

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE O PROCESSO DE REBITAGEM EM PALHETAS DE TURBINAS A VAPOR

Jonas Zin Lanzendorf¹, Franco Wronski Comeli²

jonas.lanzendorf@gmail.com¹, franco.comeli@engie.com²

¹Faculdade SATC, Engenharia Mecânica - Rua Pascoal Meller, 73 - CEP 88.805-380 - CP 362 - Criciúma - SC - Brasil.

²ENGIE Brasil Energia S.A. Av. Paulo Santos Mello nº 555 – CEP 88.745-000, Capivari de Baixo – SC - Brasil

Resumo

A influência da fragilização estrutural devido ao processo de rebiteamento vem sendo pesquisada em diversos componentes, como exemplo, em estruturas aeronáuticas. Este processo afeta na confiabilidade dos equipamentos quando submetidos aos carregamentos de operação. A falha constatada no rotor em estudo está relacionada com as técnicas utilizadas no processo de rebiteamento das bandagens nas palhetas, que acabou gerando trincas no raio de arredondamento da espiga da palheta. Deste modo, o presente estudo avalia o comportamento mecânico do processo de rebiteamento e a influência da temperatura sobre este, através de uma análise não linear utilizando o método dos elementos finitos (MEF), onde é investigado as tensões residuais do processo. Foram observadas nas simulações uma concentração de tensão no raio de arredondamento da espiga, assim como a predominância de esforços de tração nesta região. Diante da análise, a condição de 600 °C apresentou uma melhor distribuição das tensões residuais e a menor solicitação de força para realizar o processo. Contudo, estudos futuros apoiados na mecânica da fratura podem ser realizados, afim de encontrar um tamanho de trinca aceitável, sem que ocorra a falha da união quando esta for solicitada na fase de operação.

Palavras-chave: Processo de Rebiteamento; Tensão Residual; Análise Não Linear; Método dos Elementos Finitos.

1. Introdução

Pesquisas recentes vêm observando o impacto significativo das tensões residuais perante a capacidade de componentes e estruturas de engenharia sofrerem fadiga e fratura, como efeito positivo (aumentando a vida útil) ou negativo (diminuindo a vida útil) dependendo da tensão residual em relação a tensão aplicada, isto é, se elas se somam, ou subtraem, do esforço aplicado (James *et al.*, 2016).

Conforme De Giorgi (2011) a maioria das operações de manufatura por conformação a frio apresentam elevado nível de tensão residual, isto ocorre devido ao fenômeno do encruamento, que é responsável pelo aumento da resistência mecânica e da dureza, e pela redução da ductilidade e tenacidade do material (Rodrigues *et al.*, 2010).

Elevar a temperatura neste tipo de processo resulta no aumento da deformação acompanhado da redução da tensão de escoamento do material (Saito *et al.*, 2017), isto se dá devido as alterações na estrutura, onde grande parte da energia introduzida no material é eliminada por recuperação dinâmica e recristalização (Colpaert, 2008), esta energia eliminada afeta diretamente na força necessária para realizar o processo de rebitagem.

Em 2016, na revisão geral da unidade 2 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), foram substituídas todas as palhetas do rotor de alta pressão. A troca foi motivada pelo final da vida das mesmas, assim como pela constatação de falha destas na unidade 1 (gêmea) em 2014.

Após 3.000 horas de operação da turbina, foram identificados sintomas, como a mudança significativa do comportamento dinâmico da turbina, deste modo foi realizado uma inspeção interna. Após a abertura da carcaça externa e interna, foi constatado o desprendimento de bandagens das palhetas nos estágios 1A, 1B, 3°, 12° e 16°, a Figura 1 (a) e (b) mostra o desprendimento das bandagens nos estágios 1A e 1B.

Conforme a análise preliminar, a causa mais provável da falha foi o processo de rebitagem inadequado, causando uma trinca na região da espiga da palheta. A causa foi confirmada através de um ensaio por ultrassom, que indicou trincas na raiz da espiga da palheta de vários estágios.

Para a validação de um processo de rebitagem isento de defeitos foram realizados vários testes com variação da: altura da espiga, ângulo da espiga, número de pancadas, pressão do martetele etc., todos os testes foram realizados em temperatura ambiente.



Figura 1 – Desprendimento das bandagens nos estágios 1A e 1B.

Diante desta ocasião foi desenvolvido um modelo numérico computacional, utilizando o *software* ANSYS®, que emprega o método de elementos finitos na solução de problemas de engenharia, capaz de obter as tensões residuais do processo de rebiteamento nas palhetas para diferentes temperaturas. Possibilitando assim, avaliar a influência da temperatura sobre o processo de rebiteamento das espigas virtualmente, viabilizando as melhores condições para a validação do mesmo por meio de ensaio experimental.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo aborda a teoria necessária para sustentar o estudo e os resultados do presente trabalho.

2.1 Turbina a Vapor

Turbinas a vapor são equipamentos que retiram energia térmica a partir do vapor pressurizado, utilizando o elevado calor latente para armazenar grandes quantidades de energia na forma de potencial termodinâmico (Lemos, 2015).

O processo de transferência de energia para o eixo da turbina se processa em duas etapas: primeiro, o vapor é expandido em bocais de modo a ter sua entalpia convertida em energia cinética e, posteriormente, o escoamento, em alta velocidade, é direcionado contra as pás dispostas ao longo da periferia de uma roda móvel, entregando para esta parte de sua energia.

A roda Curtis, ou estágio Curtis, é o primeiro elemento a extrair energia do vapor superaquecido, também muito utilizado na construção de turbinas pequenas ou como primeiro

estágio de turbinas de grande porte (Flutt, 2008). A Figura 2 ilustra os estágios do rotor de alta pressão da turbina da unidade 2 do CTJL.

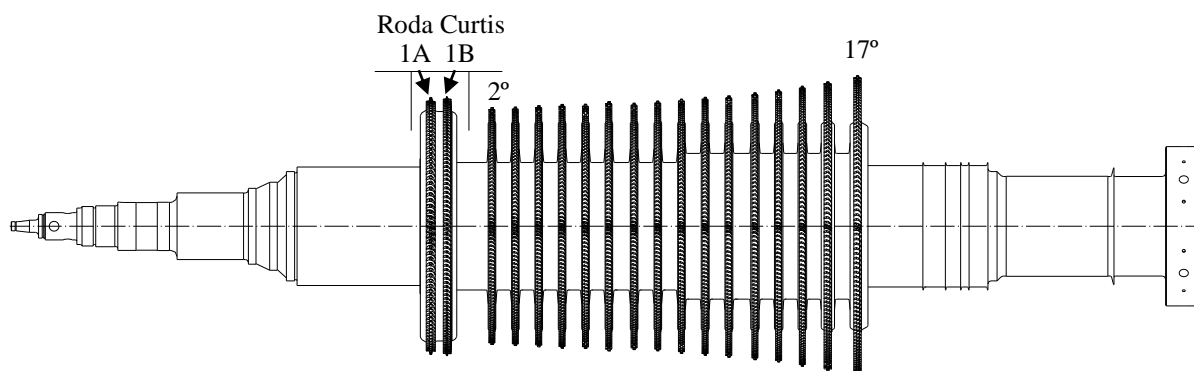


Figura 2 – Estágios do rotor de alta pressão da unidade 2.

A roda Curtis possui dois estágios, o 1A e o 1B, e ambos sofreram o desprendimento das bandagens durante operação. Embora a presença do desprendimento das bandagens em outros estágios, o estágio 1A foi escolhido para ser analisado, pois contém suas palhetas com espiga de seção circular, possibilitando uma simplificação na análise numérica, com o objetivo de minimizar o processamento computacional.

As palhetas das turbinas a vapor são os elementos que transformam a energia cinética do vapor admitido no torque resultante no eixo da máquina. O fluxo do fluido com alta energia que incide sobre a palheta associado a rotação da máquina impõe solicitações especiais sobre estas (Affonso *et al.*, 2002).

Devido ao vapor ser um fluido denso e de elevada temperatura, o alto desempenho dos materiais é necessário para que seja capaz atender as solicitações do projeto, como: a atuação das forças do fluxo do vapor, força centrífuga, diferenças de pressão e alta temperatura, além da vibração presente nas palhetas que podem desestabilizar o sistema (Lemos, 2015).

As principais partes de uma palheta de turbina a vapor estão indicadas na Fig. 3.

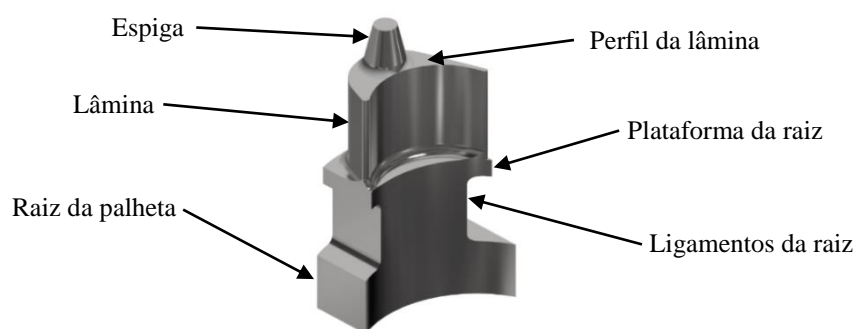


Figura 3 – Definição dos componentes da Palheta.

A espiga é o componente responsável por fixar a bandagem na palheta. A junção entre a espiga e o perfil da lâmina deve conter um raio de arredondamento, onde não é aceitável conter nenhuma descontinuidade conforme a Fig. 4 (Sanders, 1987).

