

# EVOLUÇÃO DE DEFEITOS TRANSVERSAIS LOCALIZADOS NA SUPERFÍCIE DE BARRAS DE COBRE DURANTE O PROCESSO DE TREFILAÇÃO<sup>1</sup>

*Frederico de Castro Magalhães<sup>2</sup>*

*Dickson Alves de Souza<sup>3</sup>*

*Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>4</sup>*

*Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>5</sup>*

*Haroldo Béria Campo<sup>5</sup>*

*Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>*

## Resumo

Entre os produtos finais de trefilação, destacam-se os fios metálicos de seção redonda, que são aplicados, por exemplo, na indústria de conformação a frio para a produção de parafusos e na produção de fios elétricos. Para isso, exige-se um controle adequado das variáveis de processamento, como a qualidade da matéria-prima, que deve apresentar-se isenta de defeitos internos e superficiais. Os defeitos superficiais são encontrados, comumente, nos materiais laminados a quente, e podem estar associados ou não, ao transporte ou manuseio do material antes de ser trefilado. A previsão da evolução dos defeitos superficiais na trefilação é de importância, a fim de avaliar a sua presença ou não no produto final. O presente artigo analisa numericamente a evolução de um defeito transversal e superficial, em barras de cobre, ao longo de sete passes sucessivos de trefilação. O defeito inicial apresenta uma seção retangular com 1mm de largura e profundidade de 0,6mm.

**Palavras Chave:** Trefilação; Cobre; Defeitos superficiais e transversais; Elementos finitos.

## EVOLUTION OF SUPERFICIAL AND TRANSVERSALS DEFECTS OF COPPER RODS DURING DRAWING PROCESS

### Abstract

Round section metallic wires are an important product of drawing, and are widely utilized for electrical conductors and as the raw material for the cold forming of fasteners. This demands a strict control of the initial wire rod, which should not display internal or superficial defects; these, however, are difficult to avoid and can be caused during the hot rolling of the material or during the handling of the hot rolled coil. The prediction of the effect of superficial defects in the wire rod on subsequent drawing and on its final service performance is of importance. The present paper analyzes the evolution of a superficial, transversal defect in the wire rod during subsequent seven drawing passes, each with a reduction of area of 10%. The initial defect had a defect opening of 1 mm and a depth of 0.6mm.

**Key words:** Drawing; Copper; Surfaces and transversals defects; FEM.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 3º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 28 a 30 de novembro de 2012, São Paulo, SP.*

<sup>2</sup> *Dr., Pós-doutor do Dept. de Enga Metal. e de Materiais da UFMG, fredmag.castro@gmail.com, Belo Horizonte, Brasil.*

<sup>3</sup> *Bolsista AT, Dept. de Enga. Mecânica da UFMG, disouzam@yahoo.com.br, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>4</sup> *Dr., Prof Associado, Dept. de Enga. Mat. e Constr, da UFMG, teresa@ufmg.br, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

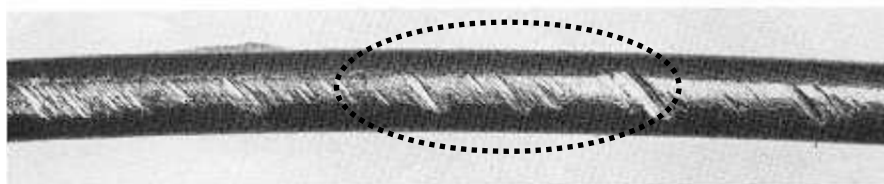
<sup>5</sup> *Dr., Prof Associado, Dept. de Enga. Mecânica da UFMG, pertence@ufmg.br, beriacampos@uol.com.br, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>6</sup> *Dr., Prof. Titular, Dept. de Engenharia Mecânica da UFMG, pzetlin@demec.ufmg.br, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

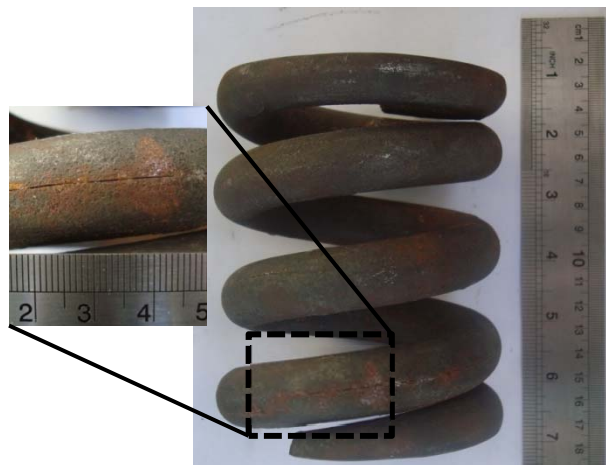
Como em todo processo de fabricação, os produtos finais de trefilação de seção circular não estão isentos de defeitos. Há casos em que defeitos pré-existentes na matéria-prima, principalmente no fio-máquina, são realçados ao longo do processamento do material, mas também pode ocorrer o surgimento de novos defeitos, durante o processo de trefilação, no bobinamento e no transporte do arame. Os produtos trefilados são utilizados como matéria-prima para posterior processamento a frio, gerando uma vasta gama de produtos, especialmente fixadores (parafusos, rebites, pregos, porcas, etc). Os materiais básicos utilizados para a produção de alto volume dos itens acima mencionados são o aço (baixo e alto carbono), alumínio, cobre e suas ligas. Em 2008, o consumo mundial de fio-máquina de aço laminado a quente, que é a matéria-prima para a produção de fios de aço trefilado, alcançou 170 milhões de toneladas; no mesmo período, a produção de alumínio foi de 25 milhões de toneladas e 13,6 milhões de toneladas de cobre foram utilizadas para a fabricação de fios e cabos.<sup>(1)</sup>

