

ANÁLISE DE FALHA DA PROPAGAÇÃO DE UMA TRINCA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹²³

Alysson Vieira Lucas, avieira32@yahoo.com.br²

Norberto Martins, norbertoengmec@gmail.com²

Karla Martins, karlacmte@hotmail.com²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30535-901

³Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

Resumo: A Mecânica da Fratura tem como objetivo permitir que se determine de forma precisa as condições de trabalho que um equipamento com uma trinca e sujeito a ação de esforços cíclicos, pode operar sem que ocorra a falha. A profundidade da análise de falha deve ser definida com base nas consequências efetivas ou potenciais de falha. A simulação computacional vem ao longo dos últimos anos sendo usada como ferramenta de trabalho na prevenção e solução de problemas estruturais, de forma a encontrar soluções para que falhas não ocorram. Esta trinca se desenvolveu devido a uma solicitação dinâmica, como na nucleação de trincas de fadiga. Muitos equipamentos podem trabalhar sobre a presença de pequenos defeitos, trincas, desde que as mesmas não se propaguem, minimizando assim o custo de troca do equipamento e parada de produção, quando da certeza do não crescimento desse defeito até uma ruptura catastrófica. Equipamentos de processos como vasos de pressão, podem apresentar descontinuidades em suas estruturas, sendo estas podendo ser originadas durante o processo de fabricação ou não. Além dos cálculos analíticos, engenheiros dispõem de ferramentas numéricas para realizar cálculos durante o projeto, como o método de elementos finitos (MEF), que através de modelamentos, podem-se propor aperfeiçoamentos para o projeto e o produto, analisando pontos críticos e concentradores de tensões. Esta pesquisa tem como finalidade, aplicar o MEF, através do software ABAQUS® e o critério de propagação para uma trinca elíptica interna, desenvolvido por Griffith, considerando o balanço das energias envolvidas, e analisar e propor solução para propagação de uma fissura, que teve origem em um defeito decorrente do processo de fabricação e inerente ao material aplicado em um vaso de pressão. Os resultados das análises evidenciaram pontos críticos de concentração de tensões, que podem ser atribuídos ao processo de fabricação. Propostas e soluções são apresentadas neste trabalho objetivando solucionar a situação.

Palavras-chave: Análise de falha, Mecânica da Fratura, Método de Elementos Finitos (MEF), Trinca

1. INTRODUÇÃO

A acirrada concorrência das indústrias no advento da globalização faz com que haja busca por novas tecnologias para produzir produtos mais competitivos, o que se traduz em equipamentos com maior durabilidade, melhor qualidade e menor custo de produção, com isso, o projeto desses equipamentos, passam a ser uma etapa fundamental dos processos de fabricação. Além da concepção, desenho do produto, o projeto também é responsável pelo dimensionamento adequado do equipamento quanto a sua prestação em serviço, ou seja, mediante aos carregamentos de serviços do equipamento, dimensionar o mesmo para suportar cargas dinâmicas e alternadas.

Muitos equipamentos podem trabalhar sobre a presença de pequenos defeitos, trincas, desde que as mesmas não se propaguem e para a verificação da propagação ou não dessas fissuras, usa-se a Mecânica da Fratura, assim, minimizando o custo de troca de equipamento e parada de produção, quando da certeza do não crescimento desse defeito até uma ruptura catastrófica. Além dos cálculos analíticos, os engenheiros dispõem de ferramentas numéricas para efetuar esses cálculos no momento do projeto, como o método dos elementos finitos. Além de prever falhas, com esse modelo, pode-se propor melhorias, otimizando o produto.

Conforme (Castro e Meggiolaro, 2002), é possível afirmar que o processo de falhas que ocorre em um componente, tem o seu início em um ponto localizado em local onde a solicitação ultrapassou o nível de resistência desse componente.

A aplicação da mecânica da fratura é de fundamental importância para engenharia, nos estudos, dimensionamento e monitoramento de equipamentos projetados para operarem com segurança, dentro de uma faixa específica de trabalho e

que estão sujeitos a carregamentos cíclicos e/ou alternados, tendo como consequência as instabilidades que podem proporcionar o aparecimento de trincas ou alguma descontinuidade, o que leva o equipamento ao colapso.

Os vasos de pressão e trocadores de calor são equipamentos usados principalmente em indústrias de processo, refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias alimentícia e farmacêutica. Estes equipamentos devem ser projetados e fabricados de forma a evitar as suas principais causas de falha, que são: deformação elástica excessiva incluindo instabilidade elástica, deformação plástica excessiva incluindo instabilidade plástica, altas tensões localizadas, fluência a alta temperatura, fratura frágil a baixa temperatura, fadiga e corrosão.

Como consequência de vários acidentes graves, ocorridos principalmente nos Estados Unidos no início do século XX, foram criados grupos de trabalho para definirem critérios seguros de projeto, fabricação e inspeção de vasos de pressão e, desta forma, surgiram os códigos de projeto.

O primeiro código americano, para vasos, foi editado pela ASME (American Society of Mechanical Engineers), em 1925, intitulado “Rules for Construction of Pressure Vessels”, Section VIII, 1925.

