média	200,288	524,959	25%
							Desv. Pad.	1,261	2,605	1%

Além da tabela, o ensaio de tração gera uma curva da Tensão (MPa) x Deslocamento (mm) para cada corpo de prova. O presente gráfico, figura 18, mostra a curva tensão x deslocamento para os três corpos de prova. No gráfico ainda se pode observar os pontos principais como tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura.

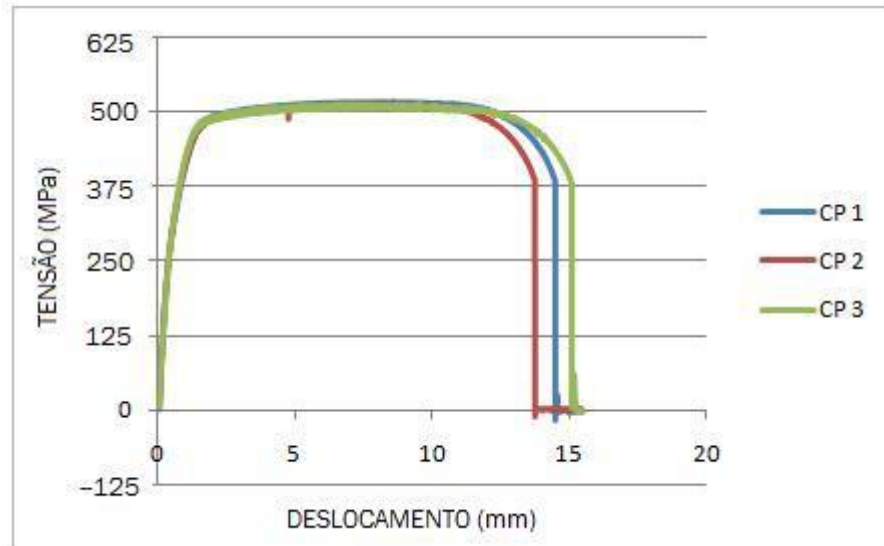


Figura 18: Gráfico Tensão x Deslocamento dos três corpos de prova.

Com os valores das espessuras dos corpos de prova após o ensaio de tração chegamos a resultados muito próximos dos valores das espessuras medidos na região da fratura. Em um ensaio de tração a deformação é mais lenta, portanto se espera que a diminuição da espessura antes do rompimento seja maior do que em um teste hidrostático, onde os valores da pressão se elevam muito rápido devido ao líquido utilizado ser incompressível.

Todos os resultados da análise em relação ao material condizem com os valores ou substâncias esperados de acordo com o projeto. Na verdade uma quantidade muito pequena de falhas resulta de defeitos do material ou da sua utilização em casos inadequados.

4.3 Falha por Corrosão

Como já visto anteriormente, dentro dos pulmões dos compressores de ar há a formação de água devido à condensação do ar. Esta água se deposita nas paredes do vaso e por gravidade desce para o fundo. Para solucionar este problema existem drenos no fundo do vaso para que frequentemente se possa retirar a água. Sabe-se que muitas vezes essa drenagem não é feita com a frequência desejada e devido a isto, será verificado se uma corrosão interna pode ser uma possível causa da ruptura.

Após o rompimento do vaso as menores espessuras de seu casco foram encontradas ao longo da fratura com o valor mínimo de 2.4 mm. Portanto, o cálculo do vaso de pressão será feito como se tivesse em todo o seu casco uma espessura de 2.4 mm e desta forma, caso o vaso não romper, a hipótese de rompimento por perda de espessura devido à corrosão está descartada.

Tampos:

Mesmo não sendo os tampos a região que ocorreu o rompimento, será feito um rápido cálculo da espessura mínima requerida. Os tampos são toriesféricos com $r = 6\%D$ e $L=D$. A equação para espessura mínima requerida é,

$$e = \frac{0,885 PL}{SE - 0,1P} + C \quad (5.1)$$

Onde e é a espessura mínima para pressão interna, P é a pressão interna de projeto, L é o raio da coroa central, que coincide com o diâmetro do cilindro, S é a tensão admissível (no caso foi usada tensão de escoamento, pois se deseja saber a espessura mínima antes do material escoar) e E é o coeficiente de eficiência da solda. C é uma margem para corrosão, erosão ou usinagem. No caso foi usado zero, pois se deseja saber a espessura mínima.

