

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE UM FUSÍVEL MECÂNICO UTILIZADO EM LAMINADORES DE AÇO

por

Vinícius Augusto Crema de Vasconcelos

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.

Porto Alegre, junho de 2016

ANÁLISE DE UM FUSÍVEL MECÂNICO UTILIZADO EM LAMINADORES DE AÇO

por

Vinícius Augusto Crema de Vasconcelos

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

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Intensidade: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Porto Alegre, junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sueli e Edmilson e à minha irmã Bárbara, o meu agradecimento. Apoio e pedra fundamental para a minha formação.

Ao Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler, pela didática e paciência durante as inúmeras reuniões para discutir sobre essa monografia e pelo conhecimento a mim compartilhado.

Aos Eng. Mano, Ferreira, Weiler, Rossi, Taparello e Gasko. Suporte e viabilização desse trabalho.

Ao projetista Santos, pela experiência de toda uma carreira pacientemente dividida, eu o agradeço.

À amizade; essa que multiplica as alegrias e divide as tristezas.

VASCONCELOS, V. A. C. **Análise de um Fusível Mecânico Utilizado em Laminadores de Aço.** 2016. 12. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Fusíveis mecânicos são elementos de sacrifício utilizados como dispositivos de segurança em prol da integridade dos demais componentes de um sistema mecânico. A principal função desses elementos é evitar a quebra dos cilindros de laminação quando submetidos a esforços acima do limite admissível de tensão do material dos quais esses são fabricados. A sobrecarga espontânea durante o processo fabril é a principal razão para aplicar estes elementos de sacrifício em laminadores. O presente trabalho investiga o comportamento dos fusíveis mecânicos sob esforços em estruturas laminadores de aço e analisando suas características geométricas segundo a teoria da mecânica da fratura. Análises analíticas e numéricas foram realizadas nesse estudo tanto com geometrias simplificadas quanto com geometrias reais comumente aplicadas em fusíveis mecânicos, segundo situações operacionais de laminação. Por fim, os resultados numéricos e analíticos são discutidos segundo o problema abordado.

PALAVRAS-CHAVE: fusível mecânico, mecânica da fratura, análise analítica, análise numérica.

VASCONCELOS, V. A. C. **Steel Rolling Mills Notched Mechanical Fuse Analysis.** 2016. 12. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Safety mechanical elements are designed to collapse after a certain amount of force due mechanical load from machinery operation on its assuredness behalf. The main function of a notched mechanical fuse is to protect the cylinders machining of the roll process and all the other mechanical parts before a maximum tension is applied. This work aims to investigate the behavior of those elements applied on steel rolling mills and analyze its geometrical characteristics supported by the linear elastic fracture mechanics theory. Analytical analysis and also numerical approaches were developed in the study under simplified and also realistic geometries normally used for safety notched mechanical fuses. Furthermore, the numerical and analytical results are discussed.

KEYWORDS: mechanical fuse, fracture mechanics, analytical analysis, numerical analysis.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Laminação	2
2.1.1 O fusível mecânico.....	3
2.1.2 Avaliação dos esforços sobre o fusível.....	4
2.1.3 Cargas do processo de laminação	4
2.2 Concentradores de Tensão	6
2.2.1 Fator de concentração de tensão K_t	7
3. METODOLOGIA E RESULTADOS	8
3.1 Definição da condição crítica e força que leva a ruptura.....	8
3.2 Análise analítica – Fator de Concentração de Tensões	8
3.3 Análise numérica	9
4. CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
APÊNDICE I.....	13

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos processos de fabricação existentes, a conformação por laminação é responsável ao ano por, aproximadamente, 20 milhões de toneladas de aço ao setor siderúrgico nacional [Instituto Aço Brasil, 2016]. Produto destinado para os mais variados setores da economia, a citar, construção civil, setor automotivo, agrícola e petróleo e gás.

A laminação é designada como sendo a técnica de moldagem do metal a partir de um sólido, segundo definido pela norma DIN 8580. O principal objetivo deste processo é dar forma geométrica às barras de aço, modificar a estrutura da rede cristalina do metal e caldear inclusões no retículo metálico na direção em que o produto acabado será submetido às tensões de tração a aprimorar, desse modo, as propriedades mecânicas após o encruamento do aço laminado no que tange à resistência, dureza e tenacidade da liga.

Os cilindros de laminação são os componentes mecânicos de principal importância na produção do aço laminado, pois são responsáveis por dar a forma e acabamento ao produto final desejado e mantêm contato direto com o material a ser processado. Outro fator que destaca o cilindro como um elemento de grande importância na laminação é o seu elevado preço. Esse é um dos principais itens no custo passivo de produção em uma usina siderúrgica. Além disso, as longas interrupções no processo de laminação devido à necessidade de troca não programada dos cilindros afetam de sobremaneira a produtividade de uma linha de laminação. A troca dos cilindros se dá basicamente em dois momentos distintos; trocam-se os cilindros quando a vida útil já foi atingida ou é efetuada a troca quando esse componente quebrou durante operação.