Cada código adota critérios e metodologias próprias, sendo que atualmente os mais adotados são os americanos ASME Section VIII, Division 1 e Division 2, o inglês PD 5500 (BS 5500) e a norma européia EN-13445. Existem outros códigos importantes como o ASME Seção VIII Division 3, o alemão AD-Merkblätter e o francês CODAP – Code de Construction des Appareils à Pression, Division 1 et Division 2.

Equipamentos de processo que armazenam fluidos sob altas pressões, podem apresentar descontinuidades em suas estruturas, sendo estas descontinuidades originadas durante o processo de fabricação, ou devido ao uso do equipamento. A possibilidade de causarem falhas por fratura catastrófica em equipamentos de alto risco faz das trincas o tipo de descontinuidade mais preocupante. Sendo, por isso, muitas vezes caracterizadas como defeitos, portanto inadmissíveis por vários códigos de fabricação de vasos de pressão. Mesmo que sua presença não seja admissível em equipamentos novos, as trincas são comumente detectadas em serviço, podendo seu reparo significar grandes prejuízos econômicos devido à parada de produção. Diante dessa situação, há a necessidade de se conhecer e adotar metodologias adequadas que possam avaliar com segurança, e sem conservadorismo excessivo, a criticidade desses defeitos na integridade estrutural dos equipamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mecânica da Fratura

O desenvolvimento dos estudos a respeito da Mecânica da Fratura iniciou-se quando os processos usuais de cálculo estrutural se tornaram insuficientes para explicar falhas de estruturas solicitadas por níveis de tensões bem abaixo dos admissíveis. O modo de falha habitual nestes casos era a propagação instável de uma trinca, sem que tivessem ocorrido apreciáveis deformações plásticas. Assim, a energia que era absorvida no processo de fratura era pequena. O principal ponto de estudo da Mecânica da Fratura é o comportamento do material quando contém uma fissura, ou seja, uma trinca. O processo de ruptura do material ocorre pelo crescimento de uma fissura. Essa fissura pode ser um defeito inerente ao material, decorrente do processo de fabricação, como trincas de tratamento térmico, defeitos de soldagem, falhas internas em componentes fundidos, entre outras. Em outros casos a fissura pode se desenvolver devido a uma solicitação dinâmica, como na nucleação de trincas de fadiga. Fadiga é o tipo de falha mecânica que é caracterizada pela geração e/ou pela propagação paulatina de uma trinca, causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis no tempo.

A Mecânica da Fratura se divide em Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP), sendo que a (MFLE) é utilizada em uma abordagem quando a anomalia acontece em situações em que os materiais possuem alta dureza e grande resistência mecânica e que predomina o comportamento tipo frágil, ou seja, possuem um comportamento predominantemente elástico ou a fase inelástica é muito localizada ou desprezível. Mas quando a trinca existente em uma peça e/ou equipamento estiver sob Estado de Plano de Tensões, ou em situações onde se considera a plasticidade do material, o estudo do problema é qualificado e quantificado pela (MFEP).

A trinca é gerada pela gama das deformações $\Delta\epsilon$ ou das tensões $\Delta\sigma$ atuantes no ponto crítico da peça, mas a propagação da trinca em geral é perpendicular à máxima tensão normal trativa e é controlada por ΔK a gama do fator de intensidade de tensões, que descreve a magnitude do campo de tensões em torno da trinca (Castro & Meggiolaro, 2002).

Fadiga é uma causa comum de falha causada pelo carregamento repetitivo em geral uma ou mais trincas começam no material e estas crescem até que a falha completa ocorra (Dowling, 1999).

O uso cada vez mais generalizado da Mecânica da Fratura se deve ao fato de que essa permite quantificar de uma forma precisa os níveis admissíveis em que um componente com trincas pode operar sem que ocorra a falha. Esse aspecto é extremamente importante em peças de elevado custo de fabricação que estão sujeitas à ocorrência de defeitos, como por exemplo, grandes rotores fundidos ou soldados, reservatórios soldados e oleodutos. Devido aos processos de fabricação utilizados normalmente, é quase impossível assegurar que não ocorram defeitos internos no material.

2.2. Concentradores de Tensões

A presença de defeitos ou trincas microscópicas presente na maioria dos materiais são fatores adversos para resistência à fratura, principalmente em materiais com características frágeis onde a força necessária para levá-lo a fratura se torna menor que a força necessária para quebrar as suas ligações atômicas, visto que para uma trinca se propague, a tensão aplicada tem que ser maior do que a força de coesão do material. Por isto o início da falha nos materiais fica localizado em regiões em que o nível de sollicitação ultrapassa o nível de resistência, sendo que uma tensão aplicada nesta região tem a sua intensidade aumentada ou concentrada na extremidade da trinca. A Fig. (1) mostra a variação da magnitude da tensão atuante à medida que ela se desloca para a extremidade da trinca e a esses pontos onde a intensidade da tensão tem o seu valor aumentado, nós chamamos de concentradores de tensões (Callister, 2008).

