

# **ESTUDO DA TENSÃO RESIDUAL DURANTE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CUNHAS PARA PROTENSÃO DE ESTRUTURAS**

Gustavo Rocha Sanchez <sup>1</sup>; Éd Claudio Bordinassi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este trabalho teve como objetivo estudar e analisar todo o processo de fabricação de uma cunha para protensão de estruturas, no que se diz respeito às tensões residuais que serão produzidas em cada etapa da produção. Através deste estudo, encontrar novos parâmetros no processo de fabricação que visem melhorar a vida útil desta peça, reduzindo às tensões residuais de tração prejudiciais a vida da peça, ou acrescentando tensões residuais de compressão que serão benéficas. Foram selecionados parâmetros do processo para serem alterados, como o modo de refrigeração da usinagem, sendo feita a usinagem a seco e com a utilização de óleo solúvel, o desgaste das ferramentas de usinagem, o acabamento superficial utilizado, fazendo uma comparação entre o método utilizado atualmente pela empresa e o torneamento em duro, e o alívio de tensões da barra trefilada utilizada. Em todo este processo foram averiguadas a tensão residual superficial e a tensão residual máxima do perfil, e através disto escolhidos os melhores parâmetros a serem estudados. Os resultados mostraram que o desgaste na ferramenta de corte durante o processo de torneamento sem a utilização de um fluido refrigerante leva a uma superfície com tensões residuais trativas, enquanto que o torneamento utilizando óleo solúvel leva a uma superfície com tensões residuais compressivas. A normalização da barra trefilada que é utilizada como matéria prima, levou a um produto final com menores níveis de tensão residual superficial, enquanto que o torneamento em duro apresentou os melhores valores de tensão residual compressiva.*

## **Introdução**

Tensões residuais são definidas como as tensões que permanecem na peça após manufatura ou processamento do material, quando todas as outras forças externas e variações de temperatura são removidas. Os principais métodos de se inserir ou modificar um perfil de tensão residual são variações térmicas, deformações plásticas heterogêneas e mudanças químicas ou microestruturais. São de grande importância e devem ser levadas em conta e estudadas em vários processos de produção atual. Como se trata de uma tensão que permanece no material mesmo quando todas as outras tensões foram removidas, deve-se preocupar com sua adição à esforços que ainda serão exercidos sobre o material, podendo levá-lo a ruptura ou a falhas críticas (Rossini, et al., 2012; Withers, et al., 2008).

Estudos mostram que se pode diminuir as tensões residuais que serão negativas ao material mudando parâmetros de sua fabricação, como ainda, adicionar tensões residuais que irão auxiliar à peça em sua função, e assim melhorar sua vida útil (Dahlman; Gunnberg; Jacobson, 2004; Liu; Takagi; Tsukuda, 2004; Gunnberg; Escursell; Jacobson, 2006).

A tensão residual pode ter uma influência significativa sobre a vida sob fadiga em componentes de engenharia. Para uma avaliação exata da vida sob fadiga, será preciso um conhecimento detalhado do perfil de tensões residuais existentes e seu comportamento durante todos as etapas do processo de fadiga, começando na nucleação em seguida pelo crescimento e pôr fim a ruptura final. Em particular tensões de tração na superfície do material tendem a acelerar a iniciação e crescimento das fases do processo de fadiga, enquanto que tensões residuais de compressão na superfície, podem prolongar a vida sob fadiga (Webster; Ezeilo, 2001; Silva, 2010; Whithers; Bhadeshia, 2001).

Um dos processos de acabamento que vem sendo amplamente utilizados é o processo de torneamento em duro, que consiste em se efetuar um passe de acabamento no material endurecido. A geração de tensões residuais no torneamento em duro vem sendo estudada por vários pesquisadores, mostrando que o tempo de vida da peça é aumentado, graças à adição de tensões residuais de compressão na superfície usinada (Gunnberg; Escursell; Jacobson, 2006; Liu; Takagi; Tsukuda, 2004; Dahlman; Gunnberg; Jacobson, 2004).