A quebra dos cilindros pode ocorrer por sobrecarga, quando esses são submetidos a esforços acima do limite de resistência do material utilizado em sua fabricação, ou por fadiga, devido à propagação de trincas que podem se formar na superfície do cilindro provenientes do processo de laminação. Para evitar a quebra é comum efetuar intervenções no processo produtivo antes do período compreendido como vida útil a fim de interrompê-lo e realizar a substituição dos elementos quebrados por seus respectivos reservas.

O processo de fadiga pode ser facilmente evitado por procedimentos preventivos de manutenção realizados periodicamente, no qual se trabalha a superfície por usinagem com o intuito de retirar eventuais trincas existentes. A falha por sobrecarga, por outro lado, normalmente não permite uma ação preventiva eficiente e pode causar grandes danos ao maquinário. Por exemplo, a sobrecarga nos cilindros pode ocorrer por defeitos provocados durante a fundição dos cilindros (defeito de fabricação), remoções inadequadas durante a usinagem dos óxidos superficiais atribuídos a um sistema de refrigeração inadequada (defeito maquinário/sistema) e quando o aço a ser laminado se encontra a uma temperatura abaixo do indicado (falha de processo).

Para contornar a quebra prematura dos cilindros por sobrecarga, fusíveis mecânicos são utilizados para garantir a integridade estrutural dos cilindros e do laminador. Os fusíveis mecânicos são elementos de sacrifício utilizados como dispositivo de segurança em prol da integridade dos demais componentes do equipamento mecânico.

O projeto de um fusível mecânico apresenta particularidades quando comparado aos típicos projetos de engenharia onde não se quer que o componente sofra qualquer tipo de ruptura. A funcionalidade pretendida de um dispositivo de sacrifício depende da adequada previsão de sua falha, através do conhecimento do estado de tensões que se desenvolve na região projetada para romper, e dos princípios que governam a falha, que não é uma tarefa trivial. Diante da complexa gama de fatores interdependentes e que atuam concomitantemente durante o processo de laminação, uma escolha criteriosa dos princípios básicos para um estudo de caso, que venha a orientar a análise estrutural, faz-se necessária.

É comum ainda no âmbito industrial verificar a quebra dos cilindros mesmo com o uso de fusíveis mecânicos. Tais falhas ainda demonstram a necessidade de verificar os cálculos destes componentes de sacrifício com o objetivo de evitar a falha do cilindro de laminação.

1.1 Objetivos

Diante da complexidade de uma análise abrangente desse elemento de integridade física de laminadores, esse trabalho tem como principal objetivo fazer um estudo de caso de um fusível mecânico de uma aplicação real, com vistas na sua capacidade de romper frente às solicitações críticas de sobrecarga de um processo de laminação. Para isto, pretende-se realizar análises analíticas, propostas em literatura, e numérica a fim de comparar seus resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Laminação

O processo de laminação ocorre por deformação plástica do metal devido à sua alta ductilidade quando submetido a tensões de compressão exercidas por cilindros de laminação que giram em sentidos opostos e apresentam velocidades periféricas iguais. Quando o aço é forçado a entrar entre dois cilindros em rotação e espaçados por uma distância pré-determinada, um produto intermediário chamado esboço é gerado [Kopp, 1999].

Durante a deformação, a espessura inicial do material é diminuída, aumenta-se o comprimento e a largura, em alguns casos pode manter-se inalterada. É chamado passe cada deformação realizada pelos cilindros no aço. Normalmente, vários passes são realizados no material inicial para alcançar, dentro das tolerâncias especificadas, as dimensões da seção transversal do produto final. Raramente a redução nas dimensões finais pode ser alcançada somente após um passe.

Os cilindros de laminação, por sua vez, possuem perfis usinados em sua superfície os quais conferem ao aço a forma desejada [Dieter, 1981]. A disposição e montagem dos cilindros é dada pela estrutura metálica chamada gaiola de laminação. O equipamento mecânico compreendido entre os cilindros, mancais e suportes entre outros diversos componentes fazem parte da gaiola de laminação.

A vida útil do cilindro é limitada em decorrência do desgaste desenvolvido durante operação a que estão sujeitos. Genericamente é utilizado o termo desgaste para indicar a deterioração de sua forma ou propagação de trincas extensas à superfície geradas durante a conformação a quente do aço devido, principalmente, ao choque térmico através do contato da superfície do cilindro com o aço a um temperatura aproximada de 1100 °C. É denominada campanha de laminação o período compreendido entre o início da utilização do cilindro até o instante em que as trincas superficiais e o desgaste tornam-se excessivos. Nesse instante, o cilindro é desmontado do laminador e enviado para recuperação, a qual é normalmente realizada por usinagem. Uma campanha é controlada pela tonelagem total de aço já laminado por determinado conjunto de cilindros. É desejado que um conjunto de cilindros operando em parâmetros e condições de processo bem controladas venha a alcançar o maior número de campanhas possíveis.

