

## Os efeitos do processo de corte cisalhante em barras oriundas do processo de trefilação combinada

The effects of the shear cutting process on combined cold drawn bars

Gilceu dos Santos Cardoso<sup>1</sup>, Vinicius Waechter Dias<sup>1</sup>,  
Alexandre da Silva Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 – Centro de Tecnologia, Bairro Agronomia, CP: 15.021, CEP: 91501-970, Porto Alegre – RS.  
e-mail: gilceucardoso@hotmail.com, vinicius.waechter@ufrgs.br, alexandre.rocha@ufrgs.br

---

### RESUMO

No cenário produtivo atual, torna-se cada vez mais importante avaliar o processo de fabricação como um todo e levar em conta que cada etapa em uma rota de fabricação terá alguma influência no produto final para assim minimizar perdas na produção. O presente trabalho visou caracterizar os efeitos do método corte cisalhante (tesoura) realizado durante o processo de trefilação combinada de barras de aço AISI 1045. Um entendimento mais aprofundado dos efeitos provocados pelo corte no material recebido do processo permitirá a avaliação da necessidade ou não de se remover a ponta cortada por cisalhamento para a fabricação de um billet para o forjamento. Para isso, realizou-se uma caracterização microestrutural, de microdureza e tensões residuais com o uso de difração de raios-X. Os resultados indicam que as influências vão muito além das deformações de grãos observadas através de metalografia, apresentando efeitos significativos em termos de tensões residuais superficiais até uma distância de aproximadamente 30 mm em relação à face cortada.

**Palavras-chave:** Corte Cisalhante; AISI 1045; Tensões Residuais; Difração de Raios-X.

---

### ABSTRACT

In the current production market, more and more important it becomes to evaluate the manufacturing process as a whole. Taking into account that each step in a manufacturing route will have some influence on the final product, the knowledge of different effects can minimize production losses. The present work aims to characterize the effects of the shear cutting method used in a combined drawing process chain of AISI 1045 steel bars. With a better understanding of the effects caused by this type of cut during the process, it will be possible to assess the necessity of the removal from the bar's end in order to obtain a more homogeneous billet for forging. The characterization was performed through microstructural, microhardness and residual stress analysis. The residual stress measurement was carried out with the use of X-Ray Diffraction (XRD) technique. The result shows that the effect of the cutting goes beyond of grain deformations and hardness enhancement of the cut surface. Residual stress profiles presented differences up to 30 mm of distance from the cut surface.

**Keywords:** Shear Cutting; AISI 1045; Residual Stress; X-Ray Diffraction.

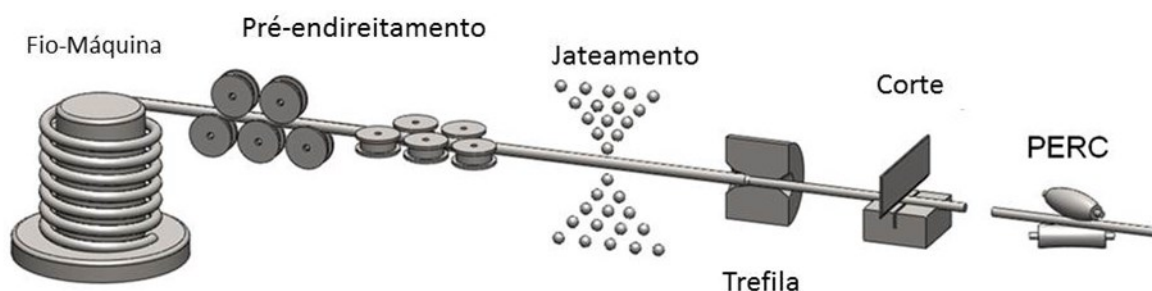
---

### 1. INTRODUÇÃO

O cenário industrial mundial vem enfrentando desafios para a produção que parecem ser conflitantes: produzir com o menor custo possível, mas com altos índices de qualidade. Isto pode ser atingido através da filosofia da “engenharia de distorção” [1] que visa entender o processo de fabricação como um todo, identificando possíveis portadores de potencial de distorção, atuando sobre eles e, conseqüentemente, reduzindo distorções durante todas as etapas do processo bem como no produto final [2,3]. Existem diversos potenciais de distorção identificados [4], mas, dentre eles, os mais estudados devido aos seus efeitos gerais no material são geometria, histórico mecânico, composição química, microestrutura e tensões residuais. Com a redução de distorções, tem-se como resultado uma redução nos custos com retrabalho, desgaste de ferramental e ainda na