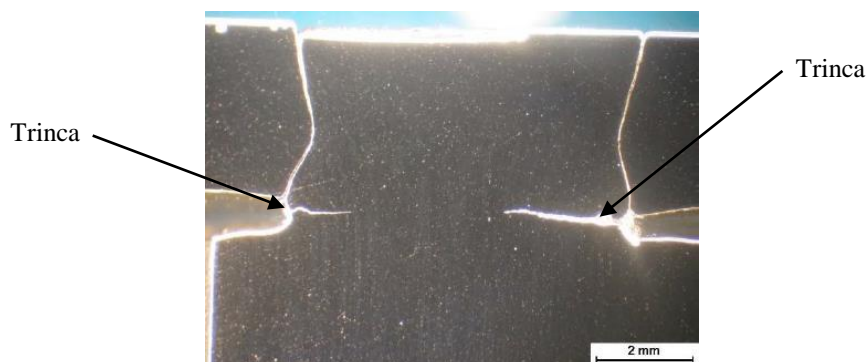


Figura 4 – Microscopia óptica detectando trinca na espiga (50X).

As descontinuidades no raio de arredondamento acabam prejudicando o processo de rebiteagem devido à tendência de acumular tensões nestas regiões, facilitando a geração de trincas e sua propagação durante a rebiteagem ou até mesmo em operação.

Em rotores de turbinas a vapor, muitos estágios com palhetas móveis possuem uma fita presa a elas, essa fita, chamada de bandagem, está fixada no extremo da lâmina (lado oposto a raiz da palheta), formando o quarto lado da passagem de expansão do vapor com os perfis da lâmina e a plataforma da raiz (Sanders, 1987). A Fig. 5 indica os quatro lados da passagem do vapor e ilustra a palheta unida à bandagem.

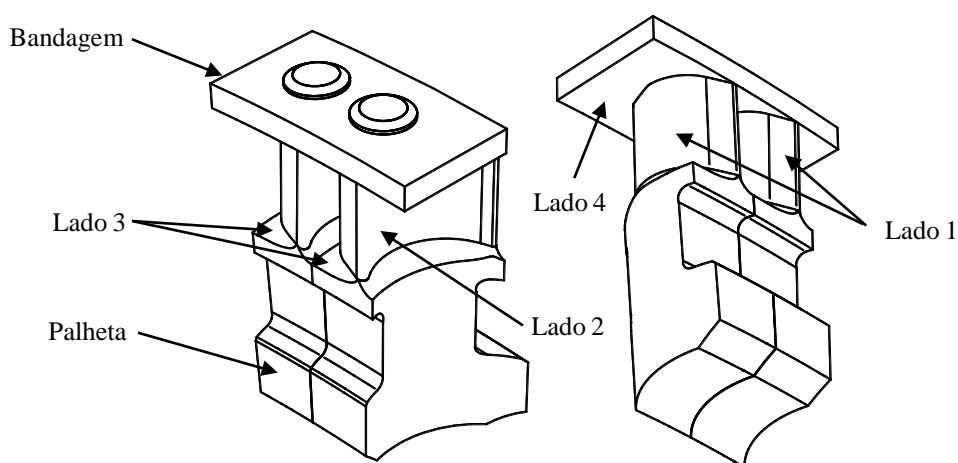


Figura 5 – Identificação dos 4 lados da passagem da expansão do vapor nas palhetas.

Como muitos outros componentes do caminho do vapor, a bandagem é feita para desempenhar mais do que a principal função de evitar a expansão e desperdício de vapor através do extremo da palheta (Sanders, 1987). As principais funções da bandagem estão indicadas a seguir:

- Preveni ou minimiza o vazamento através da ponta do perfil da palheta, fornecendo uma parede para ajudar a controlar o fluxo e a expansão do vapor;
- Fornece um meio de controlar a área de escape do estágio, proporcionando um limite externo contra o qual o vapor pode se expandir;
- Minimiza a magnitude das vibrações quando estão firmemente presas às espigas.

2.2 Aço X22CrMoV12-1

O aço inoxidável martensítico X22CrMoV12-1 (DIN EN 10269) é um dos aços mais utilizados para confecção de palhetas de turbina a vapor (Lemos, 2015). Utilizado principalmente em estágios de alta temperatura (entre 371 e 482°C), onde apresenta melhor rendimento, contendo resistência mecânica, fluência e a ruptura (Bloch *et al.*, 2008). Ainda assim pode-se destacar a série dos aços X22 pela sua alta resistência a corrosão quando submetidos a temperaturas elevadas (Comeli, 2016). As propriedades mecânicas e a composição química do aço X22CrMoV12-1 podem ser observadas nas Tab. 1 e 2.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço X22CrMoV12-1 (EN 10269, 2014).

Tratamento Térmico	LE _{0,2} ¹ (MPa)	LR ² (MPa)		Alongamento Mínimo (%)
		Mín.	Máx.	
Temperado e Revenido ³ QT1	>600	800	950	14
Temperado e Revenido ⁴ QT2	>700	900	1050	11

¹Limite de Escoamento; ²Limite de Resistência; ^{3,4}Variantes do Revenido

Tabela 2 – Composição química (% massa) do aço X22CrMoV12-1
(EN 10269, 2014).

Teores (%)	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
Mínimo	0,18	0,40	-	-	-	0,30	11,00	0,80	0,25
Máximo	0,24	0,90	0,0250	0,0150	0,50	0,80	12,50	1,20	0,35

2.3 Processo de Rebitagem

De forma simplificada o processo de rebitagem consiste em conformar a espiga da palheta no furo da bandagem. A Fig. 6 ilustra a configuração inicial do processo de rebitagem do estágio 1A do rotor em estudo.

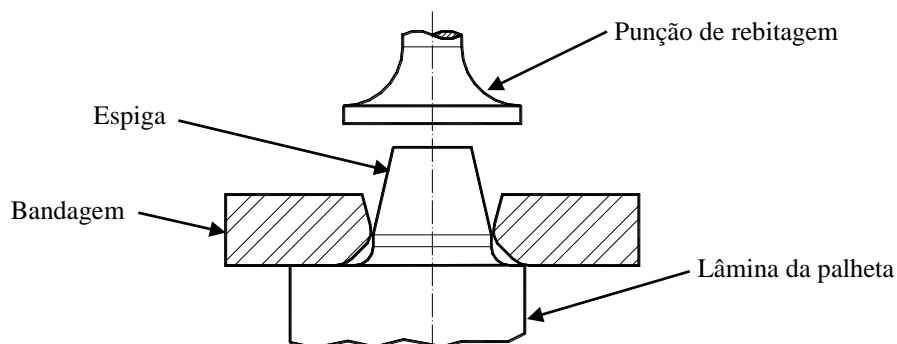


Figura 6 – Configuração inicial do processo de rebitagem do estágio 1A.

Segundo Sanders (2002), a espiga deve ser conformada de maneira a prender a bandagem firmemente à palheta, produzindo o mínimo possível de empuxo lateral na mesma. Ainda assim, nenhuma trinca deve ser formada no material da espiga, em casos de suspeita de trincas as técnicas de ensaio não-destrutivo devem ser usadas para confirmar sua existência.

A rebitagem deve impedir a movimentação da bandagem em relação à palheta e ser suficiente para suportar a força centrífuga da bandagem durante as solicitações de operação (Sanders, 1987). A bandagem é mantida no extremo da palheta inicialmente pelo ajuste de fricção entre a espiga e a superfície interna do furo da bandagem, situação aceitável quando a unidade não está submetida a forças vibratórias excessivas, podendo causar a perda da fricção (Bloch, 2008).

2.4 Plasticidade e Influência da Temperatura

A plasticidade ou processo de deformação plástica, possui muitas dificuldades matemáticas devido a não linearidade das leis principais que descrevem o comportamento dos materiais, sendo necessário atribuir algumas hipóteses simplificadoras para tornar a análise do processo de rebitagem mais tratável (Meyers *et al.*, 1982).

Admite-se:

- Material isotrópico;
- Deformações independentes do tempo;
- Material obedece a lei de Hooke até o limite de escoamento;
- Simplificações na curva tensão-deformação uniaxial.

A partir dessas simplificações, o comportamento mecânico do material pode ser descrito pela relação tensão *versus* deformação plástica. A curva de escoamento depende de vários fatores: do material, da deformação, da velocidade de deformação e da temperatura. Em temperaturas mais elevadas ocorre ainda o fenômeno de amolecimento (recuperação e recristalização) (Schaeffer, 2016).

Com o aumento da temperatura no processo de rebiteamento pretende-se diminuir o efeito do encruamento e da distorção da estrutura na fase da deformação plástica, de modo que ocorra uma recuperação parcial da ductilidade do material. Para isso, o processo de rebiteamento deve operar com tensões intermediárias situadas numa faixa entre o trabalho a frio e a quente. Além disso o aumento da temperatura permite maiores níveis de deformação, acompanhado da redução da tensão de escoamento.

2.5 Elementos Finitos – Análise Não Linear

O método dos elementos finitos pode ser utilizado em diferentes aplicações como a análise estrutural, modal, transferência de calor, fluidos, dinâmica entre outras. Para isso é necessário realizar a malha de elementos finitos, onde a partir do entendimento de cada elemento é possível de se compreender todo o conjunto.

A análise não linear busca avaliar o comportamento de estruturas quando submetidas a esforços acima do limite de escoamento do material, ou quando instabilidades são capazes de resultar no colapso dessas estruturas. Para chegar em uma solução é utilizado métodos iterativos afim de atingir o equilíbrio entre as forças internas e externas para cada incremento de carga, neste caso é utilizado o método de Newton Raphson (Cataneo, 2016).

Este método, indicado na Fig. 7, propõe primeiramente um incremento de força, em seguida é proposto um incremento de deslocamento de todos os nós do modelo, com base na rigidez inicial. Este incremento de deslocamento gera forças internas nodais, onde estas devem

ser equilibradas com as forças externas, no entanto se a condição de equilíbrio não atender a precisão exigida, se torna necessário propor uma outra deformada, até que as forças externas sejam equilibradas pelas forças internas (Alves, 2012).