No sentido de laminação ocorre uma tensão de tração. Essa tensão pode ser provocada pela gaiola seguinte que traciona a barra durante a laminação. Já a tensão de compressão surge como efeito direto da força dos cilindros sobre a barra laminada e está diretamente correlacionada com a distância pré-determinada entre cilindros.

O processo de plastificação do aço (Figura 2.3) ocorre durante a transição do regime elástico para o plástico e este fenômeno depende do seu estado de tensão, das propriedades do material, da temperatura do material e da velocidade de deformação. Caso os parâmetros de laminação não tenham sido respeitados, como por exemplo, uma temperatura da barra inferior àquela necessária para sua laminação, os esforços de laminação podem ser superiores aos previstos no projeto do cilindro e o conseqüentemente levá-lo a falha. Tais falhas são devido a erros operacionais e podem comprometer de forma significativa o processo de laminação em termos de custo, necessitando ser evitadas.

Neste trabalho será usado um aço AISI 4140 com tratamento térmico que forneça uma tensão de ruptura de 655 MPa, com um módulo de elasticidade de $E=205$ GPa e coeficiente de Poisson $\zeta=0,29$. Mais detalhes sobre esse aço estão dispostos na Tabela I.3.

2.1.2 Avaliação dos esforços sobre o fusível

O comportamento dos fusíveis sob esforços em estruturas laminadoras de aço e a análise suas características geométricas e de fabricação aplicados a elementos de sacrifício também fornecem meios para quantificar e garantir a operação segura dos laminadores. Além disso, o componente em análise não deve falhar durante a aplicação de cargas usuais do processo de laminação, contudo o fusível deve falhar sob ação de uma carga abaixo da tensão de ruptura do cilindro de laminação.

A segurança operacional do fusível mecânico está diretamente relacionada com as tensões provenientes durante operação e a resistência do material utilizado para fabricar tal componente. A resistência de determinado componente, por definição, é a avaliação mediante comparação entre as tensões que atuam em um estado multiaxial com valores característicos do material utilizado para fabricar tal componente. A comparação dos estados multiaxiais com uniaxiais de tensão se dá por meio de hipóteses clássicas de resistência do material.

A distribuição de tensões ao longo da seção transversal do fusível mecânico apresenta várias particularidades. A intensidade local de tensão-deformação é uma das características da variação de tensões em uma mesma seção e é tratada como efeito de entalhe. Efeitos geométricos (rebaixos e raios de concordância) e imperfeições no material (poros e inclusões) são alguns dos principais fatores determinantes para provocar os efeitos de intensidade de tensão.

2.1.3 Cargas do processo de laminação

Para iniciar a análise do fusível mecânico, é preciso determinar a magnitude da força de reação dos cilindros aos mancais de rolamento, pois os fusíveis mecânicos estão acoplados diretamente na superfície externa dos mancais do laminador. Para esse estudo, será avaliado um cilindro sem canais usinados em sua superfície. Desse modo, é possível afirmar que o carregamento dar-se-á somente no plano normal ao sentido de laminação. A vista frontal do processo de laminação, indicada na Figura 2.4, representa uma carga F e reações R_1 e R_2 nos mancais do cilindro, assim como duas linhas tracejadas para indicar a flexão dos cilindros durante operação.

A força de laminação (Figura 2.3) é descrita como uma função da tensão atuante sobre o elemento de área dA .

$$F = \int_A \sigma dA \quad (2.1)$$

A equação utilizada na prática e a qual define a força de conformação para a maioria dos processos é aproximada pelo o produto da área da seção deformada pela tensão de compressão média (resistência à conformação) nesta dada área [Kopp 1999]:

$$F = A_d k_w \quad (2.2)$$

A área a ser considerada é a projeção horizontal da superfície de contato do cilindro de laminação e o aço (Figura 2.3a):

$$A_d = l_d b_m \quad (2.3)$$

O comprimento l_d pode ser aproximado como sendo uma relação trigonométrica entre diferenças entre alturas do tarugo em laminação e o raio do cilindro (Figura 2.3a):