vida em fadiga do produto, pois peças que sofrem processos de endireitamento após serem distorcidas apresentam uma distribuição desfavorável de tensões residuais em relação às peças que não passam por esses procedimentos.

A produção de componentes automotivos é um ótimo exemplo de um processo de manufatura repleto de etapas com transportadores de potenciais de distorção. Uma das etapas de fabricação das barras utilizadas para a formação de “billets” para o forjamento é o processo de trefilação combinada, representado na Figura 1. Este processo começa no desbobinamento do fio-máquina, passando por duas etapas de pré-endireitamento (vertical e horizontal), seguido de um jateamento para remoção de carepas, passando então pelo processo de trefilação. Após isso, o fio-máquina é cortado por tesouras (corte cisalhante) obtendo-se assim barras de seis metros de comprimento. Na mesma linha de fabricação, essas barras passam por um processo de Polimento e Endireitamento por Rolos Cruzados (PERC), onde as barras de 6 m chegam a sua geometria final antes de serem enviadas às indústrias de manufatura de componentes mecânicos diversos (forjados, usinados, laminados, entre outros).



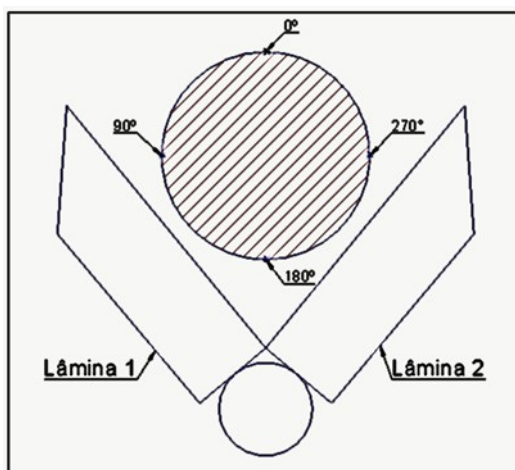
**Figura 1:** Processo de trefilação combinada.

Uma parte comum em todos os processos de fabricação que pode afetar toda a rota de fabricação do componente é o processo de corte. Cortes com a utilização de serras (cortes abrasivos) apresentam boa precisão dimensional, mas necessitam de cuidados com a velocidade e lubrificação quando automatizados. Um método mais prático de corte e que não requer os mesmos cuidados na automatização é o corte por guilhotina ou tesoura (cortes cisalhantes), porém apresenta maiores problemas com distorção, pois as tensões envolvidas são maiores [5]. Atualmente, há uma preocupação por parte de fabricantes de componentes apenas com o resultado dimensional oriundo destes tipos de corte. Isto pode ser prejudicial, pois diferentes métodos de corte acarretam em diferentes comportamentos não só dimensionais como microestruturais e mecânicos, assim como em termos de tensões residuais. Na maioria dos casos, a qualidade da região cortada é definida pela aplicação da peça. Casos em que a região cortada possui características funcionais requerem um controle acurado dos parâmetros do processo [6].

Este trabalho visa investigar os efeitos do tipo de corte realizado na fabricação de barras de aço trefiladas para a formação de geratrizes de forjamento e o quanto ele influencia nas pontas das barras oriundas do processo de trefilação combinada. Tendo em vista que o conhecimento prévio desses efeitos pode ajudar na determinação do aproveitamento total ou não da barra recebida. O que pode ser crucial na redução de defeitos gerados nas etapas futuras da fabricação.