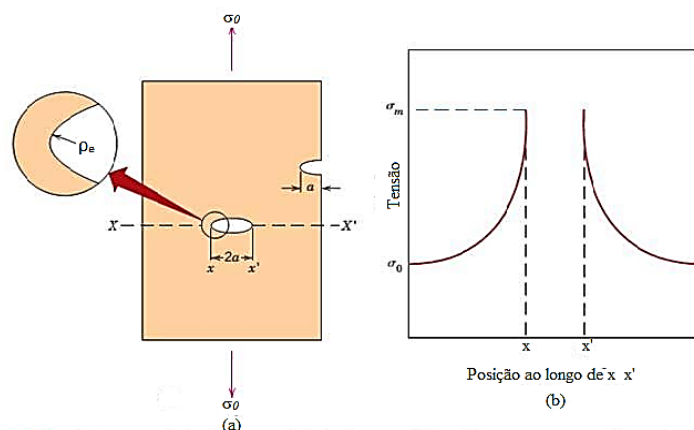


Figura 1. (a) Geometria das trincas. (b) Demonstração da magnitude das tensões nas extremidades das trincas Callister (2008).

Nestes pontos as tensões localizadas podem ser maiores que as tensões nominais dimensionadas, quando são usadas as expressões habituais como força sobre área ou momento fletor sobre módulo de rigidez. Por isso é necessário ter condições de avaliar o estado de tensões nesses pontos e usar de forma correta os dados pertinentes.

Quando a geometria de uma trinca é considerada como um furo elíptico passante em uma placa e sua posição é perpendicular à tensão aplicada conforme demonstrado na Fig. (2), de forma analítica a tensão máxima na extremidade da trinca, pode ser calculada pela Eq. (1), onde (σ_m) é a tensão máxima, (a) metade da trinca, e quando há discrepância entre o comprimento da trinca e o tamanho do raio na extremidade da trinca, (ρ_e) é o raio de curvatura da extremidade da trinca e se o valor da tensão máxima (σ_m) ficar maior que o valor da tensão nominal de tração (σ_0), se fará necessário determinar um fator de Concentrador de Tensão (K_t) que pode ser quantificado pela Eq. (2), respectivamente demonstradas abaixo, onde (K_t) é definido pela razão entre a máxima tensão que atua numa dada seção (entalhada) (σ_m) e a tensão nominal σ_0 que atuaria naquela seção se o entalhe nela não causasse qualquer efeito.

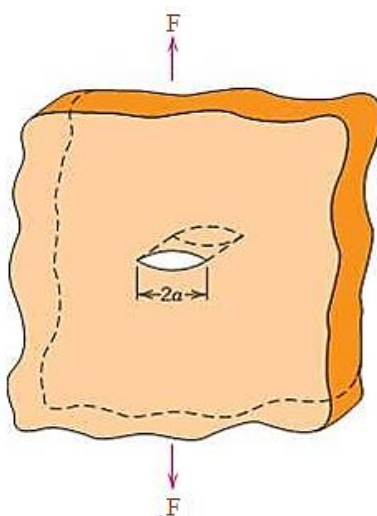


Figura 2. Representação esquemática de uma trinca interna passante em uma placa infinita Callister (2008).

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_e} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \quad (2)$$

2.3. Propagação da Trinca e Tenacidade da Fratura

Estudos comprovam que equipamentos que trabalham sob condições de carregamentos cíclicos, podem ter sua confiabilidade comprometida em consequência de uma falha precoce a partir de um defeito interno no material proveniente do processo de fabricação, e uma das principais causas que podem levar a um tipo de falha é o desenvolvimento e crescimento de uma trinca por fadiga. Situações como estas levantam questões de como e em quanto tempo a presença de uma trinca e sua propagação, estará no limite de ruptura e que não levará o equipamento ao colapso.

Conforme Askeland (2009), os defeitos inerentes aos processos de fabricação também definidos como descontinuidades, referem-se às imperfeições como micro trincas, inclusões e pequenos poros presentes nos materiais de construção mecânica. Os mesmos não são empecilhos para a fabricação de peças e/ou equipamentos, mas quando estão sob efeitos de cargas alternadas e dinâmicas essas imperfeições se propagam dando origem as trincas que limitam as tensões máximas que os materiais podem ser submetidos. Com isto, o desenvolvimento dos princípios da mecânica de fratura analisando um componente mecânico com a presença de uma trinca e submetido a esforço de tração, possibilitou a formulação de uma expressão matemática, que relaciona a tensão máxima que pode ser aplicada em um material, antes que ocorra a propagação da trinca até um tamanho crítico que leve à fratura, onde (a) é o tamanho ou metade da trinca, (f) é o parâmetro geométrico que depende da localização da trinca em relação a superfície da amostra plana, (σ) é a tensão trativa aplicada e (K_c) é a **tenacidade à fratura**, que é uma propriedade que quantifica a resistência do material em uma fratura tipo frágil, que possui uma trinca. A Eq. (3) mostra como a expressão analítica de (K_c) varia com a geometria da trinca e a espessura da amostra, pois o valor de $f=1,0$ quando a trinca atravessa toda espessura de uma placa com largura infinita e $f=1,12$ quando a trinca está localizada na superfície de um componente.

$$K_c = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

O valor de K_c , também pode ser analisado sob condição de deformação plana, ou seja, onde não existem componentes de deformações nas direções perpendiculares às faces posterior e anterior das amostras. Se a espessura da amostra for muito maior que as dimensões da trinca, K_c fica independente da espessura, porem ficará dependente da espessura se as amostras forem relativamente finas. Para as **deformações planas** onde o modo de deslocamento da superfície de uma trinca é semelhante ao modo I ilustrado na Fig. (3), K_c passa a ter o valor de K_{Ic} , conhecido como o fator de **tenacidade à fratura em deformação plana**, cujo os valores são grandes para materiais dúcteis e baixos para os materiais frágeis, onde o escoamento e a redistribuição de tensões não ocorrem de forma apreciável durante a abertura de uma trinca. Estes modos de deslocamentos da trinca são os modos básicos de forma, que representam uma situação geral de carregamento sobre um corpo trincado, e que sempre pode ser decomposta nestes três modos. Para os casos usuais, podemos dizer que o modo I de solitação é o mais perigoso, pois pode excitar o mecanismo de ruptura por clivagem, logo levando a ruptura frágil, com pequena absorção de energia no processo de fratura. (Castro e Meggiolaro, 2002).