$$l_d = \sqrt{r \Delta h}; \Delta h = h_0 - h_1 \quad (2.4)$$

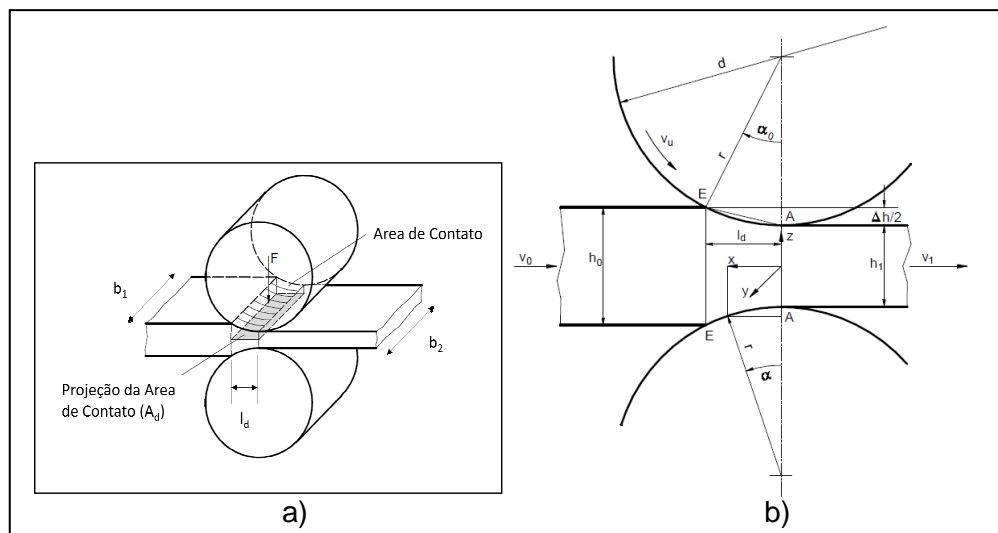


Figura 2.3 - a) Representação da área de contato. b) Vista em corte paralela ao sentido de laminação e variáveis geométricas envolvidas no processo, adaptado de Kopp, 1999.

O parâmetro b_m pode ser obtido através de diferentes relações teóricas para determinar o alargamento final da barra laminada. Diversos modelos foram apresentados em literatura no que tange à avaliação do alargamento tanto para os produtos acabados planos e para as barras laminadas. Análises das seções transversais de barras laminadas apresentaram, segundo (Wusatowski, 1969), um comportamento exponencial decrescente entre as razões (b_0/h_0) e (l_d/h_0) . Perfis côncavos nas faces laterais externas das barras laminadas indicam pouca deformação no centro do material. Já perfis convexos indicam o contrário. Experimentalmente é possível observar que o alargamento não ocorre quando a largura do material a ser laminado é vinte vezes maior que a sua espessura. Uma aproximação para os efeitos de alargamento pode ser representada como sendo a média entre a largura final e inicial da barra (Eq. 2.5):

$$b_m = \frac{b_2 + b_1}{2} \quad (2.5)$$

O parâmetro k_w [N/mm²] é a resistência à conformação. Esse parâmetro é uma função de k_f , da geometria do material, da temperatura do aço e do atrito entre a barra de aço e o cilindro. Dentre os diversos métodos desenvolvidos para a determinação da resistência à conformação, as relações de Ekelund (1933 *apud* Wusatowski *et al*, 1969) apresenta valores mais próximos entre os dados aferidos experimentalmente e aos encontrados teoricamente. Segundo Ekelund, este parâmetro é demonstrado a seguir:

$$k_w = \left(1 + \frac{1,6\mu\sqrt{r\Delta h} - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1} \right) (k_f + \eta\phi) \quad (2.6)$$

O coeficiente de atrito pode ser determinado para cilindros de ferro fundido segundo a relação a seguir:

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) ; T [^{\circ}C] \quad (2.7)$$

A resistência ao escoamento, k_f , é apresentada como:

$$k_f = (14 - 0,01T)(1,4 + C\% + Mn\% + 0,03Cr\%); \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.8)$$

O coeficiente de plasticidade, η , é uma relação da temperatura do aço a ser conformado:

$$\eta = 0,10(14 - 0,01T) ; T [^{\circ}C] \quad (2.9)$$

E a taxa de deformação, $\dot{\phi}$, é diretamente relacionada como a velocidade v da barra:

$$\dot{\phi} = \frac{2v \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}}{h_0 + h_1} \quad (2.10)$$

Para analisar a magnitude das forças atuantes nos fusíveis mecânicos, é necessário avaliar as reações nos mancais dos cilindros da seguinte maneira, conforme a Figura 2.4:

$$R_1 = \frac{F \cdot b}{L} ; R_2 = \frac{F \cdot a}{L} \quad (2.11)$$

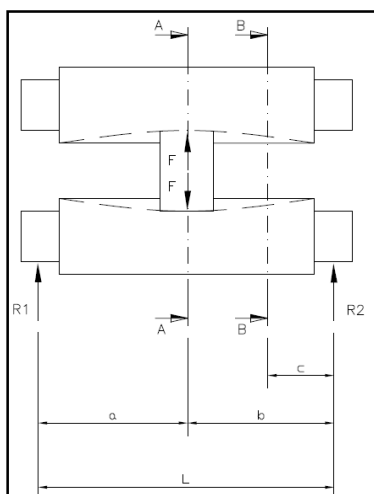


Figura 2.4 - Representação esquemática de dois cilindros de laminação durante operação e as reações R_1 e R_2 nos mancais.

2.2 Concentradores de Tensão

As teorias clássicas de Mecânica dos Sólidos para falhas estáticas assumem que o material é homogêneo, linear e isotrópico e, desse modo, livre de quaisquer defeitos como fendas, lacunas ou inclusões que poderiam servir como concentradores de tensão. Contudo, isso não é necessariamente verdadeiro para os componentes mecânicos reais. Os contornos geométricos funcionais que são projetados como reentrâncias na peça aumentam as tensões locais de maneira previsível e são levadas em conta no estado de tensões.