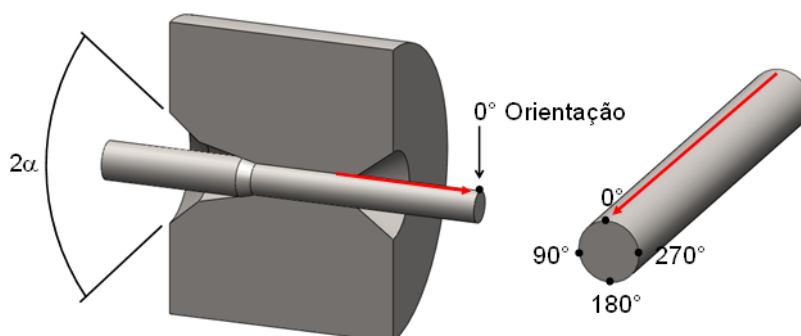
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras estudadas foram fabricadas com aço AISI 1045 oriundas do processo de trefilação combinada, demonstrado na Figura 1. Durante o processo, o fio-máquina é submetido a uma etapa de corte após o processo de trefilação, deixando as barras com o comprimento de seis metros no qual o material é enviado para a manufatura de componentes mecânicos. Este processo de corte é conhecido como corte do tipo tesoura, no qual duas lâminas atuam no corte do metal de forma cisalhante levando a sua ruptura (corte). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do processo de corte por tesoura. Por questões referenciais este corte será tratado como corte cisalhante.



**Figura 2:** Exemplo esquemático de corte do tipo tesoura.

Como toda a avaliação de um processo de fabricação que leve em conta todas as etapas do mesmo, é necessário a determinação de um sistema de orientação guiada [7]. Tal sistema permite a comparação entre posições do material em etapas diferentes do processo de manufatura. Esta determinação pode ser observada na Figura 3 e está relacionada ao processo de trefilação, levando-se em conta a direção de trefilação e a posição superior do processo, onde define-se o ângulo de referência  $0^\circ$ . A partir de  $0^\circ$  propõe-se a rotação no sentido anti-horário em relação a face deste material. Esta referência (direção e posição) foi marcada nas barras logo após elas passarem pelo processo de trefilação.



**Figura 3:** Representação do processo de trefilação prévio ao corte e representação dos ângulos de referência. O ângulo  $\alpha$  equivale aos valores de meio ângulo no processo de trefilação.

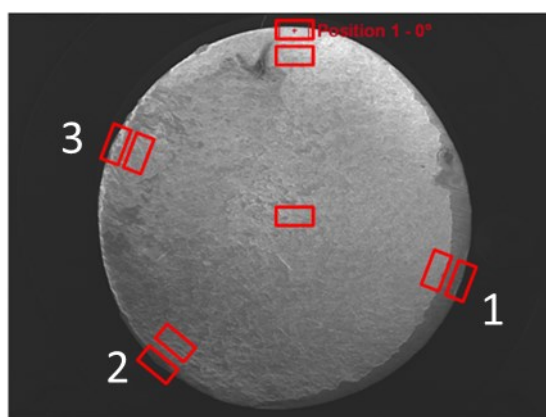
A primeira etapa de caracterização foi a fractográfica, na qual foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para caracterizar a superfície fraturada após o corte. Para isso, amostras foram cortadas transversalmente a 20 mm da superfície a ser analisada (faces da barra) para atender ao tamanho de amostra necessário para o uso no equipamento.

Devido a uma análise prévia das superfícies, decidiu-se pela análise nos pontos característicos de um corte cisalhante [8], como demonstrado na Figura 4. Portanto, foram determinadas três posições de medição e análise, referentes à:

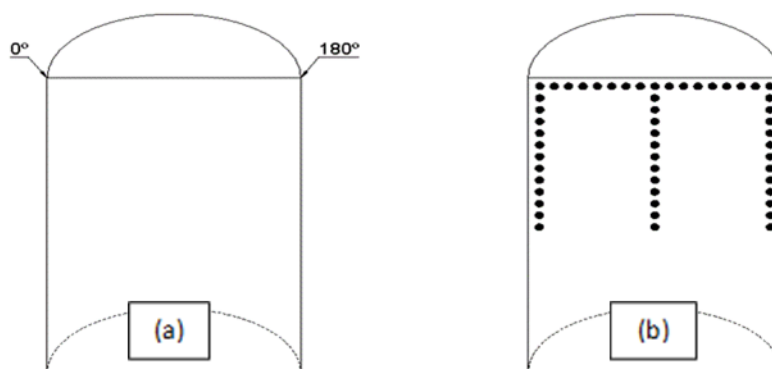
1. Posição de entrada da lâmina,
2. Posição oposta à entrada da lâmina e
3. Posição perpendicular à entrada da lâmina.

As amostras utilizadas para caracterização no MEV foram posteriormente cortadas longitudinalmente com disco abrasivo entre os ângulos de referência de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , conforme demonstrado na Figura 5 (a), para dar continuidade a caracterização metalúrgica das regiões afetadas. Estas amostras cortadas foram utilizadas para a realização de metalografia das diferentes regiões, além de perfis de microdurezas HV1 (Dureza Vickers com carga de 1 kgf) próximos às superfícies cortadas longitudinalmente, conforme indicado na Figura 5

(b), tentando assim verificar se há influência do corte na dureza.



**Figura 4:** Posições observadas no microscópio eletrônico de varredura.

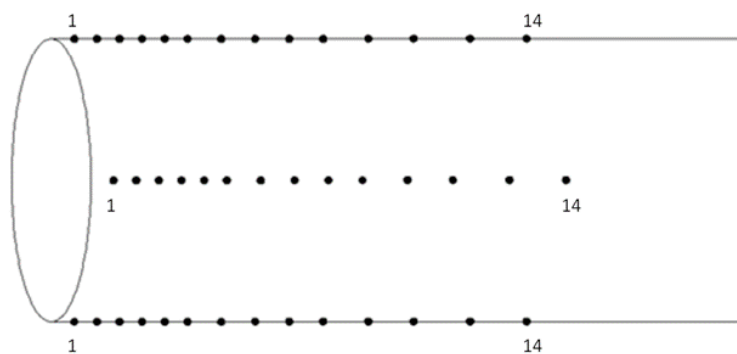


**Figura 5:** Orientação do corte realizado (a) e direções dos perfis de microdureza realizados (b).

Para a realização das medições de tensões residuais uma nova amostra foi retirada. Devido às qualidades apresentadas pelo método de difração de raios-X, o alto custo e dificuldade de uso da técnica de difração de nêutrons, além do fato do IWT/Bremen – Alemanha, parceiro internacional do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS, ser uma referência mundial na técnica de difração de raios-X, a mesma foi escolhida para a avaliação das tensões residuais neste trabalho. Esta técnica tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-X.

Esta grandeza é medida através da posição angular da linha de difração. Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos. Portanto, se o ângulo de difração para um espécime livre de tensões for conhecido, pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise.

Como se trata de um aço AISI 1045 que possui poucos elementos de liga e não sofreu nenhum processo termoquímico foi utilizada radiação Cr K- $\alpha$  variando, o ângulo de difração 2-Theta entre 153° e 159° e com variação do ângulo  $\Psi$  entre -45° a +45°[2]. Para o ensaio de Raios-X de caracterização superficial foram selecionados 8 ângulos diferentes para avaliação (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°) com uma distância de 2 mm da superfície de corte. Nesta medição ao longo do perímetro foi utilizado um colimador (abertura do feixe) de 1 mm de abertura (diâmetro), que permite melhor precisão pontual. Posteriormente foram realizadas varreduras longitudinais em relação à superfície cortada, totalizando 14 pontos de medição para cada ângulo, conforme a Figura 6. Para estas medições, utilizou-se o colimador de 2 mm, que possui uma precisão um pouco menor mas avalia uma área maior. Como este é um método de medição demorado, neste caso cada ponto levou em média 1h52min para ser medido, além da preparação e fixação das amostras, as distâncias entre os pontos de medição vão aumentando para que seja possível cobrir uma grande área. A tabela 1 apresenta as distâncias das posições medidas em relação a face cortada.