## Objetivos

- Avaliar as tensões residuais geradas durante o processo de fabricação da cunha para protensão;
- Avaliar as tensões residuais geradas, após mudanças no processo de fabricação da mesma. Como a normalização da barra trefilada, a utilização do torneamento em duro como processo de acabamento, o desgaste da ferramenta de corte utilizada no tornamento e a utilização do fluido para refrigeração durante o torneamento;
- Comparar os valores obtidos e avaliar qual o processo é mais benéfico para a vida do produto;

## Materiais e Métodos

### Processo de fabricação da cunha

A cunha a ser estudada, passará por quatro processos de fabricação, sendo importante para o estudo caracterizá-los e acompanhar todas as variáveis envolvidas neles. Entre eles estão os processos de torneamento, rosqueamento, corte tripartido e tratamentos térmicos.

No primeiro processo, o de torneamento, a barra trefilada adquirida pela empresa, alimentará um torno CNC de modelo KIA superturn 15, onde acontecerão todos os processos de torneamento necessários para se alcançar a geometria final da cunha, como pode ser visto na Figura 1a. A barra será faceada, usinada com acabamento, furada longitudinalmente, e por fim será feito um canal e cortada. Todos os processos de torneamento feitos durante esta etapa tem parâmetros de usinagem estabelecidos pela empresa, assim como ferramentas de corte e suportes utilizados de acordo com a tabela 1. O controle de qualidade do processo de torneamento é feito através da medição de dimensões críticas para o funcionamento da peça, utilizando um paquímetro, além do controle de rugosidade superficial, utilizando um rugosímetro.

O processo de rosqueamento irá usinar uma rosca interna no furo longitudinal previamente aberto pelo torno, como pode ser visto na Figura 1b. Utilizando neste processo uma rosqueadeira Begra RS 120, com um macho máquina especial com cobertura de nitreto de titânio. O controle de qualidade do processo de rosqueamento é feito através de um relógio calibrador para concentricidade.

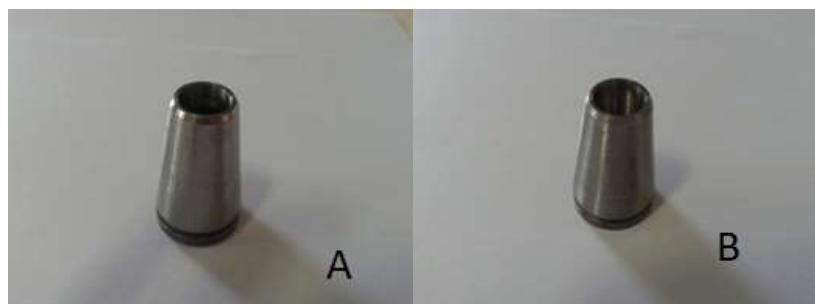


Figura 1 – Cunha após processo de torneamento (A) e Cunha após processo de rosqueamento (B).

Tabela1 – Ferramentas de corte e suportes utilizados no torneamento da cunha.

Processos	Ferramenta de corte	Suporte
Faceamento	WNMG 080408 MF4 TM4000	MWL ML 2525 M08
Desbaste	WNMG 080408 MF4 TM4001	MWL ML 2525 M09
Acabamento	TNMG 160404 MF2 TP 2500	PTJ NL2825 M16
Furação	ICP 117 IC908	DCN 11505816
Mandrilar	CCMT 060204 F1 TP2500	S08 KSCLR06
Canal	GIP 2,39 - 1,20	GHDR 25-13
Corte	LCMF 160302 FT CP500	CFML 2020 K03

O processo de corte consiste na utilização de uma serra de fita vertical da marca Ronemark para se cortar a cunha de protensão em três partes em um ângulo de 120°, como pode ser visto na Figura 2a. O controle de qualidade durante o processo de corte é feito através da medição de certas dimensões de referência do corte com o paquímetro, sendo repetida tal medição a cada 23 peças.

O último processo pelo qual a cunha de protensão passará, é o processo de tratamento térmico, como pode ser visto na Figura 2b, que serão a têmpora, o revenimento e a cementação da superfície.

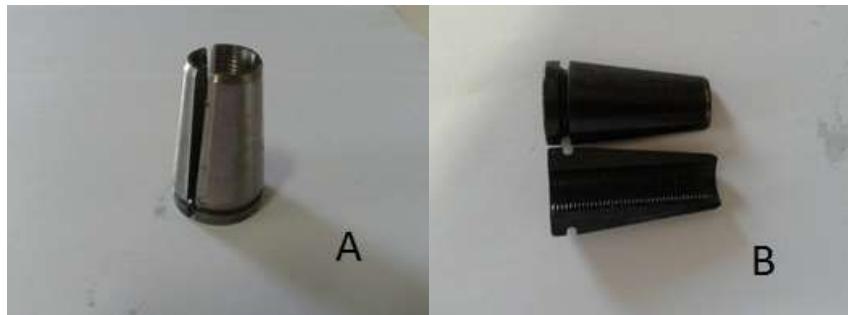


Figura 2 - Cunha após processo de corte (A) e Cunha após processo de tratamento térmico (B).