As estimativas de falha por ruptura podem ser feitas por análises analíticas ou numéricas, que consideram de diferentes formas a geometria de um entalhe. Análises numéricas dos efeitos dos entalhes nos fusíveis mecânicos podem ser realizadas através análise pelo método dos elementos finitos para diferentes condições de operação. Com estas metodologias, sob variados intervalos de esforços de laminação e atribuição de determinadas geometrias nos entalhes pode-se buscar a influência na distribuição de tensões ao longo da seção resistente desse componente de grande importância para a o processo de laminação.

2.2.1 Fator de concentração de tensão K_t

Uma das formas de estimar a falha por sobrecarga é utilizar o fator de concentração de tensão. Para que os processos de falha iniciem, é possível afirmar que o nível de solitação ultrapassou o nível de resistência seja por um aumento local da solitação.

Em regiões críticas para análise, perturbações amplificadoras do campo de tensões provocadas por variações geométricas, como entalhes, raios de concordância ou reentrâncias, provocam o aumento significativo na magnitude da tensão experimentada pelo material.

A tensão nominal pode ser calculada com base na área bruta da seção de corte sem nenhuma redução devido à área do entalhe. Esse procedimento é diferente dos procedimentos utilizados para cálculo da tensão nominal quando são usados os fatores de concentração de tensão em uma análise regular de tensão. Por definição, o fator de concentração K_t está relacionado às tensões da seguinte maneira:

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nom}} \quad (2.13)$$

Existem diferentes expressões analíticas e empíricas para o fator de concentração de tensão, onde estes dependem principalmente da geometria da peça e do entalhe. No caso estudado ainda deve-se considerar a profundidade do entalhe. A escolha de um fator de concentração adequado também dependendo deste parâmetro geométrico, como no caso deste estudo.

Diferentes relações foram buscadas em literatura para uma avaliação analítica. A que mais se adequou a este estudo, segundo este autor, foi proposta Durelli para entalhes profundos. Segundo Durelli, 1982, para entalhes profundos sob tensão uniaxial, a superfície a qual existe um entalhe (superfície superior), Figura 2.5, é considerada relativamente distante da superfície livre (superfície inferior). Portanto, para entalhes profundos, é possível também admitir concentração local de tensão. O formato do fundo do entalhe pode ser aproximado por uma hipérbole por se tratar de um pequeno segmento. O fator de concentração de tensão para esse caso é dado por:

$$K_t = \frac{2 \left(\frac{d}{r} + 1 \right) \sqrt{\frac{d}{r}}}{\left(\frac{d}{r} + 1 \right) \arctan \sqrt{\frac{d}{r}} + \sqrt{\frac{d}{r}}} \quad (2.14)$$

Onde d é a distância da ponta do entalhe até a superfície livre e r é o raio de concordância do entalhe.

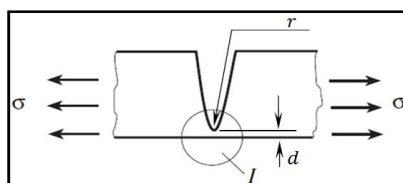


Figura 2.5 – Entalhe profundo hiperbólico, adaptado de Pilkey, 2008.

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

Ao observar as diferentes formas de análise e subsequente variações de métodos para análise estrutural de peças com entalhes profundos submetidas à esforços de tração, é proposta duas frentes de estudos para avaliar os níveis de tensões experimentados pelo fusível durante operação. Assim, aqui serão estudados casos analíticos, utilizando a expressão para entalhes profundos e casos numéricos utilizando o método de elementos finitos, para então compará-los para diferentes profundidades de entalhe.

Porém, antes de iniciar estas análises de falha é necessário definir uma carga crítica, segundo uma falha de processo, que neste trabalho é a tentativa de laminar um aço com temperatura inferior ao recomendado.

3.1 Definição da condição crítica e força que leva a ruptura

Utilizando as equações apresentadas na seção 2.3 pode-se definir a força atuante sobre o fusível mecânico que leva a sua ruptura. Esta força é definida com base nos parâmetros de laminação de uma condição crítica que se espera a ruptura do fusível mecânico. Neste caso a situação crítica de uma laminação de uma chapa a uma distância está compreendida a uma distância de $a = 350$ mm do mancal em análise de um equipamento com comprimento entre mancais de $L = 2300$ mm. (Figura 2.3). O cilindro estudado tem diâmetro de 567,5 mm, com altura de canal de 52,25 mm, distância entre os cilindros de 10 mm, rotacionando a 300 rpm. Neste caso estudado o material tem altura de entrada do perfil de 138 mm e saída de 118 mm. A largura de entrada do perfil é de 138 mm e saída de 159 mm. Estas dimensões e outros parâmetros foram obtidos em um procedimento operacional real de laminação. Por fim, a temperatura de entrada do material, que representa a condição de operação crítica para a fratura do cilindro, foi tomada como 920 °C [Wusatowski, 1969]. Sabe-se que nesta temperatura, ou abaixo dela, a dureza do aço aumenta significativamente. Para esta situação, onde se espera a ruptura do fusível, para conservação do cilindro de laminação, é encontrada uma força de laminação de 269 kN. Conseqüentemente, a força atuando sobre o fusível é de 223 kN. Para esse estudo, os cilindros de laminação são considerados como corpos rígidos e a flexão e deformação da seção em contato com o aço a ser laminado foram desprezadas.