**Figura 6:** Representação das posições dos pontos de medidas para Raios-X.

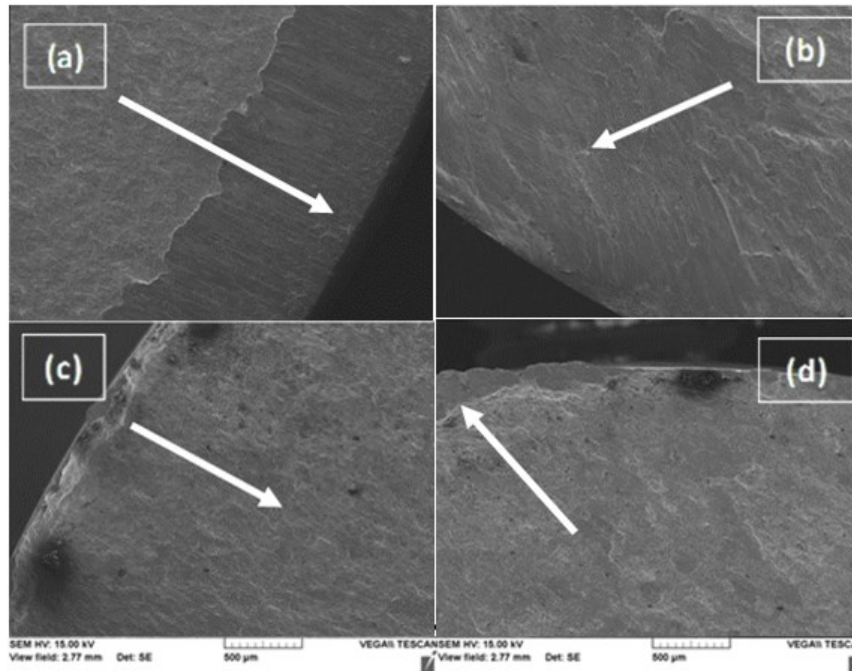
**Tabela 1:** Distâncias dos pontos de medição em relação a face cortada.

POSIÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
DISTÂNCIA (mm)	2	4	6	8	10	12	15	18	21	24	28	32	37	42

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização com MEV apresentou os resultados mostrados na Figura 7. É possível identificar as quatro principais zonas formadas durante o corte [8]:

- (7a) Zona de arredondamento;
- (7b) Zona cisalhada;
- (7c) Zona fraturada;
- (7d) Empenamento.

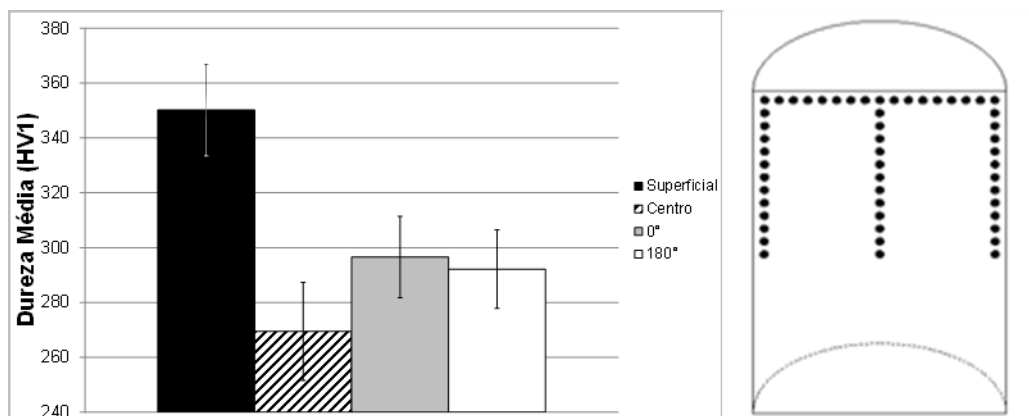


**Figura 7:** Fractografias em MEV da amostra com corte cisalhante apresentando em (a) zona arredondada, (b) zona cisalhada, (c) zona fraturada e (d) empenamento.