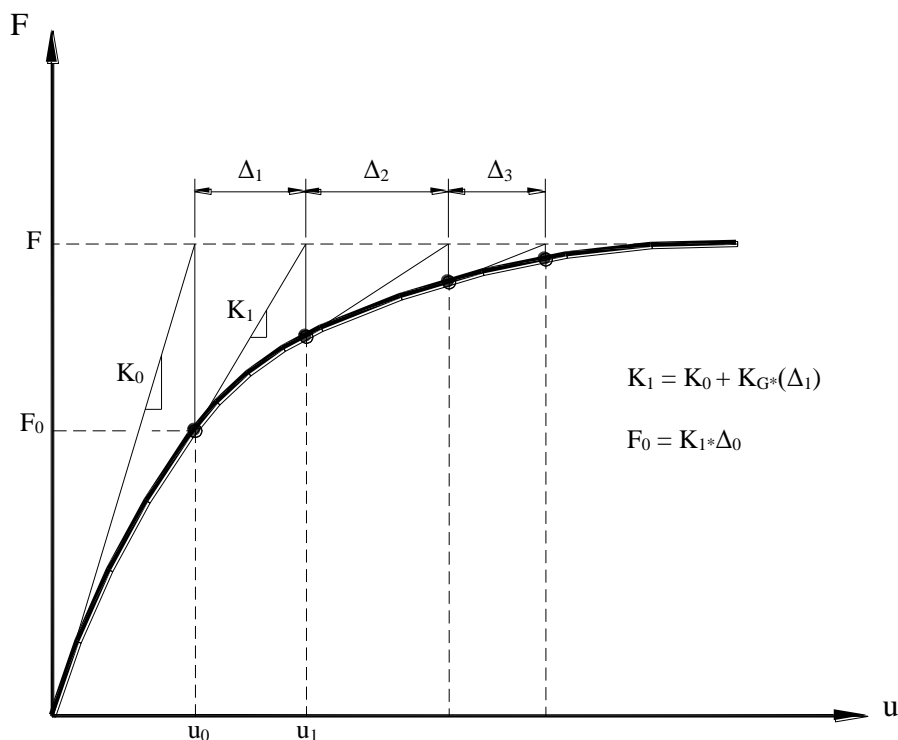


Figura 7 – Método de Newton Raphson (adaptado de Alves Filho, 2012)

3. Procedimento Experimental

Nesta seção é apresentado as atividades necessárias para a realização deste estudo, baseados em normas e procedimentos.

3.2 Análise Química e Ensaio de Tração

Afim de comparar o material utilizado nos ensaios de tração e testes experimentais com os valores admitidos pela Norma EN10269 para o aço X22CrMoV12-1 foi realizado uma avaliação da composição química por espectrometria de emissão óptica com um equipamento da marca SPECTROCAST.

Os ensaios de tração foram executados no equipamento universal de ensaios mecânicos INSTRON 300LX-J3, utilizando uma célula de carga de 300 kN. Foi adotada a norma ASTM E8/E8M-13 para a realização dos ensaios em temperatura ambiente e a norma ASTM E21-09

para os ensaios em altas temperaturas, onde foram determinadas as propriedades mecânicas do aço X22CrMoV12-1 como: limites de escoamento e limite de resistência. As dimensões dos corpos de prova conforme as normas são indicadas na Fig. 8, em (a) o corpo de prova para ensaio de tração em temperatura ambiente e (b) para ensaio de tração em altas temperaturas.

Os ensaios foram realizados à uma taxa de deformação de 1 mm/min, sendo 3 ensaios na temperatura ambiente e 2 ensaios para cada temperatura, sendo essas de 400, 500 e 600 °C.

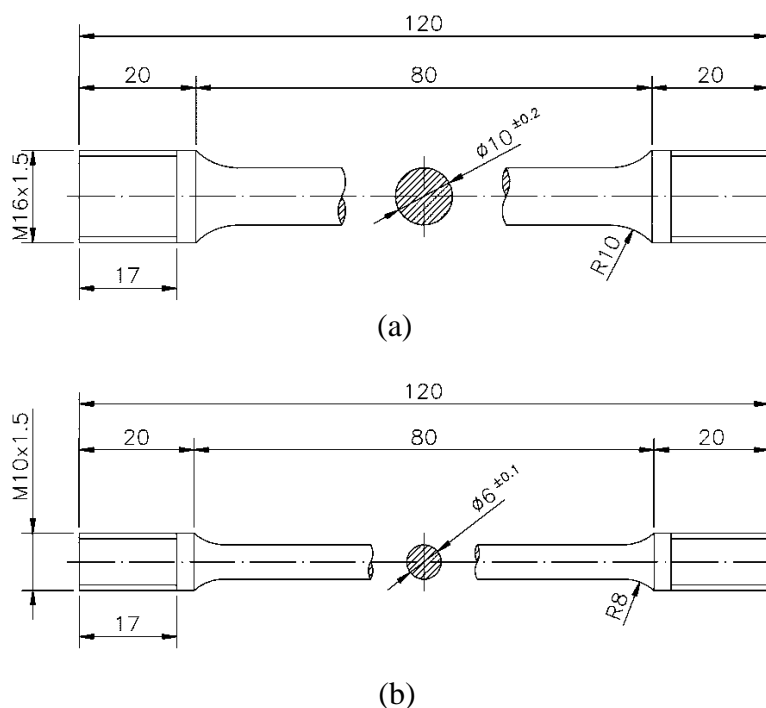


Figura 8 – Corpo de prova para ensaio de tração, (a) a frio e (b) a quente.

O tratamento dos dados de tensão e deformação foi realizado no Excel, onde a tensão e a deformação verdadeira foram calculadas por meio das equações (1) e (2) (Rodrigues *et al.*, 2010):

$$\sigma' = \sigma_{eng} \times (1 + \varepsilon_{eng}) \quad [MPa] \quad (1)$$

$$\varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad \left[\frac{mm}{mm} \right] \quad (2)$$

Onde:

σ' [MPa]: Tensão verdadeira

σ_{eng} [MPa]: Tensão de engenharia

ε' [mm/mm]: Deformação verdadeira

ε_{eng} [mm/mm]: Deformação de engenharia

A deformação plástica foi calculada a partir da seguinte equação (*CAE Associates*):

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{total} - \frac{\sigma_v}{E} \quad \left[\frac{mm}{mm} \right] \quad (3)$$

Onde:

ε_p [mm/mm]: Deformação plástica

ε_{total} [mm/mm]: Deformação total

σ_v [MPa]: Tensão verdadeira

E [MPa]: Módulo de elasticidade

3.2 Simulação Numérica – ANSYS *Student Edition* 18.2

Nesta seção será descrito as etapas realizadas para simular o processo de rebitagem das espigas através do módulo *Static Structural* do ANSYS® *Workbench*.

3.2.1 Comportamento do Material – Aço X22CrMoV12-1

O comportamento plástico do aço X22CrMoV12-1 foi modelado através das leis de encruamento isotrópico (a) *Multilinear Isotropic Hardening* (Endurecimento Isotrópico Multilinear) e (b) *Bilinear Isotropic Hardening* (Endurecimento Isotrópico Bilinear), apresentadas pela Fig. 9. Essas leis tratam de uma idealização do diagrama tensão-deformação plástica, sendo que a opção *Multilinear Isotropic Hardening* representa o efeito do encruamento, ou o aumento da resistência na fase plástica estável.

A opção *Bilinear Isotropic Hardening* neste caso trata o material como sendo perfeitamente plástico, ou seja, o material quando atingir o limite de escoamento deforma-se sem elevar a resistência mecânica, deste modo, não associa o efeito do encruamento (Alves Filho, 2012). Este modelo foi utilizado na modelagem do comportamento na temperatura de 600 °C, devido à proximidade entre o limite de escoamento e o limite de resistência (baixo encruamento).

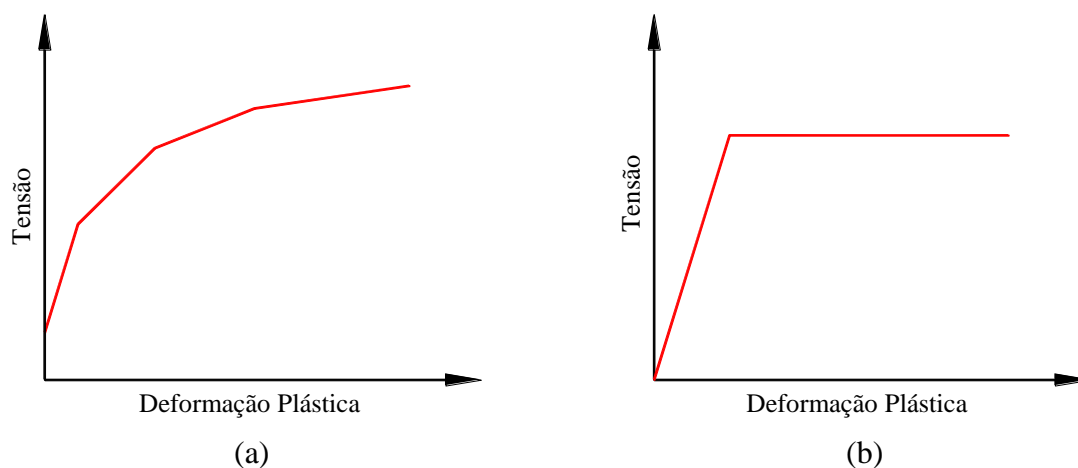


Figura 9 – Leis de encruamento isotrópico, (a) *Multilinear Isotropic Hardening* e (b) *Bilinear Isotropic Hardening*

3.2.2 Geometria

A geometria do sistema de conformação (espiga, bandagem e punção) foi criada no *SpaceClaim* (CAD) que está presente no pacote da versão *ANSYS Student Edition 18.2*. Este modelo foi simplificado para ser analisado em 2D com um comportamento *Axisymmetric*, neste é considerado apenas uma semi-seção da geometria conforme Fig.10. O modelo com simetria axial utiliza o eixo Y como o responsável pela revolução desta simplificação, representando ainda a coordenada axial, assim como o X representa a coordenada radial.