3.2 Análise analítica – Fator de Concentração de Tensões

Com o intuito de avaliar se o fusível mecânico cumprirá com a sua funcionalidade, primeiro é realizada uma análise analítica utilizando a fator de concentração de tensão. Dentro dos possíveis casos de cálculo deste fator, foi escolhido o fator de Durelli, 1982 [Pilkey, 2008], que foi proposto para entalhes profundos.

Assim, utilizando a geometria do fusível apresentado na Fig. 2.2, onde o raio é dado por $r = 1,5$ mm e a distância variável da ponta do entalhe a superfície livre, d , foi possível obter a resposta das tensões máximas. As respostas da tensão máxima, usando o fator de concentração de tensões, segundo a distância da ponta do entalhe a superfície livre, é apresentada na Fig.3.1. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela I.1.

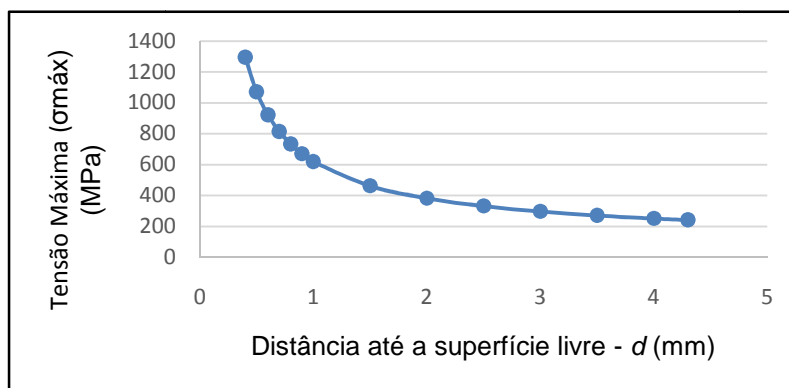


Figura 3.1 – Resposta de tensão máxima em relação à distância da ponta do entalhe até a superfície livre do componente.

Esta resposta permite estabelecer qual deveria ser o valor de d para uma máxima tensão sobre o material de 655 MPa. Neste caso, para um valor $d=0,68\text{mm}$ a tensão de resistência é alcançada.

3.3 Análise numérica

Foi desenvolvida uma geometria parametrizada, representativa do fusível mecânico, em software CAD, para que esta fosse utilizada nesta análise. Esta geometria representa a um fusível mecânico real para laminadores, onde apenas a profundidade de entalhe foi modificada, segundo a distância da ponta do entalhe a superfície livre.

Para esse estudo em elementos finitos, o software ANSYS® foi utilizado. Para representar as restrições de movimento e rotação sob as quais o componente está submetido quando montado no laminador, foi imposto um deslocamento zero nas faces verticais axissimétricas do modelo representativo de um quarto simétrico (Figura 3.3). Assim como, para as faces de contato direto com o fuso de acionamento também indicadas na Figura 3.3. As faces em amarelo na Figura 3.3 representam as regiões nas quais foram aplicados deslocamentos e rotações igual a zero a fim de restringir o movimento do componente.

As condições de contato e montagem entre o fusível e o suporte (Figura 2.1) foram simplificadas nesse estudo. Para tanto, os esforços oriundos do processo de laminação, Equação 2.2 e representados na Figura 2.4, os quais são transmitidos aos mancais e posteriormente aos fusíveis através dos suportes foram nesse estudo modelados como sendo uma distribuição de pressão ao longo da área de contato entre o fusível e o suporte. A pressão neste modelo quarto simétrico foi de, aproximadamente, 9,59 MPa para uma reação R_1 (Figura 2.4) de 223 kN. Este valor foi dividido por quatro para melhor representar as condições de carregamento para o modelo estipulado.

A malha foi refinada na região do entalhe até que não houvesse mudanças significativas na máxima tensão (ver Fig. 3.2). Em todos os casos o valor máximo se encontrou na ponta do entalhe, como esperado.

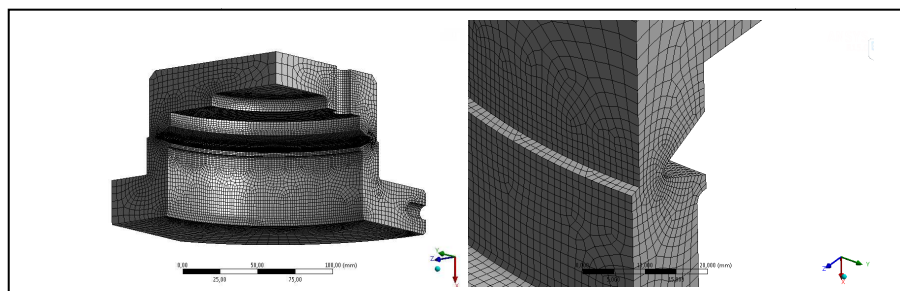


Figura 3.2 – Malha gerada para o fusível mecânico e detalhe entorno do entalhe.