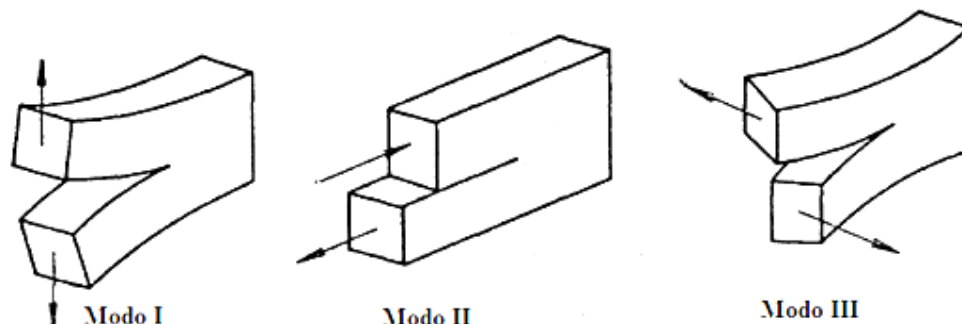


Figura 3. Modos de abertura da superfície de uma trinca Callister (2008).

2.4. Griffith e a Fratura Frágil

Durante a propagação de uma fissura, existe a liberação do que é conhecido por energia de deformação elástica, ou seja, uma parte da energia que é armazenada no material à medida que ele é deformado elasticamente. Ainda durante estes processos são criadas nas faces da trinca, novas superfícies livres que por sua vez, concorrem para o aumento na energia de superfície do sistema. Griffith desenvolveu um critério de propagação para uma trinca elíptica interna considerando o balanço das energias envolvidas, demonstrando que a tensão crítica σ_c , exigida para a propagação da trinca em um material frágil é descrita pela Eq. (4).

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{2E\gamma_s}}{\pi a} \quad (4)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do material;

γ_s a energia de superfície específica;

a é metade do comprimento de uma trinca.

É importante observar que esta expressão não envolve o raio da extremidade da trinca (ρ_e), como acontece com a equação para a concentração de tensões. Contudo, supõe-se que o raio seja suficientemente pequeno (com dimensões da ordem do espaçamento Inter atômico) para aumentar a tensão local na extremidade acima da resistência à tração do material. O desenvolvimento anterior se aplica somente a materiais completamente frágeis, para os quais não existe qualquer deformação plástica. É fato que a maioria dos metais e muitos polímeros experimentam alguma deformação plástica durante a fratura e, desta forma, a extensão da trinca envolve mais do que somente um aumento na energia superficial. Tal fato pode ser verificado por meio da substituição de γ_s na Eq. (5), por $\gamma_s + \gamma_p$, onde γ_p representa a energia de deformação plástica associada à extensão da trinca:

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{2E(\gamma_s + \gamma_p)}}{\pi a} \quad (5)$$

Para materiais altamente dúcteis, a energia de deformação plástica é muito maior do que a energia de superfície ($\gamma_p \gg \gamma_s$), de tal forma que a Eq. (5) pode ser reescrita como:

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{2E\gamma_p}}{\pi a} \quad (6)$$

Na década de 1950, G. R. Irwin concentrou γ_s e γ_p em um único termo G_c , que pode ser visto na Eq. (7) denominado por taxa crítica de liberação de energia de deformação, que é característica do próprio material, dependente da temperatura, velocidade de carregamento, estado de tensões e modo de carregamento:

$$G_c = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (7)$$

Incorporando-se o valor de G_c na Eq. (7) após um rearranjo algébrico, chega-se a uma outra expressão Eq. (8), para o critério de trinca devido a Griffith.

$$G_c = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (8)$$

A trinca então se propagará quando os valores de σ , E e a, aplicados no lado direito da Eq. (8), resultem num valor superior a G_c do material considerado.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem por finalidade estudar e quantificar a ocorrência da falha devido a uma trinca que se propagou em um cilindro de oxigênio durante o reabastecimento. A trinca que gerou a falha no equipamento foi proveniente do processo de conformação, durante o embutimento, demonstrado na Fig. (4). Esta trinca se desenvolveu devido a uma sollicitação dinâmica, como na nucleação de trincas por fadiga.

Para tanto, foi executado um cálculo analítico da peça onde ocorreu falha e por fim uma análise por elementos finitos do projeto antes da ocorrência da trinca e após, para a verificação da propagação da mesma. A análise analítica teve como base, o critério de propagação para uma trinca elíptica interna, desenvolvido por Griffith, considerando o balanço das energias envolvidas (Rosa, 2002).