O fio máquina laminado a quente pode exibir defeitos superficiais. A Figura 1 ilustra um tipo de defeito (destacado pela elipse) gerado durante o transporte deste material;<sup>(2)</sup> outros tipos de defeitos superficiais podem ser observados nos catálogos industriais;<sup>(3)</sup> além disso, a manipulação do fio máquina também pode ocasionar o surgimento de diferentes defeitos superficiais.<sup>(4)</sup>

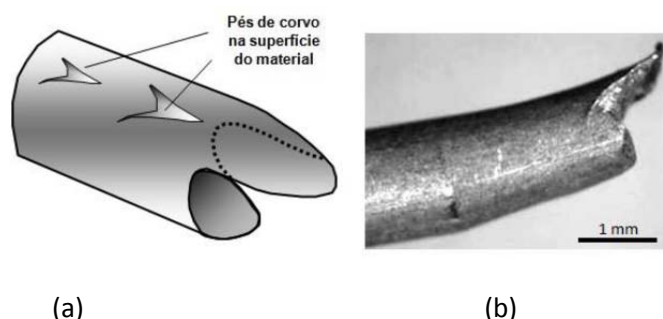


**Figura 1.** Defeito causado no transporte do fio máquina de aço.

Quando estes tipos de defeitos superficiais não ocasionam a ruptura do produto durante a sua trefilação, podem ser prejudiciais na produção subsequente de produtos conformados a frio, onde podem abrir-se de uma forma inaceitável (como ilustrado na Figura 2), levando ao sucateamento dos mesmos. O desempenho do produto final com defeitos superficiais cai consideravelmente, especialmente em relação à fadiga.<sup>(5)</sup> Quando ocorre a quebra do fio máquina ao longo do processo, eleva-se o custo de operação. Essa quebra geralmente começa com um pequeno defeito na superfície, que cresce com a forma de “pé de corvo”,<sup>(6)</sup> proporcionando a quebra do fio sob a tensão de saída na fieira ou durante a flexão do material em torno das polias, frequentemente, empregadas durante o processamento. A Figura 3 ilustra esquematicamente a presença do pé de corvo na superfície do material e a quebra de um fio proveniente deste defeito.



**Figura 2.** Abertura de um defeito observado durante a fabricação de uma mola.



**Figura 3.** (a) Desenho esquemático do pé de corvo na superfície do material (b) fratura típica resultante do crescimento do pé de corvo.

O estudo da evolução de determinados defeitos superficiais durante o processo de trefilação é de relevância industrial. O presente trabalho analisa, tanto experimentalmente quanto numericamente, através do método de elementos finitos, a evolução de defeitos transversais com seção transversal retangular, introduzidos artificialmente na superfície de uma barra de cobre. A evolução dos defeitos foi acompanhada ao longo de sete passes sucessivos de trefilação. Além da boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, pôde-se acompanhar a morfologia dos defeitos após o último passe de trefilação.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Caracterização do Material

Para avaliar a evolução do defeito superficial foi escolhido o cobre eletrolítico, com a composição química mostrada na Tabela 1. Esse material foi adquirido na forma de barras de 12,7 mm de diâmetro e 3 m a 4 m de comprimento. A escolha deste material teve como motivo, dispensar o uso de lubrificantes durante a sua trefilação. A dureza média do material como recebido foi HV 834±5MPa.

**Tabela 1.** Composição química do corpo de prova de cobre

Cu	Pb	Fe	Zn	Ni	Al	Mg
99,9%	0,018%	0,010%	0,012%	0,005%	0,049%	0,007%

Para a determinação da curva de fluxo, necessária para a simulação numérica, foram realizados três ensaios de tração, tendo os corpos de prova diâmetro de 10mm e comprimento de 60mm. Os ensaios de tração foram realizados a uma velocidade de 4 mm/min e uma taxa de deformação inicial de  $0,0011s^{-1}$ , sendo utilizada uma máquina INSTRON – modelo 4482 – e contralador Merlin, com extensômetro eletrônico série 2630-100, com comprimento útil de 25mm. Após os ensaios, determinou-se a Equação (1) para descrever o comportamento do material.