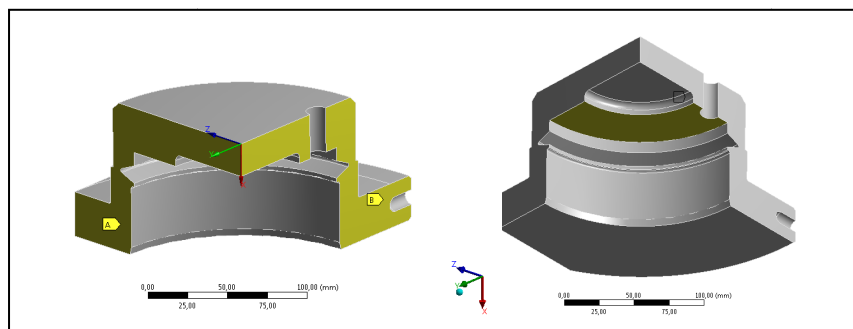


Figura 3.3 – Condições de contorno com deslocamento zero para representar a montagem do fusível no laminador.

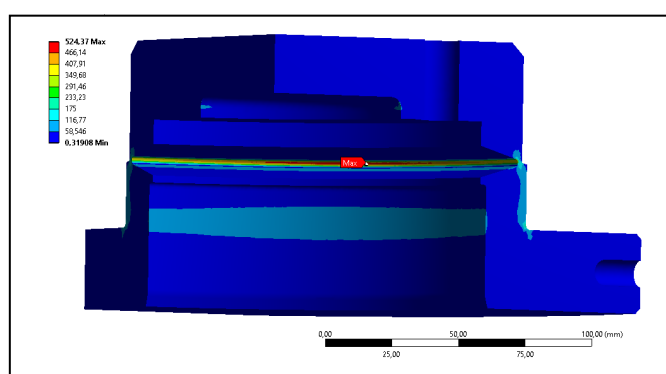


Figura 3.4 – Resposta da máxima diferença de tensão normal.

As respostas da diferença máxima de tensão normal, usando a análise por elementos finitos, segundo a distância da ponta do entalhe a superfície livre, são apresentadas na Figura 3.4. Esta resposta também permite estabelecer qual deveria ser o valor de d para se obter a falha desejada nesta situação crítica. Neste caso o valor de d é, aproximadamente, 1,5 mm para que o material comece a sofrer os efeitos de coalescência e os critérios estipulados acima para o caso analítico já não contemplam essa situação. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela I.2 e os diferentes níveis de tensão normal no sentido do carregamento com a variação da distância da ponta do entalhe até a superfície livre d é demonstrada na Figura 3.5 a seguir.

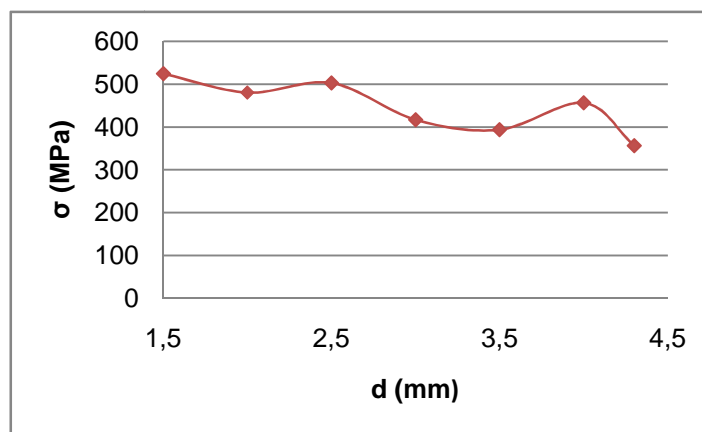


Figura 3.5 – Resposta de tensão máxima em relação à distância da ponta do entalhe a superfície livre.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi abordada uma metodologia numérica para analisar falha, desejável, de um fusível mecânico para laminadores de aço, onde foi possível compreender o desenvolvimento das máximas tensões com a profundidade do entalhe de um fusível real.

Os dois tipos de análise deram respostas dispares levando a dimensões de entalhe significativamente diferentes, que não podem ser desconsideradas em um projeto que prevê a falha do componente. Cálculos conservativos, neste caso, levam a um projeto errôneo do fusível mecânico.

As repostas deste estudo levam a crer que a análise analítica, utilizando o fator de concentrações de tensões para entalhes profundos, não é adequada para tal componente. Tal relação não é capaz de aproximar, considerando a elasticidade, o comportamento de tensões na ponta do entalhe. Isto pode ser devido a geometria do entalhe, que não é na realidade hiperbólica, ou sua relação de profundidade proposta não ser aplicável a este caso. Além disto, vale ressaltar que a superfície livre do fusível não é retilínea, o que leva a invalidade do uso desta relação, apesar de a máxima tensão numérica sempre se encontrar na região da ponta do entalhe.