Dessa forma o valor de espessura mínimo nos tampos é de 2,07 mm.

Casco:

No cálculo da espessura mínima para o casco é usado,

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6P} + C \quad (5.2)$$

Com esta fórmula encontra-se um resultado de espessura mínima para o casco de 2,37 mm. Foi usado um coeficiente de eficiência de solda, E , igual a 1 pois no vaso em questão a fratura não aconteceu na região da solda.

Portanto, mesmo com o caso extremo de uma espessura de 2,4 mm em todo o vaso, o colapso não ocorreria.

4.4 Erro de Projeto

Na seção 4.3, para suportar as pressões de trabalho, o vaso deveria ter no mínimo uma espessura de 2,07 mm nos tampos e 2,37 mm no casco. Agora calcula-se através de uma espessura de 2,9 mm, que é a mínima espessura medida antes do rompimento, qual a pressão máxima de trabalho admissível, sua PMTA.

Nos tampos toriesféricos a PMTA é dada pela equação,

$$PMTA = \frac{SEe}{0,885L + 0,1e} \quad (5.3)$$

Encontra-se a partir dela um valor de $PMTA = 1,786$ MPa.

No casco sua PMTA é dada pela equação,

$$PMTA = \frac{SEe}{R + 0,6e} \quad (5.4)$$

Para o casco o valor é, $PMTA = 2,19$ MPa.

Como o vaso possui uma pressão máxima de trabalho admissível igual a 1,28 MPa, o projeto está de acordo, não sendo este o culpado pelo colapso.

4.5 Trincas pré-existent

Este vaso de pressão já foi tema de um trabalho de conclusão feito por Bassani 2009, onde o objetivo do mesmo era verificar se alguma trinca poderia ter causado o rompimento do vaso. Chegou-se a conclusão com os cálculos realizados que defeitos do tipo trinca não são críti-

cos para um equipamento com estas características construtivas e uma trinca necessitaria ser de grande magnitude para causar o colapso do vaso de pressão.

Mesmo assim, serão mostrados através da tabela 2, os valores necessários de tamanhos de trinca para que ocorresse a falha. Foram abordados três tipos básicos de trincas, as semi-elípticas, as infinitas e as passantes.

Tabela 2: Resultados de K_R e L_R para diferentes tipos e tamanhos de trincas. (fonte: BASSANI, P. V. Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579)

	$2*c$ [mm]	a [mm]	σ_{ref} [MPa]	K_t [MPa*m ^{0,5}]	L_R	K_R
Trinca passante	60	Passante	233	89	1,01	0,70
Trincas de comprimento infinito	Infinito	0,75	186	9	0,81	0,07
	Infinito	1,2	232	18	1,01	0,14
	Infinito	1,8	348	41	1,51	0,32
	Infinito	2,4	696	120	3,03	0,94
Trincas semi-elípticas	50	0,75	163	8,9	0,71	0,06
	80	1,2	188	16	0,82	0,12
	120	1,8	240	31	1,04	0,12
	120	2,4	298	53	1,30	0,24
	60	2,4	216	42	0,94	0,33