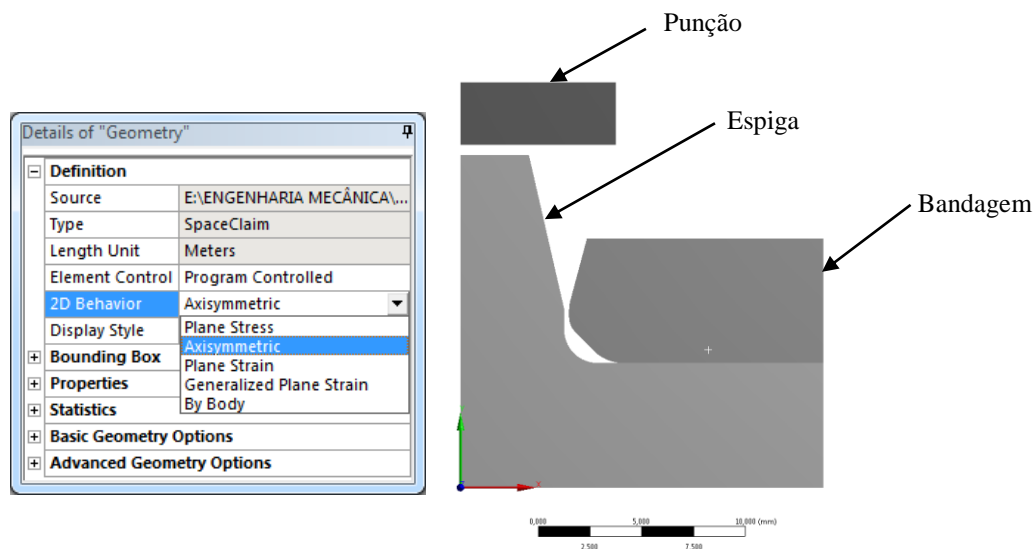


Figura 10 – Simplificação no comportamento da geometria.

3.3 Tipos de Contatos e Condições de Contorno

A condição de contato entre a espiga e a bandagem foi definida como do tipo *frictional*, com um coeficiente de atrito $\mu = 0,1$, e seus detalhes podem ser observados na Fig. 11. A Figura 12 mostra o contato entre a punção e a espiga, definido como do tipo *frictional*, com um coeficiente de atrito $\mu = 0,005$, o baixo coeficiente de atrito foi atribuído a este último contato afim de eliminar problemas de convergência do modelo.

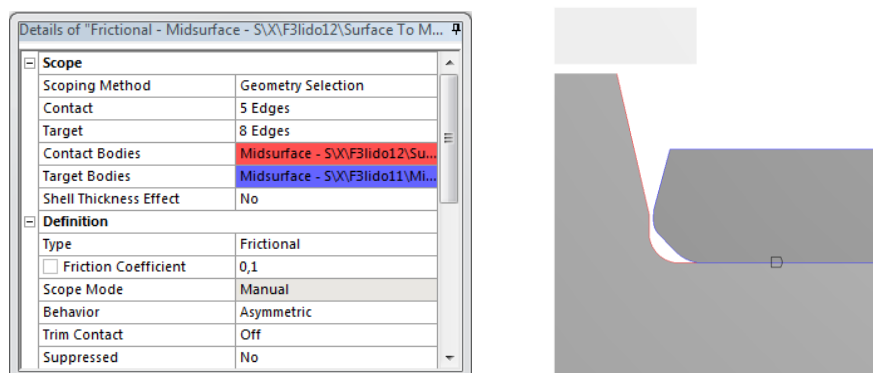


Figura 11 – Contato entre a espiga e a bandagem.

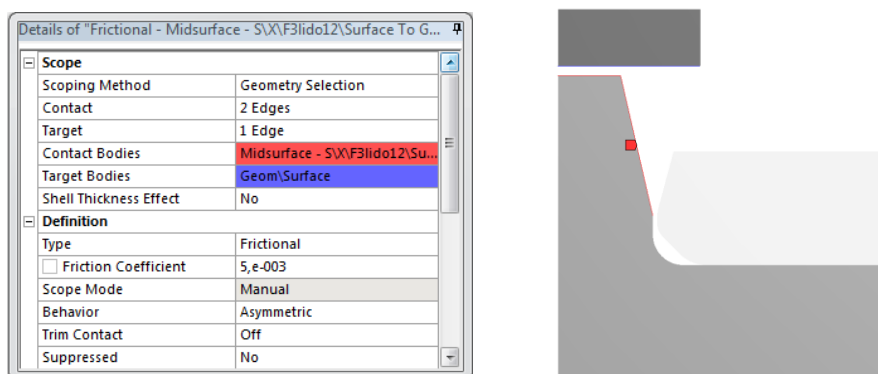


Figura 12 – Contato entre a punção e a espiga.

Para as condições de contorno foram utilizadas restrições do tipo *Displacement* e *Remote Displacement*, estas condições possibilitam controlar os deslocamentos dos nós presentes nas faces, arestas e pontos, através de constantes ou funções, como exemplo. As configurações das restrições podem ser observadas na Fig. 13 e na Tab. 3.

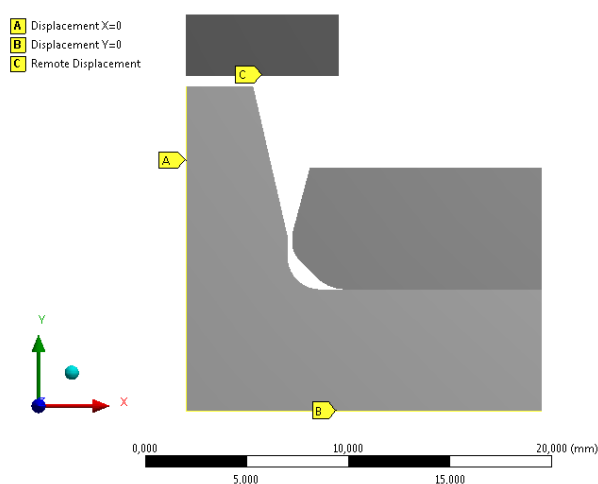


Figura 13– Condições de contorno utilizadas no modelo.

Tabela 3 – Condições de contorno utilizadas no modelo.

Item	Entidade	Tipo da restrição	Condição
A	Aresta	<i>Displacement</i>	Livre apenas no eixo Y
B			Livre apenas no eixo X
C	Face	<i>Remote Displacement</i>	Livre apenas no eixo Y

A restrição “C” controla o deslocamento da punção de rebite e sua configuração é indicada na Fig. 14.

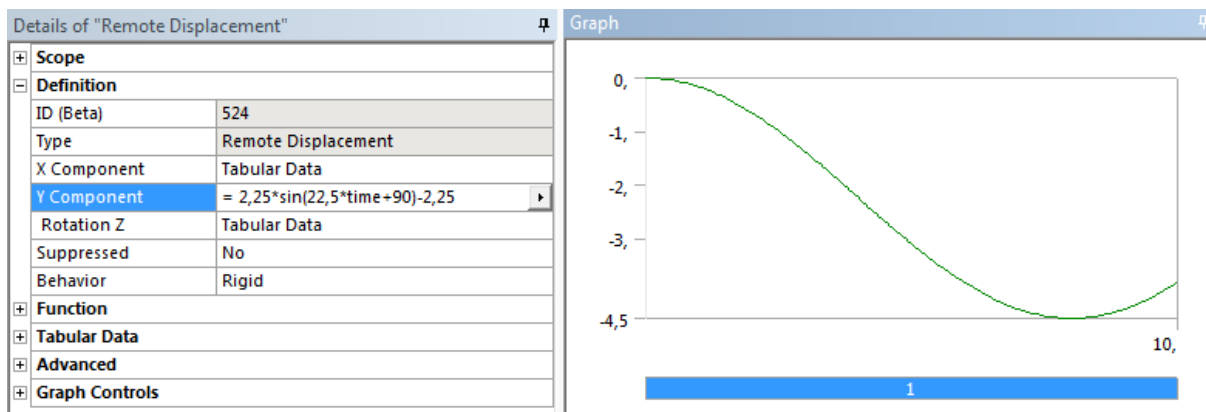


Figura 14 – Configuração do deslocamento da punção.

A punção desloca-se por meio de uma função senoidal com domínio do tempo, essa função foi utilizada para suavizar a entrada e a saída do contato entre a ferramenta de rebiteagem e a espiga, otimizando a convergência do modelo.

3.4 Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos possui maior densidade nas regiões de contato e no raio de arredondamento da espiga, sendo todos elementos de segunda ordem. Na Fig. 15 são mostrados os detalhes da malha com a quantidade de nós e elementos.