Mesmo apresentando valores correlatos à realidade e estimativas de níveis de tensões coerentes entre os métodos utilizados, análises fundamentadas nas teorias mais acuradas de múltiplos fatores de concentração atuando na seção crítica e as quais levam em consideração um elemento submetido a esforços combinados vem a elucidar novas estratégias de análise para esse tipo de problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENASCUITTI, D., BRUSA, E., BAZZARO G., 2010. “**Finite Elements Prediction of Thermal Stresses in Work Roll of Hot Rolling Mills**”. *Procedia Engineering*2, p. 707-716, 2010.

COLPAERTE, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos**. 5ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 411p.

DIETER, George E. “**Metalúrgica Mecânica**”. 2ed. Tradução de Antônio S. de Souza, Luiz Henrique de Almeida e Paulo E. Valadão de Miranda. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 653p.

Durelli, J.O. “**Stress Concentration**”. U.M.Project SF-CARS, School of Engineering, University of Maryland, Office of Naval Research, Washington, DC, 1982.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Produção Siderúrgica Brasileira - Estatísticas. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=20163>. Acesso em: 15 de abr. 2016.

ISSELER, L., RUOß, H., HÄFELE, P. “**Festigkeitslehre-Grundlagen**”. 2. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1997. 593p.

PILKEY, W. D., PILKEY, D. F. “**Peterson’s Stress Concentration Factors**”. 3 ed. New Jersey: John&Sons Inc., 2008. 522 p.

PASTOUKHOV, V.A., VOORWALD, H. J. C., “**Introdução à mecânica da integridade estrutural**”. São Paulo: Editora da universidade Estadual Paulista, 1995. 201p.

KOPP, R., WIEGELS, H. **“Einführung in die Umformtechnik”**. 2 ed. Mainz: Mainz , G Verlag, 1999, 324 p.

RIZZO, E. M. S, **“Processos de laminação dos aços: uma introdução”**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 254 p.

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R., BUDYNAS, Richard G. **“Projeto de Engenharia Mecânica”**. 7ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

STEVENS, P. G, Ivens, K.P, Harper, P.J. **“Increasing Work Roll by Improved Colling Prattice”**, Journal of Iron and Steel Institute, 1971, 209p.

WILLIAMS R.V, Boxall M. **“Roll surface deterioration in hot strip Mills”**, Journal of Iron and Steel Institute, 1965. 369p.

WUSATOWSKI, Z. **“Fundamentals of Rolling”**. 1ed. Polônia: WydawnictwoSlask Katowice. 1969. 679p.

APÊNDICE I

Tabela I.1 – Valores de intensidade de tensão para diferentes distancias até a superfície livre do componente e as tensões máximas para a área em análise analítica.

Kt	d (mm)	r (mm)	A (mm ²)	σ Nom (MPa)	σ Max (MPa)
1,167842443	0,4	1,5	270,542	1108,883487	1295,001201
1,207073682	0,5	1,5	338,021	887,5188228	1071,300613
1,319354243	0,8	1,5	540,08	555,4732632	732,8660068
1,355160207	0,9	1,5	607,307	493,9837716	669,4271503
1,390234392	1,0	1,5	674,472	444,7923709	618,3656515
1,555938119	1,5	1,5	1009,35	297,2201004	462,4560838
1,708208142	2,0	1,5	1342,66	223,4363921	381,6758642
1,84974615	2,5	1,5	1674,41	179,1681224	331,4155446
1,982466684	3,0	1,5	2004,58	149,6575834	296,6911731
2,107782962	3,5	1,5	2333,18	128,5800434	271,0188249
2,226772135	4,0	1,5	2660,21	112,7731365	251,1200781
2,29548675	4,3	1,5	2855,67	105,0540451	241,1501684

Tabela I.2 – Valores tensão máxima principal e diferença máxima das tensões para diferentes distâncias até a superfície livre do componente e as tensões máximas para a área em análise numérica, assim como o número de nós e elementos utilizados.

d (mm)	Máx Dif. Tensão (MPa)	Máx. Tensão Principal (MPa)	Nós	Elementos
1,5	524,37	524,39	629013	439431
2,0	480,29	480,94	1223957	871508
2,5	502,59	504,34	632981	442319
3,0	416,73	417,42	615592	430680
3,5	393,63	394,27	604419	422951
4,0	456,16	456,66	1199955	853837
4,3	356,58	357,39	591755	414125

Tabela I.3 – Propriedades do aço SAE 4140 recozido a 815°C, resfriamento lento em forno para 11°C/h até 665°C. Tempera ao ar.

Tensão Limite Resistência (MPa)	655
Tensão de Escoamento (MPa)	415
Alongamento para Ruptura	25.7 %
Módulo de Elasticidade (GPa)	205
Poisson	0.29