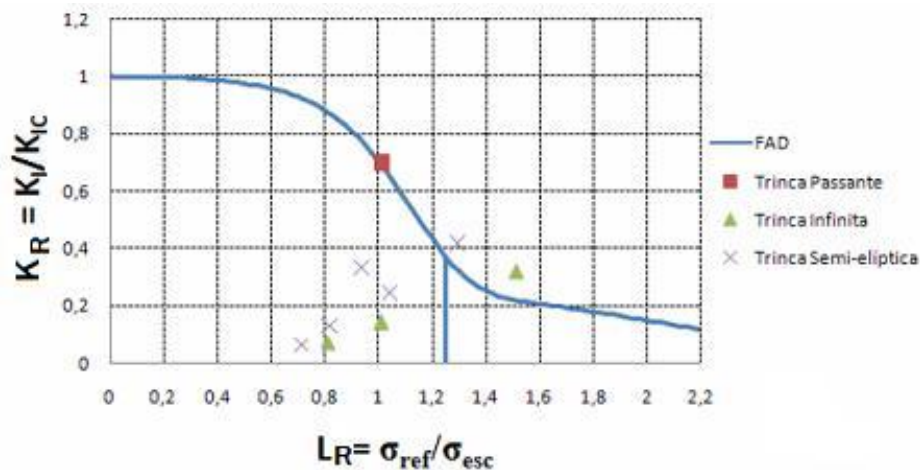


Figura 19: Resultados obtidos plotados no diagrama FAD (fonte: BASSANI, P. V. Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579)

Como se pode observar na figura 19, os pontos encontram-se abaixo da linha do diagrama FAD, os pontos que estão acima da linha são de dimensões que em uma simples inspeção visual poderiam ser percebidos. Se uma trinca dessa magnitude ocorresse durante o teste hidrostático seria detectada pelo vazamento de água.

4.6 Excesso de Pressão

Uma diminuição significativa de espessura na região em torno da trinca é uma indicação clara de que houve uma conformação plástica do material antes da ruptura. Com os resultados obtidos no ensaio de tração, onde a redução de espessura dos corpos de prova chega a 29% e a medição de espessura no vaso após o rompimento, que chega a uma redução de 25%, pode-se concluir que esta conformação plástica ocorreu devido às cargas internas no vaso de pressão ultrapassarem a tensões de escoamento do material.

Este excesso de pressão pode ter ocorrido por descuido dos operadores, por equipamentos mal calibrados, por algum entupimento em conexões que chegavam ao manômetro ou simplesmente o mau funcionamento do manômetro.

5. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do trabalho, buscou-se identificar e estudar os principais mecanismos que levaram ao rompimento do vaso de pressão. Em uma análise de falhas, são feitos os passos descritos neste trabalho com a finalidade de não existir precipitações na determinação do causador do colapso.

Logo no início do trabalho os principais suspeitos para a ruptura do vaso eram a corrosão e o excesso de pressão, pois defeitos no material são raros de acontecer e o projeto deste vaso de pressão não é um projeto isolado, este mesmo equipamento é usado em inúmeros lugares diferentes sob as mesmas condições. Após checarmos as hipóteses verificamos que o provável motivo da falha foi o excesso de pressão imposto no vaso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

BRANCO, C. M. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

POPOV, E. P. **Introdução à Mecânica dos Sólidos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1996.

DONATO, G. V. P. **Avaliação de Integridade Estrutural API 579/ASME FFS-1 Fitness For Service**. Vitória, 2008.

ASME, Section VIII, Division 1. **Boiler & Pressure Vessel**. 2004.

ASME, Section II, Part D. **Material Properties (Metric)**. 2004.

PEREIRA FILHO, J. S. **Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vaso de Pressão**, Dissertação de Mestrado. 2004.

CASSOU, A. C. **Metodologia de Análise de Falhas**, Dissertação de Mestrado. 1999.

BASSANI, P. V. **Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão Utilizando a API 579**.

APÊNDICE

Tabela A1: Formulário: Perda de Espessura conforme API-579.

$FCA = I \cdot \left(ep - \frac{tam}{T} \right)$	(A 1)
$tam = \frac{1}{N} \sum_1^N trd_{,i}$	(A 2)
$S = \sum_1^N (trd_{,i} - tam)^2$	(A 3)
$t_{lim} = máx[0, 2t_{nom}; 2,50mm]$	(A 4)

Tabela A2: Formulário para determinação da Razão de Tenacidade conforme API-579.

$K_I = G_o \left[\frac{pR_o}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$	(A 5)
$G_i = A_o; \varphi = 0^\circ$	(A 6)
$G_i = \sum_{n=0}^6 A_n; \varphi = 90^\circ$	(A 7)
$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}$	(A 8)
$\Phi = \Phi_o \left(1 + \frac{\psi}{\phi} \right); \text{ se: } 0 < L_r^{Sy} \leq 4,0, \text{ então } \Phi_o = 1,0$	(A 9)