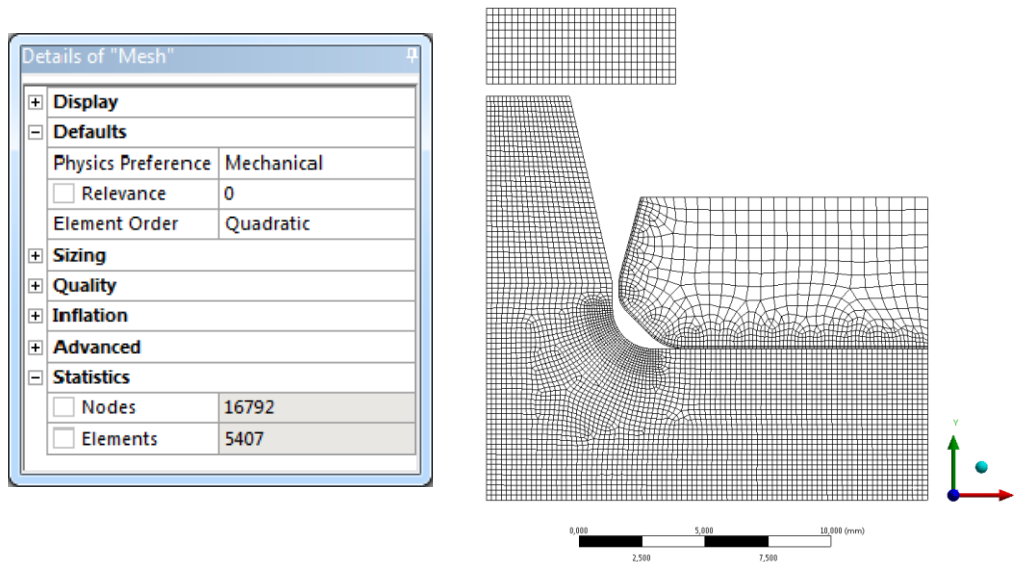


Figura 15 – Detalhes da malha de elementos finitos.

A discretização de elementos finitos deve obedecer alguns critérios de qualidade de malha referentes à forma do elemento. A Fig. 16 indica os critérios avaliados através do ANSYS, sendo eles o *Skewness* e o *Element Quality*.

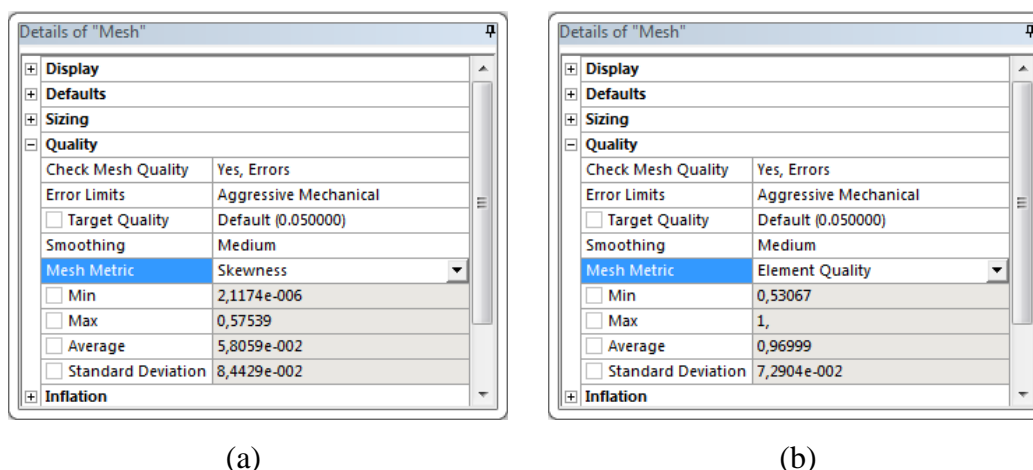


Figura 16 – Qualidade da malha de elementos finitos.

O critério apresentado na Fig. 16 (a) trata-se do *Skewness*, este critério avalia a distorção do elemento em relação ao elemento ideal. Este critério varia de 0 à 1, onde 0 representa a situação ideal e 1 o pior caso. Em (a) podemos observar que a média do critério *Skewness* está com 0,05806 com desvio padrão de 0,08443.

O segundo critério é o *Element Quality*, em análises 2D este fornece uma relação da área com a soma dos quadrados dos comprimentos das arestas para cada elemento, conforme equação abaixo. Este critério varia entre 0 e 1, sendo 1 a melhor situação, em (b) pode-se observar a que a média está com aproximadamente 0,97 e desvio padrão de 0,073.

$$Quality = C \times \left(\frac{Área}{\sum(ComprimentoAresta)^2} \right) \quad (4)$$

Onde:

Elementos triangulares $C = 6,92820323$

Elementos quadrangulares $C = 4,0$

3.5 Configurações de Análise do Modelo

Para o controle de não linearidade foi utilizado a opção *Full* do método de Newton Raphson, que por sua vez é mais robusto e de fácil convergência (Cataneo, 2016). O *solver* do modelo foi optado em permanecer como *Program Controlled*. Na opção de controle de *Step* foi definido um *step* com duração de 10 segundos divididos em *substeps*, conforme a Fig. 17.

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	10, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100,
Minimum Substeps	10,
Maximum Substeps	1000,
Step Identifier	Carregamento
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Full
Force Convergence	Program Controlled

Figura 17 – Configurações da análise.

3.6 Força de Rebitagem

Com a finalidade de analisar a simulação e a condição real de deformação da espiga, foi realizado um ensaio experimental, obtendo uma aproximação da força máxima necessária para preencher a espiga no furo da bandagem em temperatura ambiente. A medição foi feita através do manômetro acoplado na prensa, em seguida foi calculada a força máxima por meio da equação (5) (De Negri, 2004). Para isso, a bandagem e a espiga da palheta foram representadas através do conjunto indicado na Fig. 18. O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica BOVENAU com capacidade de 30 toneladas conforme a Fig. 19.

$$F = P \times A \quad [kN] \quad (5)$$

Onde:

F [kN]: Força máxima

P [MPa]: Pressão máxima na prensa

A [mm²]: Área de avanço da prensa

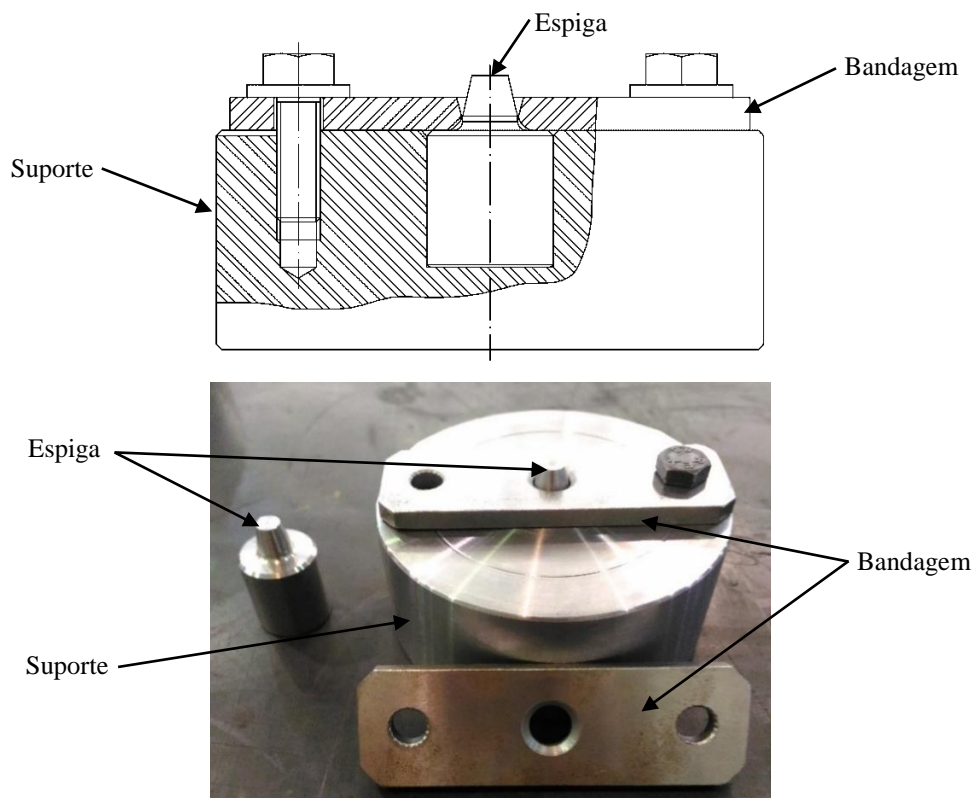


Figura 18 – Conjunto de peças do ensaio prático.

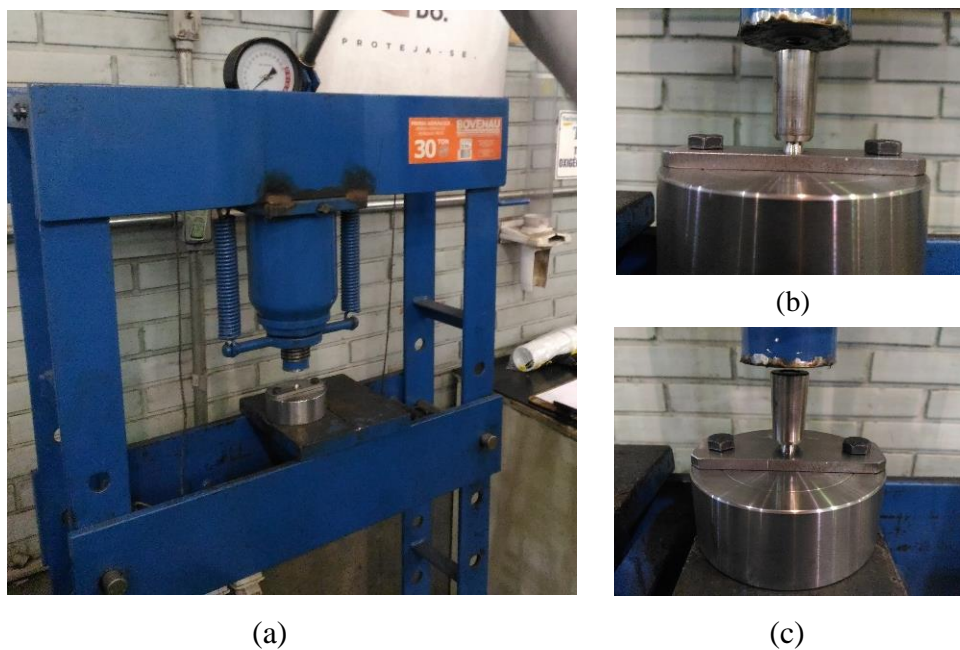


Figura 19 – Ensaio prático, (a) prensa utilizada, (b) e (c) configuração inicial do ensaio.