### **Corpos de Prova**

Para a caracterização do estudo, foram escolhidos corpos de prova durante todas as etapas do processo de fabricação da cunha, sendo seguidos todos os parâmetros utilizados pela empresa, sendo eles:

- Barra trefilada;
- Cunha após o processo de torneamento da barra trefilada;
- Cunha após o processo de corte;
- Cunha após o tratamento térmico.

Uma das variações estipulada foi o alívio de tensões na barra trefilada, através de um processo de normalização. Esta nova barra, foi submetida ao processo de fabricação da cunha, gerando assim os seguintes corpos de prova:

- Barra trefilada normalizada;
- Cunha após o processo de torneamento, sendo utilizada a barra normalizada;
- Cunha após o processo de corte, sendo utilizada a barra normalizada;
- Cunha após o tratamento térmico, sendo utilizada a barra normalizada.

Outra alteração feita no processo de fabricação da cunha foi à caracterização do efeito do desgaste da ferramenta e da refrigeração durante o processo de torneamento, onde foram utilizados os critérios de troca da ferramenta de corte adotados pela empresa, gerando assim os seguintes corpos de prova:

- Primeira cunha após a troca da ferramenta de corte, sendo utilizado óleo solúvel no torneamento;

- Última cunha antes da troca da ferramenta de corte, sendo utilizado óleo solúvel no torneamento (pastilha desgastada);
- Primeira cunha após a troca da ferramenta de corte, onde o processo de torneamento não possuiu refrigeração;
- Última cunha antes da troca da ferramenta de corte, onde o processo de torneamento não possuiu refrigeração (pastilha desgastada).

Por fim, a última alteração feita no processo de fabricação, foi o torneamento em duro da cunha, que consiste em se fazer o tratamento térmico antes do passe de acabamento final do processo de torneamento. Para este processo, a camada de cementação durante o tratamento térmico teve sua espessura aumentada, para que o passe de acabamento dado pelo torno alcançasse a camada desejada.

### **Processo de Medição das tensões residuais**

A técnica de medição escolhida para se determinar a tensão residual em cada um dos corpos de prova foi a técnica de furo cego, uma técnica destrutiva que consiste em se usinar um pequeno furo (entre 1,8 a 2 mm) no local onde se pretende calcular as tensões residuais, e através de um extensômetro, medir a deformação causada no material pelo alívio de tensões da usinagem, chegando através da lei de Hooke, da teoria da elasticidade, na distribuição das tensões residuais aliviadas em função da profundidade do furo. Todas as medições foram realizadas através de um convênio com o Centro Universitário da FEI.

A primeira etapa da técnica de furo cego a ser desenvolvida, é a preparação dos corpos de prova com colagem dos extensômetros na superfície a ser usinada, sendo utilizado um extensômetro de codificação PA-06-062RE-120-L, com base de polyamida, sendo o comprimento da grelha de 1,57 mm e o diâmetro final de alvo do furo de 1,59 mm.

Como o lixamento é um processo de desbaste, acaba induzindo tensões residuais no material, que podem comprometer as medições, portanto um ataque químico foi realizado, utilizando um ácido de solução de 10% de Nital, com uma composição de 200 ml de ácido Nítrico HNO<sub>3</sub>, e 1800 ml de álcool etílico, para se conseguir uma superfície de aderência limpa, sem nenhuma irregularidade. Após o ataque, o extensômetro foi posicionado na superfície com o auxílio de uma fita adesiva, e então colada utilizando-se uma cola adesiva instantânea permabound 793 e um ativador para acelerar o processo de cura, finalizando a preparação do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 3.



Figura 3. Corpo de prova após a preparação, e pronto para medição.

O sistema utilizado para a medição foi o RESTAN (Residual Stress Analyzer) – MTS3000, desenvolvido, patenteado e produzido pela SINT technology conforme a Figura 4, em conjunto com o Sistema de medição eletrônico de variáveis mecânicas, o Spider 8 da empresa HBM. A ferramenta de corte utilizada para a usinagem do corpo de prova foi uma fresa de Carbeto de Tungstênio da marca Komet, que possui uma rotação máxima recomendada de 450.000 rpm. Como o desgaste da ferramenta de corte que irá criar o furo da técnica de furo cego pode alterar a medição de tensão residual, foi determinada a troca da ferramenta a cada 3 corpos de prova, ou a utilização dela apenas uma vez para corpos de prova com uma dureza elevada.