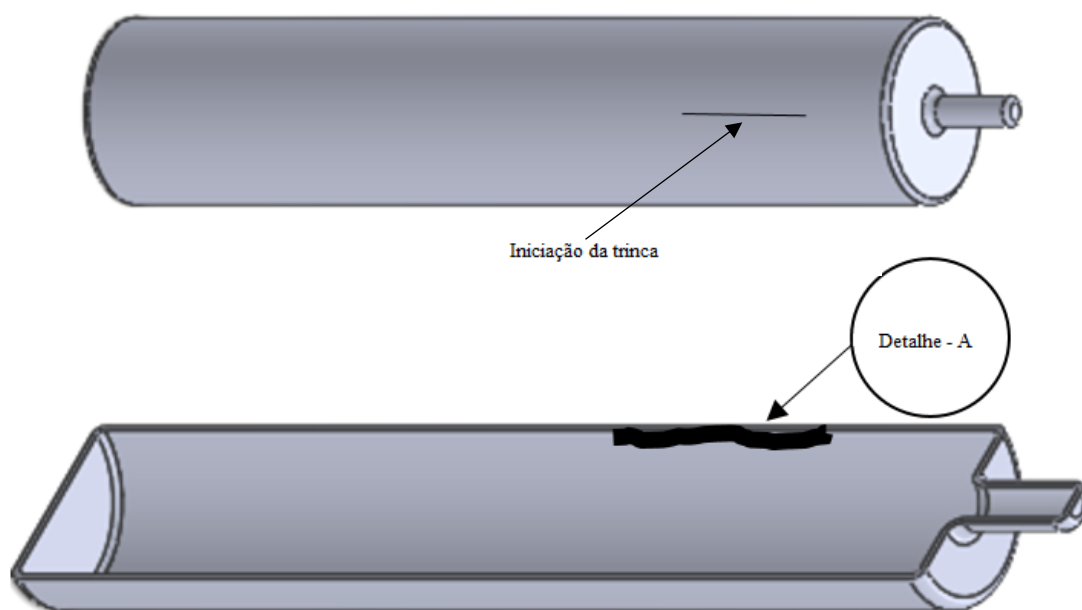


Figura 4. Vista total e parcial do cilindro de oxigênio desenvolvida pelos próprios autores (2017).

3.1. Cálculo da trinca pelo método analítico

Os ensaios não destrutivos são utilizados, principalmente, quando é necessário analisar e quantificar um defeito interno mantendo a integridade física do equipamento. Nesta pesquisa foram utilizados os Raios-X no dimensionamento da trinca longitudinal que se propagou durante o reabastecimento do cilindro contendo oxigênio. A configuração esquemática da trinca está ilustrada na Fig. (5) que é uma ampliação do detalhe A representado na Fig. (4). Sendo assim, a proposta deste estudo tem como objetivo verificar o efeito que a trinca gerou no produto por meio de método analítico aplicando equações da literatura, e análise pelo método de elementos finitos.

As dimensões do cilindro têm um diâmetro médio $D_m = 221,46$ mm, espessura $t = 7,14$ mm, e o material usado na fabricação foi o aço carbono SAE 1541 com alto teor de manganês, temperado e revenido, possuindo tensão de escoamento $\sigma_E = 517$ MPa, tensão de ruptura $\sigma_R = 687$ Mpa e tenacidade a fratura $K_C = 209$ Mpa. Sendo que a pressão de recarga que levou o equipamento a fratura foi de $p = 17,00$ MPa (170 bar).

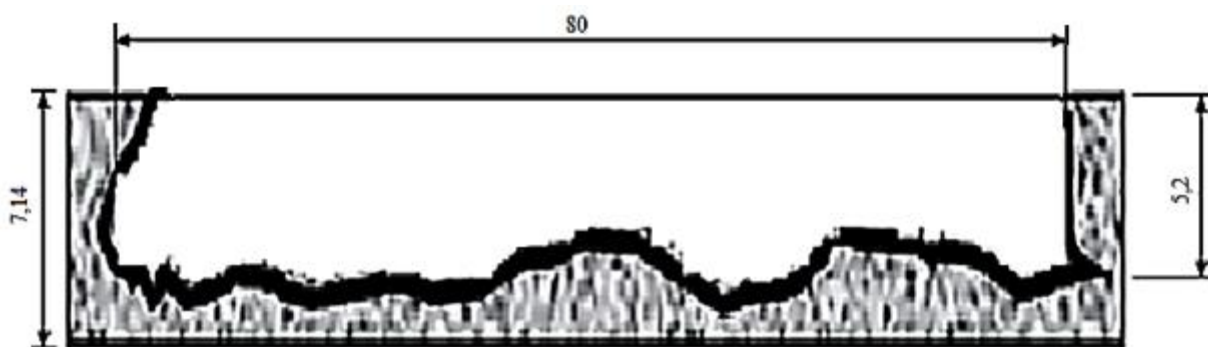


Figura 5. Dimensões da trinca longitudinal do detalhe - A

Através da Eq. (9) é possível quantificar a tensão nominal que levou o equipamento ao colapso visto que esta expressão matemática é utilizada para dimensionar uma trinca que se propaga no sentido longitudinal em vasos cilíndricos pressurizados.