A Figura 8 apresenta as durezas médias das regiões determinadas para medições de perfis de microdurezas, conforme descrito no capítulo materiais e métodos. Observa-se ao analisá-la que ocorre um endurecimento próximo a região superficial, na posição de medição a 0,1 mm de distância da face cortada com o va-

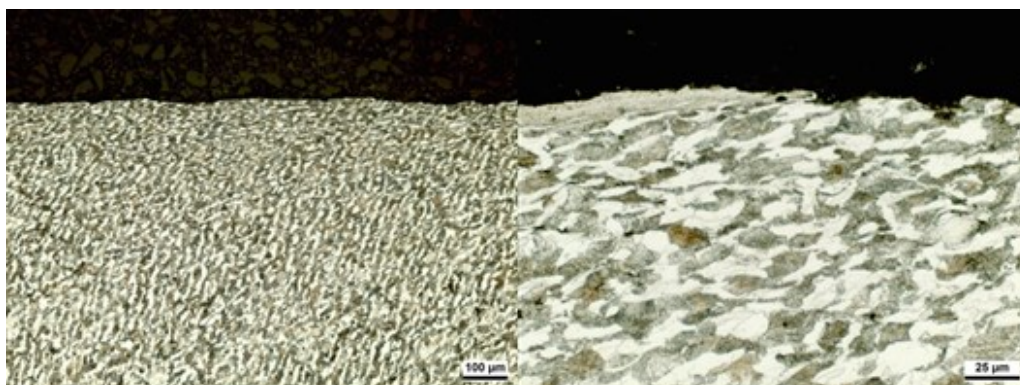


lor da dureza média observada em torno de 350 HV1. Tal elevação se deve a natureza do processo de corte cisalhante, o qual gera elevadas deformações plásticas no material até a sua ruptura. Ao se comparar as durezas próximas aos ângulos de medição 0° e 180°, observa-se um endurecimento em relação a dureza de núcleo, esta pode ser justificada pelo processo de trefilação, ao qual as amostras foram previamente submetidas, que apresenta maiores deformações próximas a superfície.



**Figura 8:** Durezas médias dos perfis de microdurezas medidos e representação de suas posições

Através das análises metalográficas, apresentadas na Figura 9, pode-se observar uma grande deformação nos grãos próximos a região cortada em direção ao movimento de corte. Tamanha deformação nos grãos justifica o aumento de dureza observado.

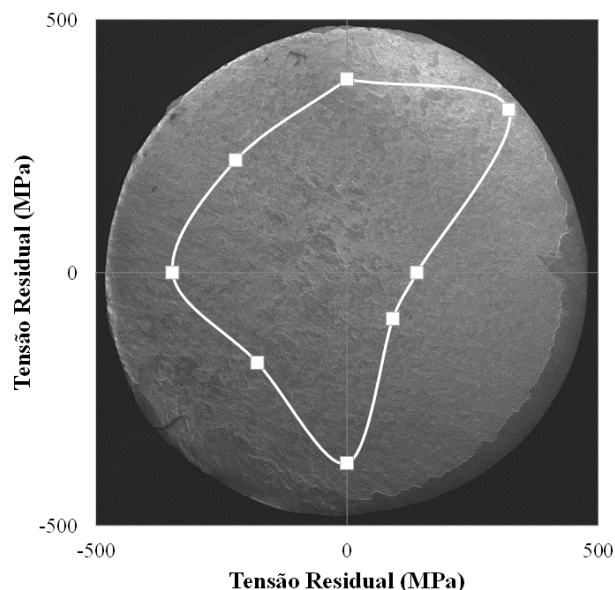


**Figura 9:** Metalografias da região próxima à face cortada.

Os resultados de tensões residuais tiveram como origem as análises dos gráficos de intensidade de sinal obtidos através da técnica de difração de raios-X. Tal análise é feita pelo método de  $\text{sen}^2 \Psi$  para obtenção do pico [9]. Obteve-se um valor médio por ponto medido e seu respectivo desvio padrão. Para objetos trefilados, a direção das tensões residuais de maior importância são as axiais [3,10], portanto, somente tensões axiais serão apresentadas. Os resultados obtidos em termos de tensões residuais foram agrupados segundo a seguinte classificação:

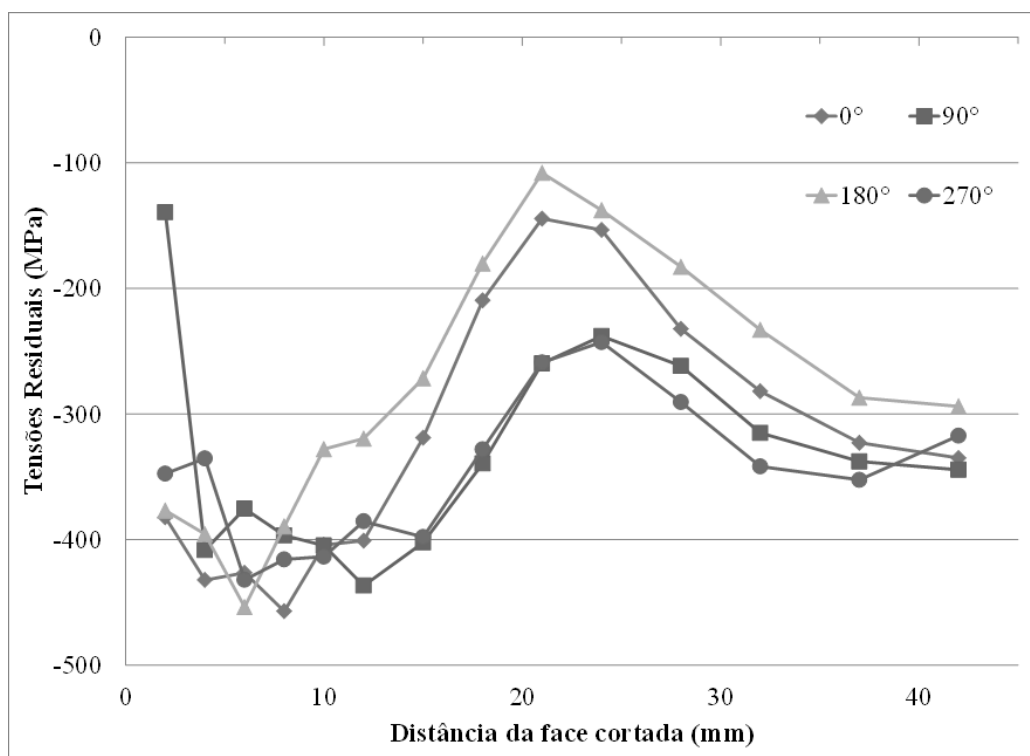
- **Superficial:** Medição a dois milímetros da face cortada. Um ponto a cada 45°;
- **Longitudinal:** Medições perpendiculares a face cortada para os quatro ângulos principais.

A Figura 10 representa a distribuição de tensões residuais superficiais a uma distância de 2 mm da face cortada para os oito ângulos de referência medidos na amostra cisalhada plotados em módulo nas suas respectivas posições angulares. Salienta-se que todos os valores medidos são de sinal negativo, ou seja, trata-se de tensões residuais compressivas. Pode-se observar uma considerável redução das tensões residuais compressivas entre os ângulos de 90° e 135°, isto indica o efeito da posição de entrada da lâmina de corte no material.



**Figura 10:** Distribuição de tensões residuais superficiais a 2 mm de distância da face cortada.

A Figura 11 apresenta os perfis lineares para os quatro ângulos principais (0°, 90°, 180° e 270°) de referência definidos anteriormente. Neste gráfico é bastante evidente a variação observada anteriormente, onde há uma grande diferença entre as tensões residuais na posição de entrada da lâmina com relação as demais na posição de 2 mm de distância do corte. Com relação ao perfil de tensões residuais, observa-se um comportamento semelhante para todas as posições com um gradiente de tensões entre os ângulos de referência de até 150 MPa. Nas posições de medição finais (37 e 42 mm) observa-se uma estabilização tanto no gradiente de tensões entre os ângulos quanto na variação entre as posições, o que indica uma estabilização ou o término do efeito provocado pelo corte cisalhante.