Figura 4. Sistema automático de medição RESTAN MTS3000.

O número de intervalos definidos nas medições foi 30, com uma profundidade máxima do furo de 0,8 mm, onde para a ferramenta de corte foi adotado um avanço de 0,2 mm/min e uma rotação de 400.000 rpm, dentro do limite estipulado pelo fornecedor.

Durante o processo de usinagem, o sistema de aquisição de dados eletrônico captou as deformações medidas pelo extensômetro, e as repassou para o programa de medição do RESTAM, gerando assim um gráfico de deformação pela profundidade. Com os dados da deformação em função da profundidade, foi possível gerar os gráficos da variação da tensão residual através da profundidade do material, utilizando o programa computacional H-Drill, aplicando o método da integral.

## Resultados e Discussões

As tensões residuais obtidas durante o experimento foram organizadas entre tensões residuais superficiais, e o valor máximo de tensão residual obtido no perfil, sendo ainda divididos em tensões residuais na direção longitudinal (direção Y) e tensões residuais na direção axial (direção X). Destes dados, foram montados os gráficos que serão apresentados a seguir para a discussão das variações estipuladas, e como as mesmas afetam a tensão residual.

A Figura 5 mostra a comparação do efeito do desgaste da ferramenta na tensão residual longitudinal, na superfície dos corpos de prova, variando-se a refrigeração do processo.

### **Relação entre a tensão residual com o desgaste da ferramenta e método de refrigeração.**

A tensão residual encontrada na superfície da primeira cunha onde foi utilizado óleo solúvel durante o torneamento, que pode ser visto na Figura 5, se mostrou mais compressiva em módulo do que a primeira cunha que foi usinada sem a utilização de um fluido refrigerante, mostrando que o impacto térmico durante a usinagem foi menor na utilização de

refrigeração, levando o impacto devido à deformação plástica durante o torneamento a ser o mais atuante, gerando uma superfície com tensões residuais mais compressivas.

De acordo com o trabalho de “Liu; Takagi; Tsukuda, 2004” foi concluído que o desgaste da ferramenta, leva a um processo térmico de maior energia, relacionado com o aumento da fricção entre a ferramenta desgastada e a peça a ser usinada, gerando uma superfície com tensões residuais de tração devido aos impactos térmicos durante a usinagem, enquanto os impactos mecânicos irão influenciar regiões mais profundas do material. Com a utilização do óleo solúvel como refrigeração do processo, se tem uma diminuição do efeito térmico causado pelo desgaste da ferramenta de corte, fazendo com que a tensão residual na superfície aumente em módulo, mas permaneça compressiva, pelos impactos mecânicos que ocorrem durante a usinagem.

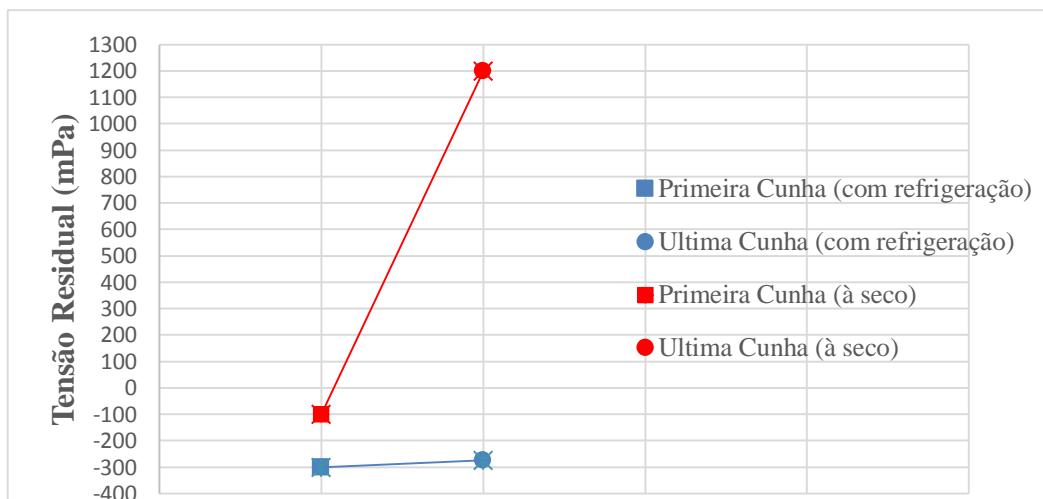


Figura 5- Comparação entre a tensão residual superficial na direção longitudinal em função do desgaste da ferramenta e da refrigeração utilizada no processo.