$$\sigma_t = \left(\frac{p \cdot D_m}{2 \cdot t} \right) = \left(\frac{17,00 \cdot 221,46}{2 \cdot 7,14} \right) = 263,64 \text{ MPa} \quad (9)$$

Quando as trincas se propagam de forma longitudinal em equipamentos cilíndricos sob pressão interna, o parâmetro geométrico, que é característica do material é dimensionado pelas Eq. (10) e (11) respectivamente, por possuir o fator de simetria (R) do ciclo.

$$\frac{a^2}{Rt} = \frac{40^2}{110,73 \cdot 7,14} = 2,0237 \quad (10)$$

$$Y = \left(1 + 1,255 \frac{a^2}{Rt} - 0,0135 \frac{a^4}{R^2 t^2}\right)^{1/2} = (1 + 1,255 \cdot 2,0237 - 0,0135 \cdot 2 \cdot 2,0237)^{1/2} = 1,866 \quad (11)$$

Utilizando os fundamentos da mecânica da fratura elastoplástica e aplicando a Eq. (12), é possível quantificar a tensão que levou o equipamento ao colapso, visto que a propagação da trinca ocorreu ao longo da espessura da parede cuja dimensão de 1,94 mm rompeu-se durante o abastecimento provocando o vazamento do fluido.

$$\sigma_{cr} = \frac{2\sigma_E}{\pi} \arccos \exp \left[-\frac{\pi}{8a} \left(\frac{K_c}{Y\sigma_E} \right)^2 \right] = 329.0,894 = 294,409 \text{ MPa} \quad (12)$$

A partir dos dados quantificados pelas expressões matemáticas acima demonstradas, pode-se concluir que a tensão $\sigma_t = 263,64 \text{ MPa}$ gera a iniciação da trinca e a tensão crítica $\sigma_{cr} = 294,409 \text{ MPa}$ propaga a trinca até a ruptura do equipamento.

3.2. Cálculo da trinca pelo método numérico

Para análise do protótipo foi utilizado um modelo numérico pelo Método de Elementos Finitos através do software comercial ABAQUS®, com formulação implícita. O modelo foi construído em sua maioria com elementos hexaedros, conforme Fig. (6), considerando a espessura de 7,14 mm do cilindro.

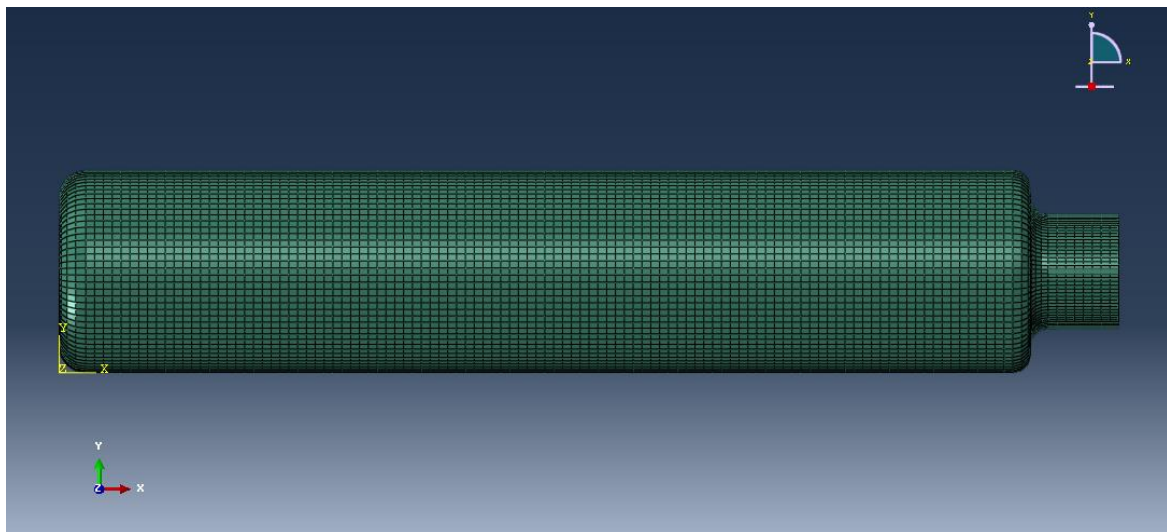


Figura 6. Modelo do cilindro formado por 83797 nós e 71780 elementos em sua maioria hexaedros.

A Fig. (7) mostra o modelo com detalhe da trinca em elementos finitos, onde a metodologia foi executada para exemplificar a possibilidade da ferramenta de elementos finitos prever a falha do componente ainda na fase de projeto.

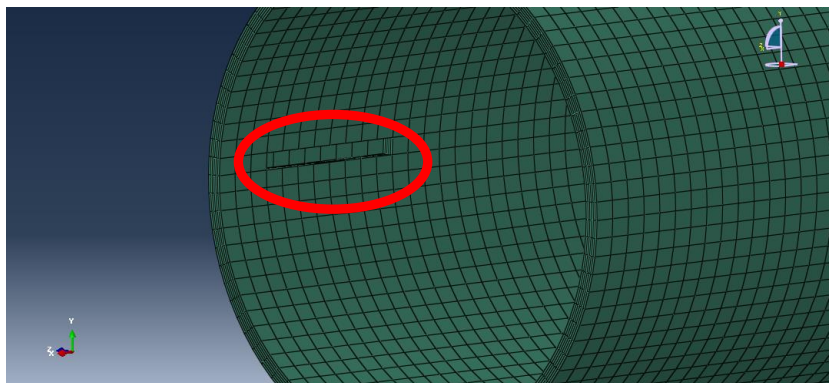


Figura 7. Modelo em elementos finitos com detalhe da trinca

A análise consistiu em aplicar uma pressão de 17,00 MPa (170 bar), uniforme no interior do cilindro e assim, verificar o valor de tensão encontrado.