**Figura 11:** Perfil de tensões residuais ao longo da superfície da barra para os 4 ângulos de referência.

#### 4. CONCLUSÕES

A análise do corte em MEV permite observar a formação das quatro zonas características de um corte cisalhante.

As medições de microdurezas permitiram verificar uma elevada dureza na região próxima à superfície cortada por cisalhamento em relação a dureza do núcleo do material.

A microestrutura próxima a face cortada apresenta grandes deformações nos grãos. Essas deformações justificam a elevada dureza observada nessa região.

Observa-se que a posição de entrada da lâmina de corte no material tem uma relação direta com as tensões residuais medidas próxima à face cortada.

O corte apresenta grandes variações no perfil de tensões residuais superficiais, as quais ainda mostram valores significativos até 32 mm de distância da face cortada.

Com base na avaliação completa dos resultados apresentados neste trabalho é possível afirmar que o resultado do corte cisalhante realizado durante o processo de trefilação combinada deve ser tratado com bastante cuidado. Uma vez que provoca aumento na dureza superficial e uma alteração nas tensões residuais ao longo da barra produzida.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IWT - Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen - Alemanha pelo suporte dado neste trabalho, ao CNPq pelo apoio financeiro através dos projetos com nº de processo 141374/2014-4 e 141804/2016-5, bem como à CAPES pelo apoio financeiro ao projeto de cooperação internacional BRAGE-CRIM, nº 001/2009.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ZOCH, H.W., “Distortion engineering: vision or ready to application?”, In: Proc. 2nd Int. Conf. on Distortion Engineering IDE, 3-12, Bremen, Germany, 17-19 September 2008.
- [2] ROCHA, A. S., NUNES, R. M., HIRSCH, T. K., “Comparação entre difração de raios X e “método do furo cego” para medição de tensões residuais em barras cilíndricas”, *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, pp. 965 – 976, 2009.
- [3] COSER, T. B., SOUZA, T. F., ROCHA, A. S., “Avaliação numérica da influência da geometria do ferromental na geração de tensões residuais durante o processo de trefilação de barras de aço”, *Revista Matéria*, v. 20, n. 4, pp. 819 – 831, 2015.
- [4] MACKENZIE, D.S., FERGUSON, B.L., LI, Z., “Effect of quenching variables on the residual stress and distortion of a heat treated disk”, In: *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> ASM Heat Treating Society Conference, David L. Lawrence Convention Center, Pittsburgh, 232-238, Pennsylvania, USA, 25-28 September 2005.*
- [5] BREITLING, J., CHERNAUSKAS, V., TAUPIN, E., *et al.*, “Precision shearing of billets – special equipment and process simulation”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 71, pp. 119 – 125, 1997.
- [6] SOUZA, J. H. C., *Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento*, Dissertação de M.Sc., PPGE3M/UFRGS, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2001.
- [7] THOBEN, K.D., KLEIN, D., SEIFERT, M., *et al.*, “Approaches to describe distortion along process chains. Ansätze zur verzugsbeschreibung entlang von prozessketten”, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, v.43, n.1-2, pp. 178-185, 2012.
- [8] ASM INTERNATIONAL, *Forming and Forging*, ASM Metals Handbook, v. 14, 1993.
- [9] FRY, T., FITZPATRICK, M.E., HOLDWAY, P., *et al.*, *Determination of Residual Stress by X-ray Diffraction*, Measurement Good Practice Guide No. 52. National Physical Laboratory, UK, 2000.
- [10] NUNES, R.M., *Estudo dos mecanismos de distorção de forma em uma rota de fabricação do processo de trefilação a frio a têmpera por indução de barras cilíndricas em aço ABNT 1045*, Tese de D.Sc., PPGE3M/UFRGS, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2012.