Portanto, o aumento do desgaste da ferramenta levará a uma usinagem com maiores valores de temperatura, que levarão a mudanças no perfil de tensões residuais na superfície usinada, acrescentando tensões de tração. A utilização de refrigeração irá diminuir o impacto da temperatura de contato no perfil de tensões residuais, fazendo dela a melhor opção para a vida da peça.

#### **Variação da tensão residual durante o processo de produção e efeito da normalização da barra trefilada**

A Figura 6 mostra a variação da tensão residual superficial, na direção longitudinal durante todo o processo de fabricação da cunha para protensão de estruturas utilizando a barra trefilada e a barra trefilada normalizada, enquanto a Figura 7 mostra a variação da tensão residual máxima do perfil, na direção axial durante todo o processo de fabricação da cunha para protensão de estruturas utilizando a barra trefilada e a barra trefilada normalizada.

Na Figura 6, pode-se observar que os valores de tensão residual encontrados na superfície da barra trefilada foram compressivos, como se pode perceber com os dados obtidos na literatura “Menezes (2008)” se deve à deformação plástica que é causada durante a etapa final do processo de trefilação, geralmente ligados ao processo de polimento e endireitamento da barra trefilada. A barra trefilação que passou pelo processo de normalização não demonstrou mudanças significativas na tensão residual superficial, sendo provável que o tratamento térmico utilizado não foi o suficiente para retirar o encruamento causado pelo passe final do processo de trefilação.

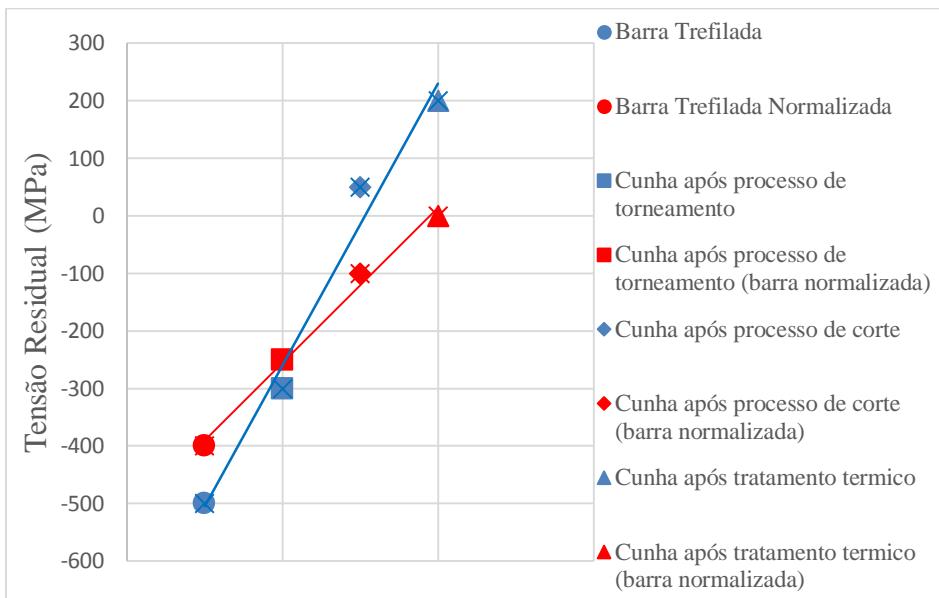


Figura 6 – Comparação entre a tensão residual superficial na direção longitudinal para o processo de fabricação utilizando a barra trefilada e a barra trefilada normalizada.