A Fig. (8) ilustra a distribuição da aplicação das forças internas resultantes da pressão acumulada.

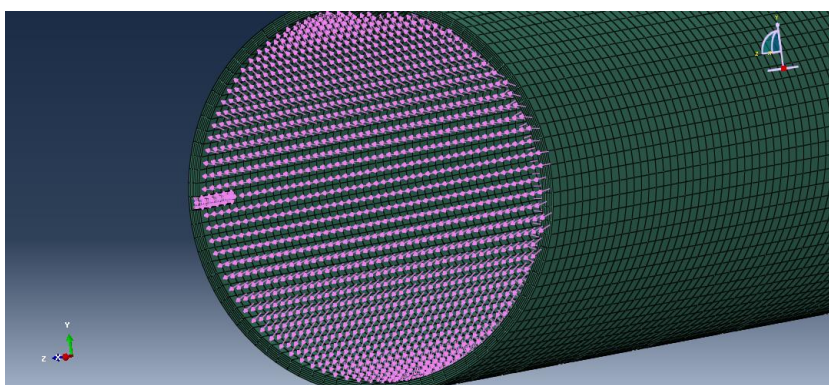


Figura 8. Representação da pressão interna aplicada de 17 MPa

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma análise inicial foi feito outro modelo em elementos finitos, sem considerar a presença da trinca e como se pode observar na Fig. (9), o valor de tensão atingida pelo cilindro foi de 248 MPa, abaixo do valor calculado de 263,64 MPa para início da trinca e de 294,64 MPa, para a propagação da mesma, indicando que não ocorrerá falha do componente no modelo virtual do cilindro sem a trinca.

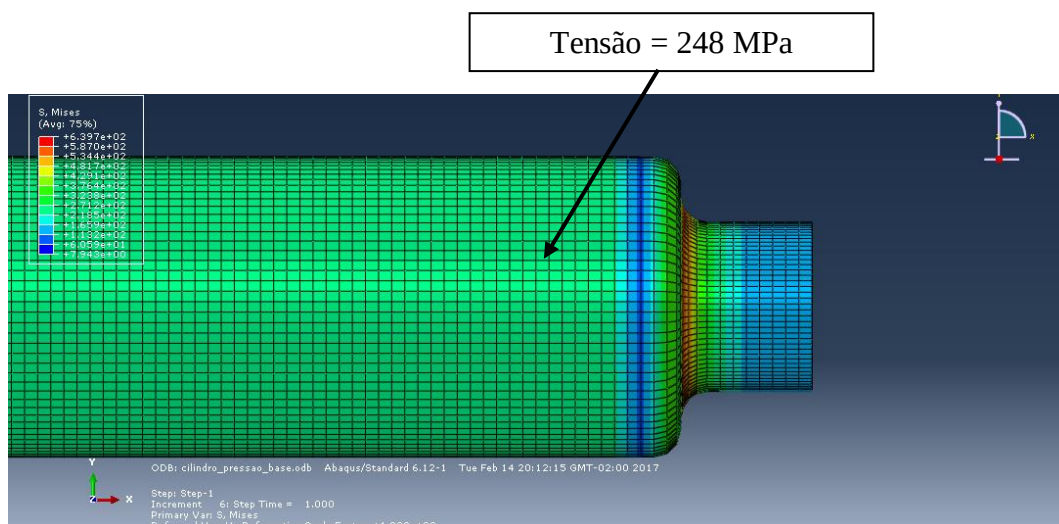


Figura 9. Resultado de tensão no cilindro sem a presença da trinca

A Fig. (10) apresenta o resultado do modelo em elementos finitos, considerando a trinca, onde se pode verificar um aumento considerável da tensão no local da mesma, atingindo 1074 MPa, muito acima dos valores de 263,64 MPa para início da trinca e de 294,64 MPa, para a propagação da mesma indicando que o equipamento irá entrar em colapso.