4 Resultados e Análises

Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos nos procedimentos realizados e comparado estes com valores normativos e resultados de ensaios práticos.

4.1 Material Utilizado – Aço X22CrMoV12-1

A Tab. 4 apresenta o resultado da composição química média do material utilizado nos ensaios de tração e testes experimentais práticos. Comparando estes com os valores máximos e mínimos especificados pela Norma EN10269, conclui-se que este material atende as especificações da norma.

Tabela 4 – Comparação da composição química realizada com valores da norma EN10269.

Teores	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
% Massa	0,22	0,53	0,006	0,002	0,29	0,69	11,06	0,91	0,26
Máx. Norma	0,24	0,90	0,025	0,015	0,50	0,80	12,50	1,20	0,35
Mín. Norma	0,18	0,40	-	-	-	0,30	11,00	0,80	0,25

4.1 Ensaio de Tração

O diagrama de tensão-deformação de engenharia mostrado na Fig. 20 foi gerado através dos ensaios de tração, onde os valores de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento mínimo foram comparados com a Norma EN10269, como mostra a Tab. 5. A partir das equações (1), (2) e (3) foi calculado o diagrama tensão-deformação plástica para cada temperatura, onde foram utilizadas para modelar o comportamento plástico do material no *software* ANSYS® através das leis de encruamento *Multilinear Isotropic Hardening* e *Bilinear Isotropic Hardening* conforme é indicado na Fig. 21 e na Tab. 6.

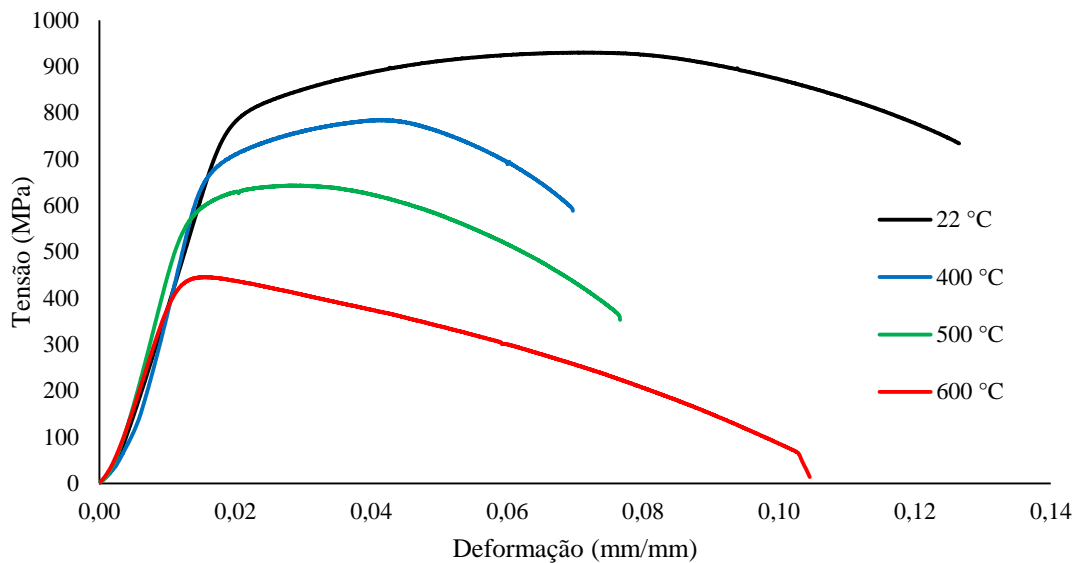


Figura 20 – Diagrama tensão-deformação de engenharia.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço X22CrMoV12-1 (EN 10269, 2014).

Tratamento Térmico	LE _{0,2} ¹ (MPa)	LR ² (MPa)		Alongamento Mínimo (%)
		Mín.	Máx.	
Temperado e Revenido ³ QT1	>600	800	950	14
Temperado e Revenido ⁴ QT2	>700	900	1050	11
Ensaio de Tração	787,20	929,30		28,4

¹Limite de Escoamento; ²Limite de Resistência; ^{3,4}Variantes do Revenido

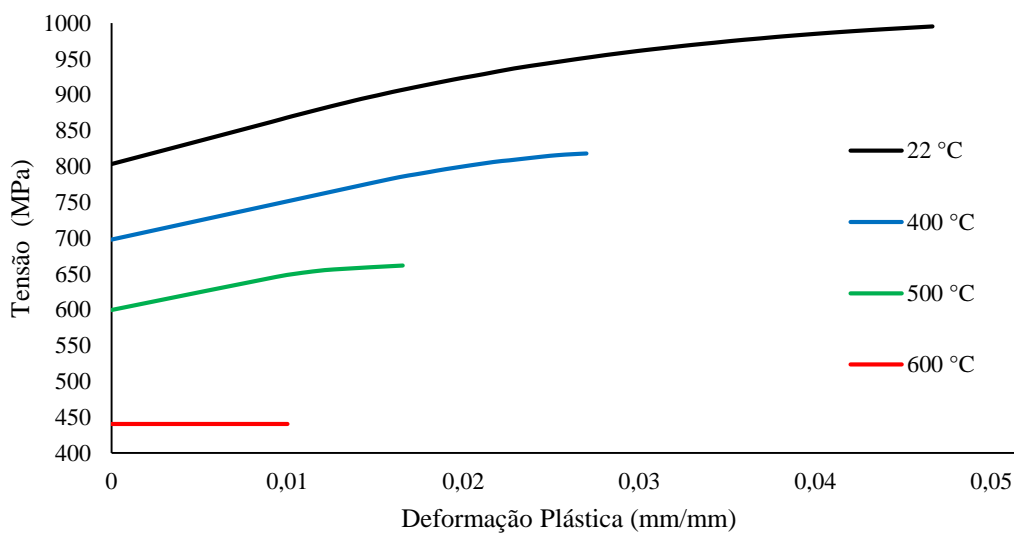


Figura 21 – Curva tensão *versus* deformação plástica.

Tabela 6 – Dados dos ensaios de tração

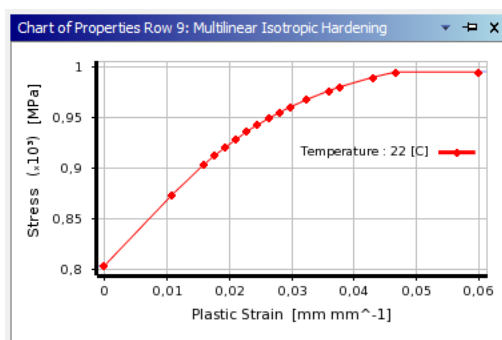
Temperatura (°C)	σ'_0 (MPa)	ϵ'_0 (mm/mm)	σ'_u (MPa)
22	803,21	0,0204	995,16
400	697,62	0,0170	817,77
500	599,66	0,0146	661,78
600	440,72	0,0131	442,50

4.1 Simulação

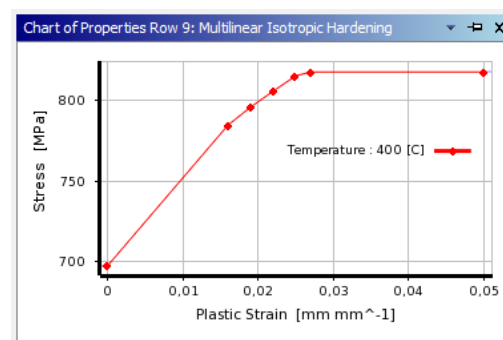
Os resultados das simulações apresentados a seguir são focados no raio de arredondamento da espiga, cuja região que apresentou falhas em determinados procedimentos de rebiteagem.

4.1.1 Curvas Multilinear Isotropic Hardening e Bilinear Isotropic Hardening

As curvas de encruamento mostradas na Fig. 22 são derivadas do diagrama tensão-deformação plástica da Fig. 21. Para as temperaturas de 500, 400 °C e ambiente foram utilizadas curvas *Multilinear Isotropic Hardening*, já para a condição em 600 °C foi utilizado a curva *Bilinear Isotropic Hardening* com o módulo tangente igual à zero, caracterizando para esta condição o comportamento do material como perfeitamente plástico.