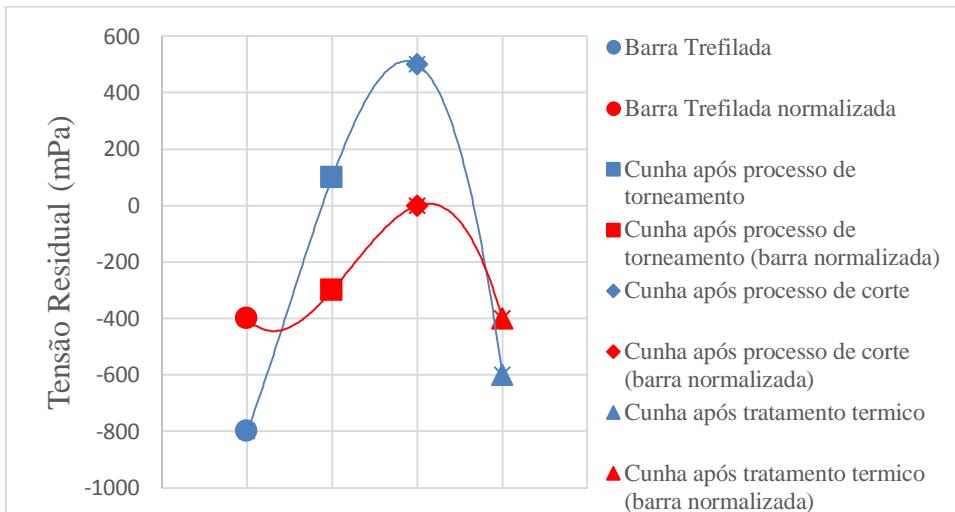


Figura 7 – Comparação entre a tensão residual máxima do perfil na direção axial para o processo de fabricação utilizando a barra trefilada e a barra trefilada normalizada.

Os valores de tensão residual obtidos na superfície da cunha após o processo de torneamento, que pode ser visto na Figura 6, foram compressivas, tanto para a utilização da barra trefilada como ela é adquirida pela empresa atualmente, como para a barra trefilada que passou por um processo de normalização visando aliviar as tensões residuais geradas durante o processo de trefilação da mesma. Este resultado mostra que as tensões residuais induzidas pela deformação plástica causada pelo processo de torneamento, são mais significativas do que os efeitos térmicos, que é justificado pelo uso de óleo solúvel como refrigeração em ambos os casos, diminuindo drasticamente o calor gerado.

Como foi discutido na literatura “Penha; Vendramin; Canale, (2012)” durante o processo de tempera, a superfície resfria mais rapidamente que o centro, sofrendo primeiro a transformação martensítica. Como tal transformação é uma expansão volumétrica, se a expansão de transformação no centro é maior que a contração térmica da superfície já endurecida, surgem tensões residuais trativas na superfície, enquanto que com o aumento da profundidade se tem tensões residuais de compressão, o que explica os valores encontrados na superfície, como pode-se ver na Figura 6, e o máximo valor de tensões residuais no perfil para a cunha, após o processo de tratamento térmico, como pode-se ver na Figura 7. A tensão

residual encontrada no final do processo onde foi utilizada a barra trefilada normalizada se mostrou menos trativa, sendo provável que este resultado se deve ao fato do tratamento térmico utilizado ao final do processo de produção não foi suficiente para retirar as tensões residuais criadas pelo encruamento e variações de temperaturas ocorridas durante a produção.

#### **Comparação das tensões residuais envolvidas no processo de torneamento em duro com os processos de torneamento convencionais**

A Figura 8 mostra o perfil de tensões residuais obtidos através da profundidade do material para a cunha de protensão de estruturas após o tratamento térmico, enquanto a Figura 9 mostra o perfil de tensões residuais obtidos através da profundidade do material para a cunha de protensão de estruturas após o torneamento em duro.

A Figura 10 mostra a comparação da tensão residual superficial na direção longitudinal e da tensão residual máxima do perfil na direção axial entre o processo de torneamento em duro da cunha para protensão de estruturas, e os processos de torneamento utilizados atualmente pela empresa, sendo utilizando a barra trefilada normal e a barra trefilada que foi normalizada.