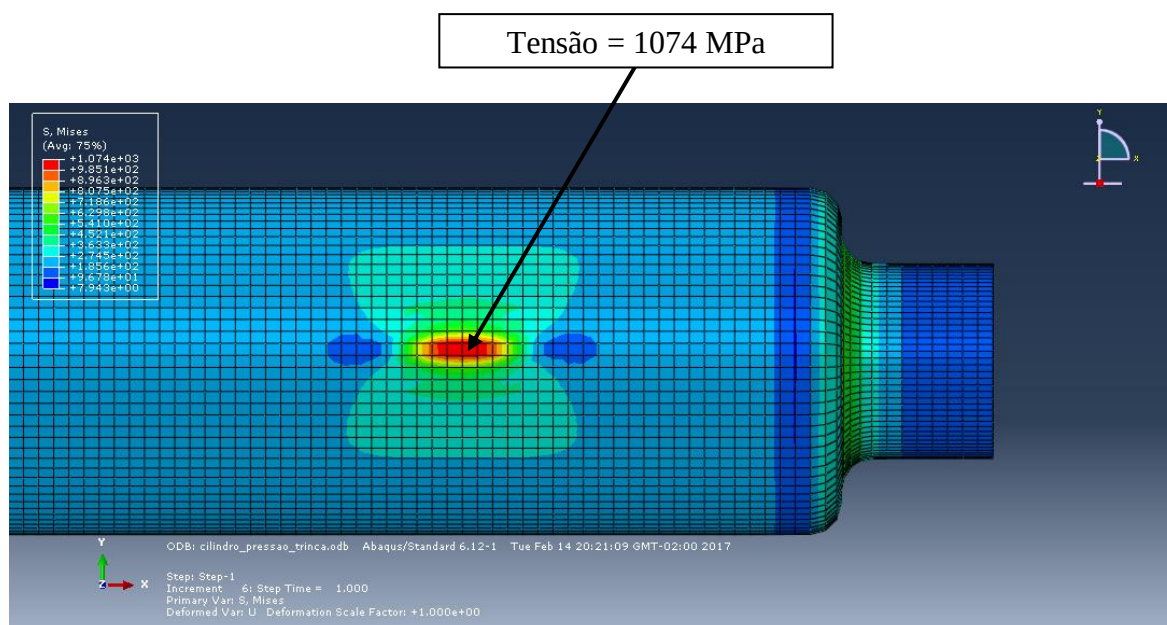


Figura 10. Resultado da simulação da tensão máxima da propagação da trinca

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho mostrou o tratamento adotado na investigação e diagnóstico para quantificar a propagação de uma trinca em um vaso de pressão e, através de um modelamento numérico por elementos finitos, propôs melhorias preventivas que possam aumentar a confiabilidade do equipamento, maximizando a produtividade em paralelo com a segurança humana.

É de suma importância a execução de um projeto de forma correta, principalmente utilizando técnicas de análises virtuais, pois, com essas ferramentas é possível dimensionar de forma adequada os produtos a serem utilizados. Esse correto dimensionamento pode ser tanto para evitar problemas futuros na aplicação, quanto para aperfeiçoar um produto, em função de este produto poder estar superdimensionado e de forma simplificada, ele pode ser modificado virtualmente e refeito os testes, até se atingir uma forma que atenda aos requisitos de projeto, mas com um custo de fabricação mínimo.

Contudo, conclui-se que o método dos elementos finitos mostrou-se eficaz para aperfeiçoar e validar o projeto para aplicação experimental.

6. REFERÊNCIAS

- ABAQUS, 2011, “CAE Standard user manual”, Version 6.10, Hibbitt, Karlsson & Sorensen
- Askeland, D.R. and Wright, W.J., 2009, Ciência e engenharia dos materiais, 2. ed., Cengage Learning, São Paulo.
- ASME, The American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1 – Rules for Construction of Pressure Vessels
- ASME, The American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 – Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules
- ASME, The American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 3 – Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules for High Pressure Vessels.
- Callister, W.D., 2008, Ciências e Engenharia de Materiais: uma introdução, LTC - Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.
- Castro, J.T.P. and Meggiolaro, M.A., 2009, Fadiga - técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviços, Vol. II, Propagação de trincas, efeitos térmico e estocásticos, Createspace Books, 578p.
- Dowling, N.E., 1999, “Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue”, 3.ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- NR 13, Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Rosa, E., 2002, Análise de resistência mecânica: mecânica da fratura e fadiga, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Mecânica.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FAILURE ANALYSIS OF A CRACK PROPAGATION THROUGH FINITE ELEMENTS METHOD

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹²³

Alysson Vieira Lucas, avieira32@yahoo.com.br²

Norberto Martins, norbertoengmec@gmail.com²

Karla Martins, karlacmte@hotmail.com²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30535-901

³Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

Abstract: *Fracture Mechanics aims to allow the precise determination of the working conditions that a machine with a crack and subjected to cyclic stresses can operate without failure. The depth of the fault analysis should be defined based on the actual or potential consequences of failure. The computational simulation has been used over the last years as a tool to work in the prevention and solution of structural problems, in order to find solutions so that failures do not occur. This crack has developed due to a dynamic request, as in the nucleation of fatigue cracks. Many equipments can work on the presence of small defects, cracks, as long as they do not propagate, thus minimizing the cost of equipment exchange and production stoppage, when certainty of non-growth of this defect until a catastrophic rupture. Process equipment such as pressure vessels may present discontinuities in their structures, which may originate during the manufacturing process or not. In addition to the analytical calculations, engineers have numerical tools to perform calculations during the design, such as the finite element method (FEM), which through modeling, improvements can be made to the design and product, analyzing critical points and stresses concentrators. This research aims to apply the FEM, through the software ABAQUS® and the propagation criterion for an internal elliptic crack, developed by Griffith, considering the balance of the energies involved, and to analyze and propose solution for propagation of a crack, which had originated from an inherent defect due to the manufacturing process of the material applied in a pressure vessel. The results of the analyzes showed critical points of stress concentration, which can be attributed to the manufacturing process. Proposals and solutions are presented in this paper aiming to solve the situation.*

Keywords: *Failure Analysis, Fracture Mechanics, Finite Element Method (FEM), Crack*