(a)



(b)

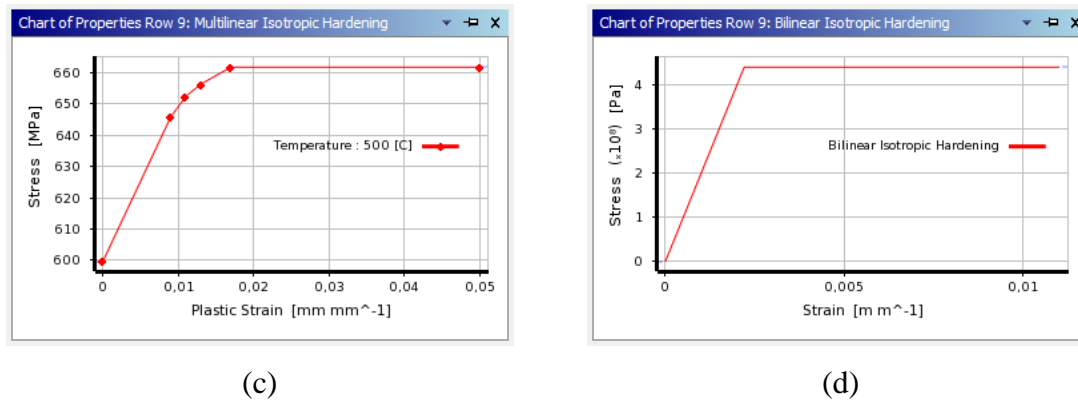
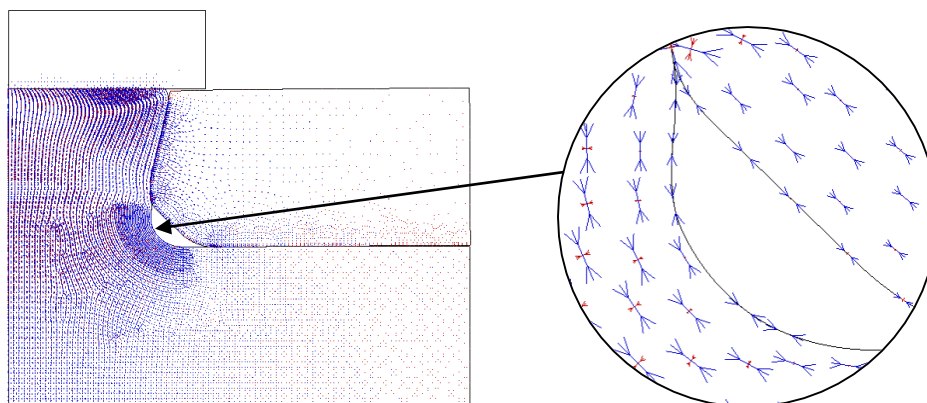


Figura 22 – Curvas de encruamento, (a) 22 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C, (d) 600 °C.

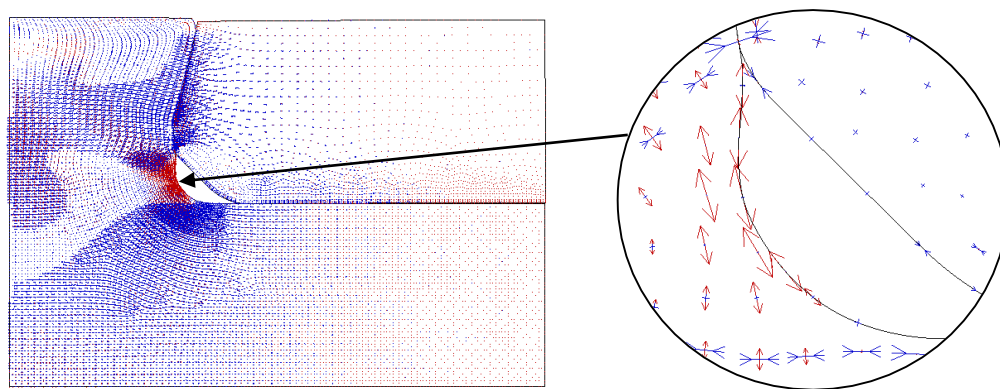
4.1.2 Análise das Tensões

O resultado dos vetores das tensões principais máximas indicam a natureza do esforço (tração ou compressão) exercido pela espiga durante a simulação. Conforme a Fig. 23 (a), a região do raio da espiga sofre esforço de compressão quando a punção está na fase de carregamento. Entretanto quando ocorre o descarregamento, sucede o relaxamento das tensões, onde é possível observar as tensões residuais. A Fig. 23 (b) revela que a região do raio passa a sofrer esforços de tração após o descarregamento, constatando que as tensões no raio são capazes de nuclear ou propagar trincas.

Todas as condições simuladas apresentaram concentração de tensões trativas no raio da espiga, variando a intensidade de acordo com cada temperatura. Essas tensões tiveram valores muito próximos ao limite de resistência do material, mesmo melhorando a deformação, não eliminariam a nucleação ou propagação de um defeito ou descontinuidade no raio de arredondamento da espiga como exemplo, oriunda do processo de fabricação da palheta.



(a)



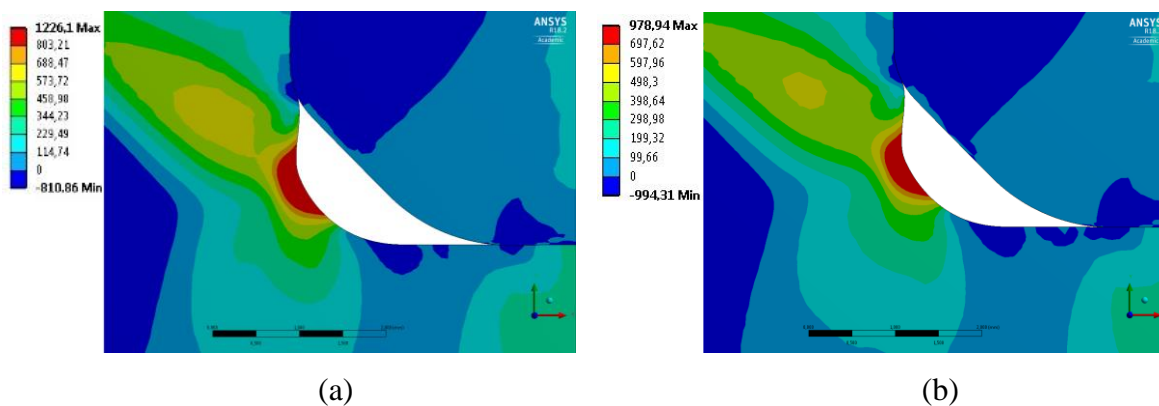
(b)

Figura 23 – Vetores das tensões principais máximas (a) carregado, (b) descarregado.

Os vetores indicam que a tensão máxima principal é a tensão predominante no raio da espiga, tornando-se trativa após o descarregamento, como mostra a Figura 23. As tensões principais máximas para cada condição simulada pode ser observada na Fig. 24.

A simulação à 600 °C apresentou uma melhor distribuição das tensões na região concentradora em relação as demais condições, a mesma se encontra no início da faixa de temperatura de trabalho a morno, esta faixa apresenta o começo da recuperação e recristalização do material, oferecendo uma melhor ductilidade.

As tensões equivalentes de von Mises representam as tensões residuais para cada caso e são indicadas pela Fig. 25. Com o aumento da temperatura verificou-se um aumento de regiões com tensões acima do limite de escoamento, porém apenas o raio da espiga contém tensões trativas como indicado pela Fig. 23 (b). A temperatura influenciou em uma melhor distribuição das tensões no raio da espiga, entretanto o modelo simulado não considera os efeitos da recristalização e recuperação da ductilidade.



(a)

(b)

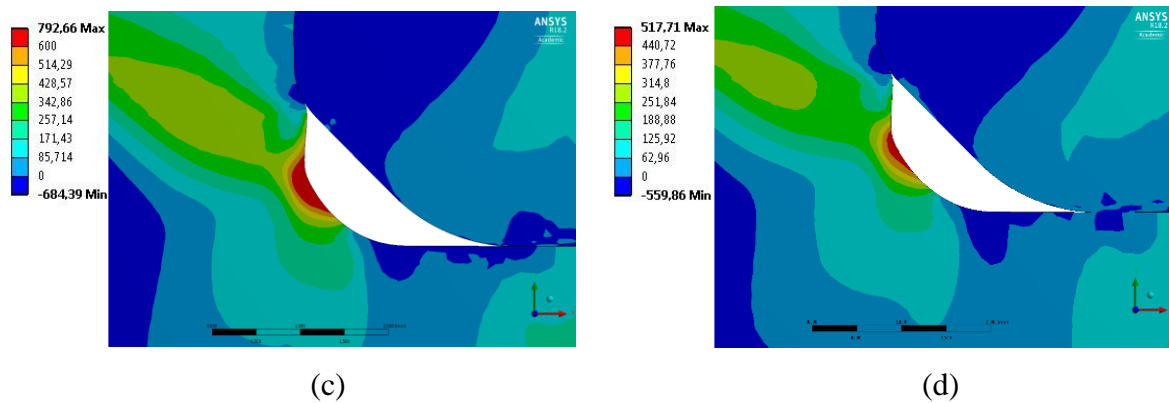


Figura 24 – Tensão máxima principal [MPa], (a) 22 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C, (d) 600 °C.