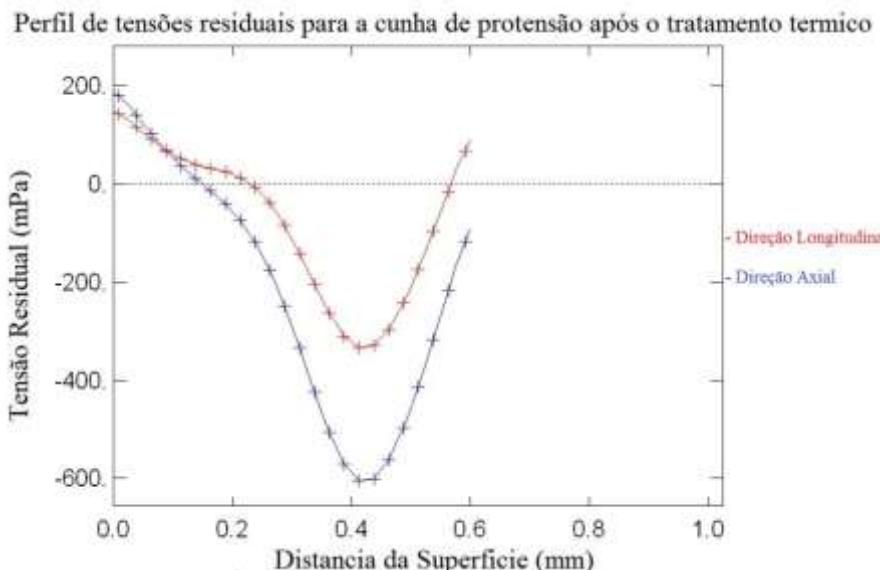


Figura 8 – Perfil de tensão residual apó o processo de tratamento térmico.

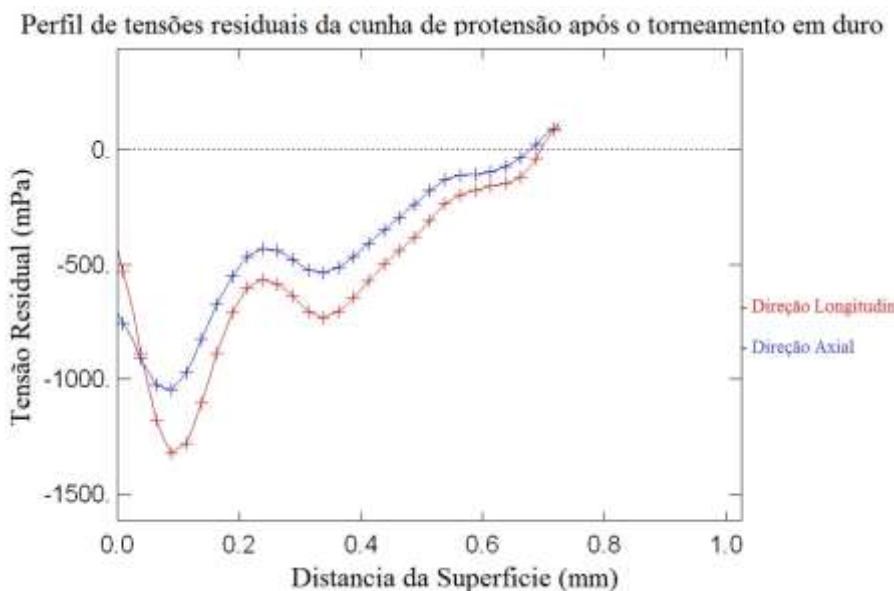


Figura 9 – Perfil de tensão residual apó o processo de tratamento térmico.

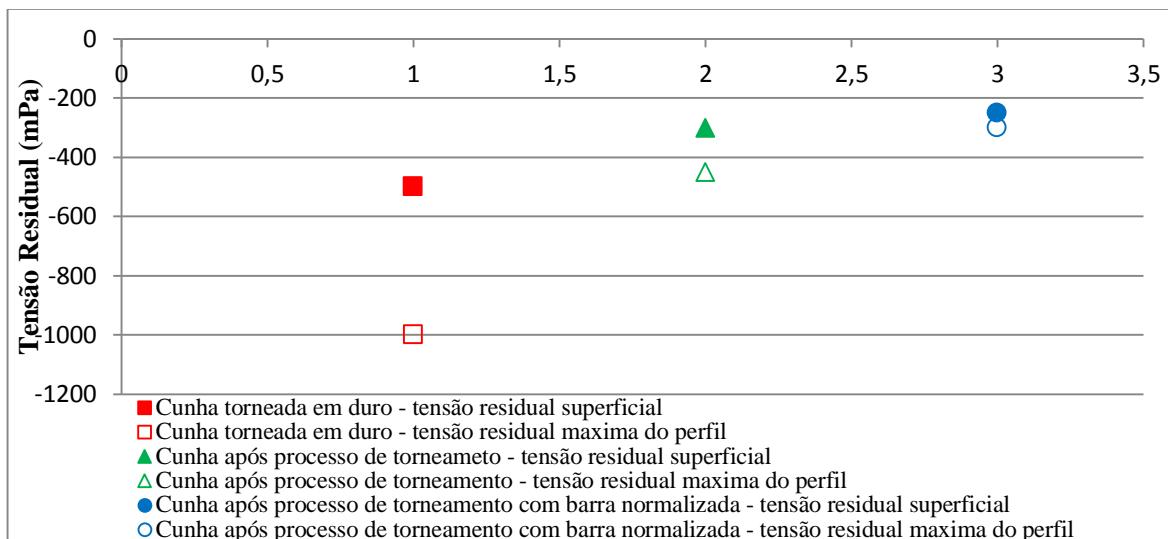


Figura 10- Comparação entre a tensão residual superficial na direção longitudinal e a tensão residual máxima do perfil na direção axial, da cunha torneada em duro com o processo normal de torneamento.

Como foi discutido na literatura de “Penha; Vendramin; Canale, 2012” e “Liu; Takagi; Tsukuda, 2004” o tratamento térmico empregado na cunha, gerou através da expansão volumétrica causada pela transformação martensítica, uma superfície com tensões residuais trativas e um comportamento compressivo com o aumento da profundidade, como pode ser visto na Figura 8. Com o passe de acabamento característicos do torneamento em duro, se tem uma troca das tensões residuais trativas da superfície, para tensões residuais compressivas, que pode ser visto na Figura 9, isto se deve a deformação plástica causada pelo processo de torneamento, que induz tensões residuais de compressão não só na superfície, como também em maiores profundidades, fazendo do torneamento em duro, o processo que gerou os maiores valores de tensão residual compressiva, tanto na superfície, quanto em maiores profundidades, e por isso, o melhor processo de torneamento para a vida da peça.

Na Figura 10 pode se ver que o processo de torneamento em duro foi o processo de torneamento que induziu os maiores valores de tensão residual de compressão, tanto na superfície da peça, quanto em maiores profundidades.

## Conclusões

- O desgaste da ferramenta de corte durante o processo de torneamento, como foi avaliado, levou à criação de uma superfície com tensões residuais mais trativas, devido ao aumento dos impactos térmicos durante a usinagem, quando o fluido não foi utilizado. O uso de óleo solúvel durante o processo de torneamento levou à diminuição dos impactos térmicos causados pela usinagem, fazendo com que a tensão residual superficial do material fique compressiva, devido ao impacto causado pela deformação plástica.
- A normalização da barra trefilada utilizada como matéria prima indicou um produto final com menores valores na tensão residual superficial.
- O processo de torneamento em duro se mostrou o processo de torneamento que alcançou os maiores valores de tensão residual de compressão tanto na superfície, quanto em maiores profundidades, tornando-o assim a melhor opção para a vida útil da peça, no entanto, não sendo viável economicamente.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o Centro Universitário da FEI, em especial o Prof. Sergio Delijaicov pelas medições das tensões residuais e a empresa Rudloff, em especial ao Eng. Gelson de Freitas Miori pela fabricação dos corpos de prova.

## **Referências**

- Dahlman, P.; Gunnberg, F.; Jacobson, M. (2004), The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stress in hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 181-184.
- Gunnberg, F.; Escursell, M.; Jacobson, M. (2006), The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburized steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 174, 82-90.
- Liu, M.; Takagi, J.; Tsukuda, A. (2004), Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel. *Journal of Materials processing Technology*, 150, 234-241.
- Menezes, R.N. (2008), Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento. UFRGS.
- Penha, R.N.; Vendramin, J.C.; Canale, L.C.F. (2012), Tensões residuais térmicas obtidas da têmpera a vácuo do aço ferramenta AISI H13. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico.
- Rossini, N.S.; Dassisti, M.; Benyounis, K.Y.; Olabi, A.G. (2012), Methods of measuring residual stresses in components. *Material & Design*, 35, 572-588.
- Silva, E.S. (2010), Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas circunferenciais de aços para risers rígido da classe API 5L grau X80. UFRJ/ Escola Politécnica.
- Webster, G.A.; Ezeilo, A.N. (2001), Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. *International Journal of Fatigue*, 23, 375-383.
- Withers, P.J.; Turski, M.; Edwards, L.; Bouchardm, P.J.; Buttle, D.J. (2008), Recent advances in residual stress measurement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, 118-127.
- Withers, P.J.; Bhadeshia, H.K.D.H. (2001), Residual stress Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17, 355-365.