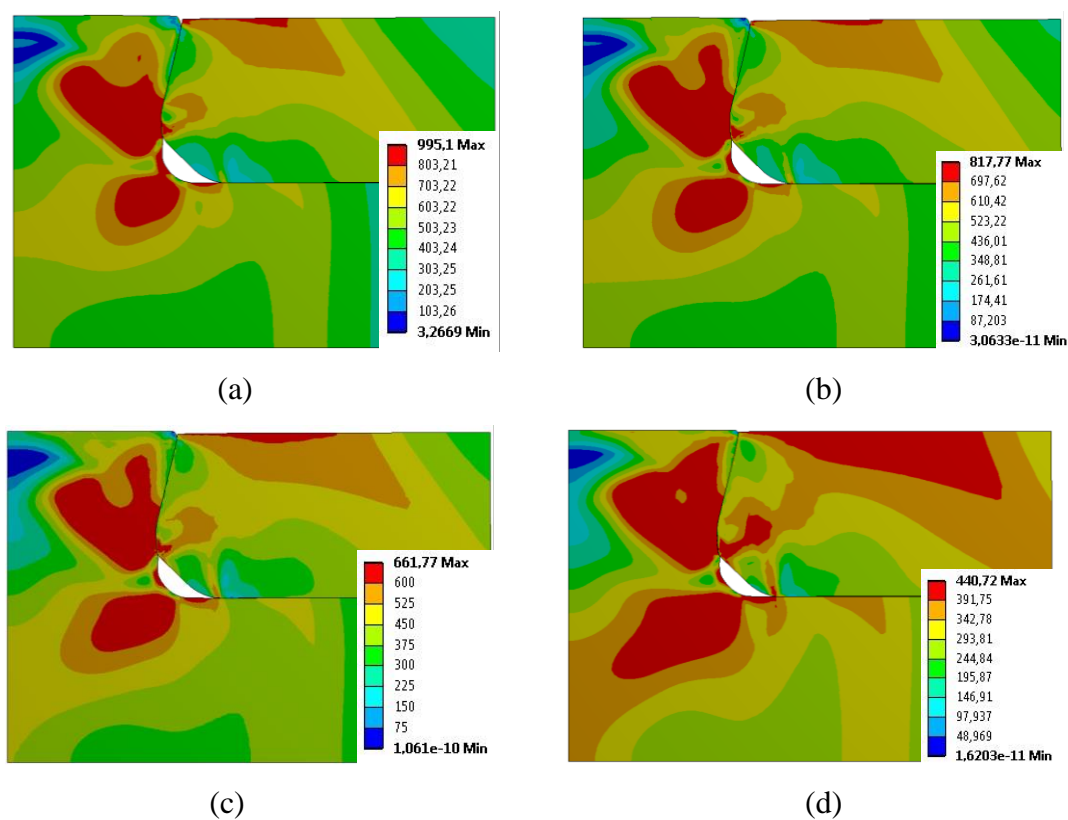


Figura 25 – Tensões residuais [MPa], (a) 22 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C, (d) 600 °C.

Tabela 7 – Valores máximos de tensão residual encontrados no raio da espiga.

Temperatura (°C)	σ'_o (MPa)	σ'_u (MPa)	Simulação (MPa)
22	803,21	995,16	994,98
400	697,62	817,77	817,64
500	599,66	661,78	661,69
600	440,72		440,62

4.2 Força de Rebitagem

A força máxima simulada para preencher o furo da bandagem em cada temperatura pode ser observada na Fig. 26. O resultado do ensaio prático está indicado na Fig. 27, em (a) pode ser observado a sollicitação de 23 toneladas para preencher o furo da bandagem, indicada pelo manômetro. A simulação obteve uma força de 232,2 kN na temperatura ambiente, já o ensaio experimental obteve 225,6 kN. Para esta condição, o valor obtido pela simulação é próximo do ensaio prático, resultando em uma diferença de aproximadamente 3%. A força para a temperatura de 600 °C obteve uma queda mais acentuada comparando com as temperaturas de 400 e 500 °C, isto ocorre devido uma maior redução do limite de escoamento, situado na faixa de trabalho a morno do aço X22CrMoV12-1. Na Fig. 27, em (b) e (c) é mostrado o resultado da união entre a bandagem e a espiga após o ensaio experimental.

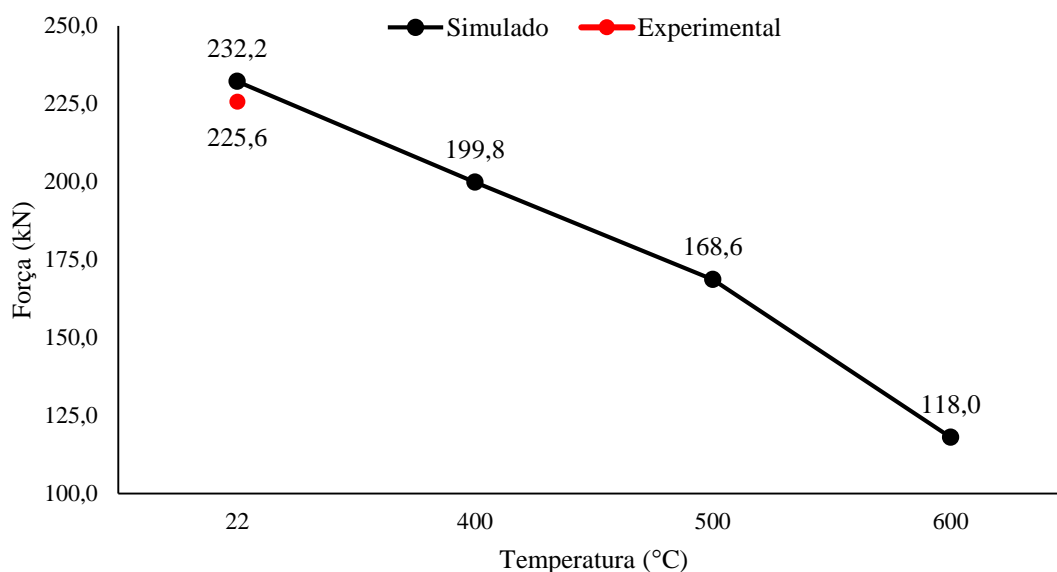


Figura 26 – Força de rebitagem simulada e experimental.



(a)



(a)



(c)

Figura 27 – Ensaio experimental, (a) indicação de 23 t para realizar a conformação, (b) e (c) união da bandagem na espiga.

5 Conclusão

O material utilizado neste estudo é o aço X22CrMoV12-1, onde os resultados da avaliação química e ensaios de tração atenderam as especificações de composição química e propriedades mecânicas da norma DIN EN10269.

Nos ensaios de tração o aço X22CrMoV12-1 apresentou uma redução do limite de escoamento com o aumento da temperatura, sendo que o ensaio a 600 °C teve uma queda mais acentuada desta propriedade devido ao início da recuperação e recristalização.

Os resultados encontrados com as simulações dos modelos são coerentes, visto que o valor da força máxima para conformar a espiga no furo da bandagem em temperatura ambiente foi muito próximo ao conjunto submetido ao ensaio experimental, sendo que a diferença máxima encontrada foi de 3%.

Na simulação, após a retirada da carga para conformar a espiga, a mesma apresentou concentração de tensões no raio de arredondamento em todas as condições simuladas, bem como apresentou esforços de tração nesta região (Fig. 22), local onde as falhas ocorreram, evidenciando a nucleação ou propagação de trincas durante as técnicas executadas para a validação do processo de rebitagem das palhetas.

A condição simulada em 600 °C obteve a menor concentração de tensão do raio de arredondamento da espiga e uma melhor distribuição das tensões residuais, além de solicitar a menor força para realizar o processo.

6. Referências Bibliográficas

Affonso, L.O.A.; Brambilla, P, A.; Rodrigues, M.; Almeida, W.P. “Análise de Causa Básica de Falha em Palheta de Turbina a Vapor”. 6o COTEQ, Salvador, 2002.

Alves F., A., “Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE/Análise Não Linear”. Ed. Érica, 1ª edição, São Paulo, Brasil, 2012, 320 p.

ANSYS. Manual de Instrução para Geração de Malhas. Disponível em: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/msh_book_wb.html. Acesso em: 17 de junho de 2018.

Bloch, P. H.; Singh P. M., “Steam Turbine: Design, Application and Rerating, Second Edition”. Ed. McGraw-Hill Companies, USA, 2008, 974 p.

CAE Associates. Using Stress-Strain Data in a Finite Element Simulation. Disponível em: <https://caeai.com/blog/using-stress-strain-data-finite-element-simulation>. Acesso em: 17 de junho de 2018.

Colpaert, H., “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”. Ed. Blucher, 4ª edição, São Paulo, Brasil, 2008, 652 p.

Cataneo, R., “Otimização do Projeto de um Para-Choque Traseiro para Veículos de Carga com PBTC acima de 23,5 T Utilizando a Técnica de Análise Não Linear”, Instituto ESSS de Educação, Pesquisa e Desenvolvimento – IESSS, Porto Alegre/RS, Brasil, 2016, 22 p.

Comeli, F. W., 2016, “Estudo da Influência dos Parâmetros de Tratamento Térmico sobre a Resistência a Fluência e Vida Residual do Aço DIN X22CrMoV12-1 Utilizado em Palhetas de Turbina a Vapor”, Exame de Qualificação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, 100 p.

De Negri, V. J. Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Controle e Automação: Parte I – Princípios Gerais da Hidráulica e Pneumática. Florianópolis, 2001. 23 p. (Certificado de Registro ou Averbação número 328.561, Livro 602, Folha 221. Escritório de Direitos Autorais. Rio de Janeiro, 11 de Agosto de 2004).,

EUROPEAN STANDARDS – EN 10269 (2014-2). “Steels and Nickel Alloys for Fasteners with Specified Elevated and/or Low Temperature Properties”. Germany, 2014.

Flutt, A.F. “Estudo Numérico do escoamento ao Redor de Um Aerofólio Montado em Uma Grade Linear de Turbomáquina”. Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ, 2008.

Giorgini, D. G., “Otimização do Processo de Trefilação através da Proposição de um Modelo de Previsão da Força de Trefilação Adequado às Condições Reais da V & M do Brasil”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte/MG, Brasil, 132 p.

Lemos, G., 2015, “Efeito da Temperatura de Revenido na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas em Alta Temperatura do Aço X22CrMoV12-1”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 118 p.

Meyers M. A., Chawla K.K., “Princípios de Metalurgia Mecânica”. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1982, 505 p.

Rodrigues, J., Martins, P., “Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. I”. Ed. Escolar, 2ª edição, Lisboa, Portugal, 2010, 695 p.

Sanders, W. P., “Turbine Steam Path Maintenance and Repair”. Ed. PennWell Corporation, Vol. 2. USA, 2002, 974 p.

Sanders, W. P., 1987, “Turbine Steam Path Components”, Turbomachinery International Publications, Norwalk, Conn, 137 p.

Schaeffer, L. Manufatura por Conformação Mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016. 218 p.