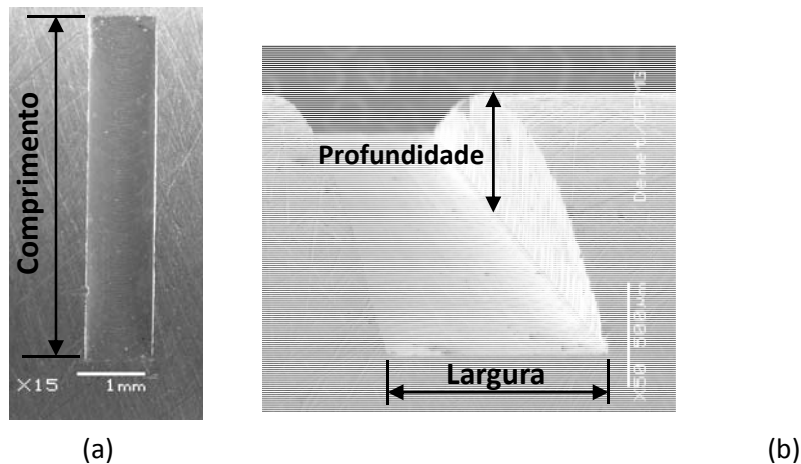
$$\sigma_{ef} = 439,6\varepsilon_{ef}^{0,192} \quad (1)$$

## 2.2 Ensaio de Trefilação

O processo de trefilação foi realizado com um dispositivo especialmente confeccionado para a máquina de ensaios Instron, empregando fieiras de carboneto de tungstênio (WC), com semi-ângulo de  $(5\pm 0,2)^\circ$  e com o comprimento do paralelo igual a 15% do diâmetro de saída. Em cada passe de trefilação (sete no total), a barra de cobre foi submetida a uma redução de área de 10%. Em todos os passes, a velocidade foi de 0,67 mm/s, e nenhum lubrificante foi empregado entre as fieiras e o material.

## 2.3 Defeitos Introduzidos Artificialmente

Para a confecção dos defeitos superficiais foi utilizado uma fresa de topo, tipo W, de metal duro, diâmetro nominal de 1mm, em um centro de usinagem vertical Romi Discovery 400, a uma velocidade de 6.000 rpm, avanço de 200mm/min e com uma profundidade de corte de 0,0 mm. A Figura 4 mostra o aspecto final do defeito. As dimensões finais foram: comprimento 6,5mm, profundidade 0,6 mm e largura 1 mm.

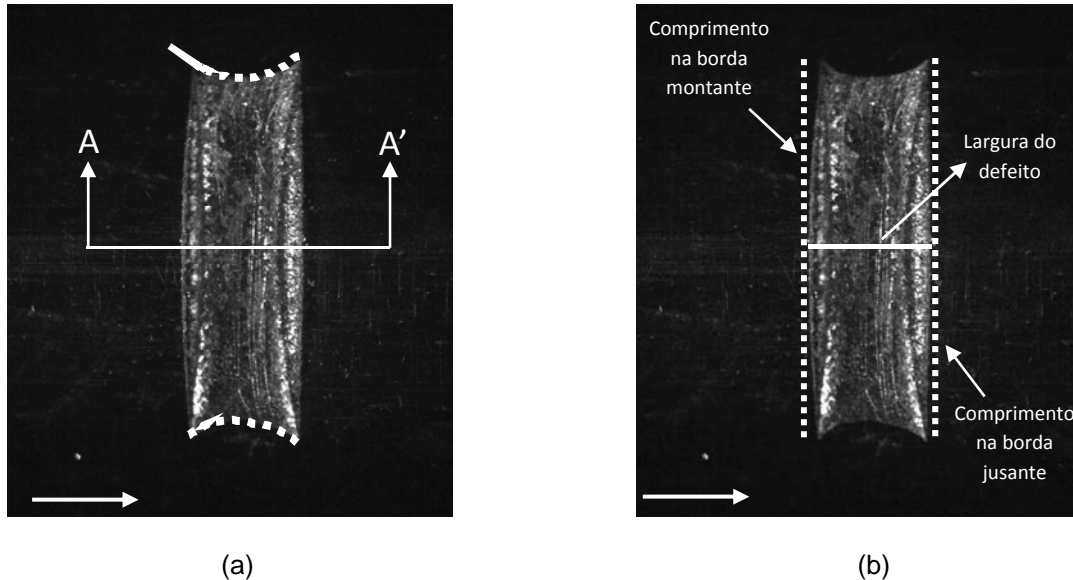


**Figura 4.** (a) Vista de topo do defeito (b) Perfil do defeito.

## 2.4 Evolução dos Defeitos Transversais

A Figura 5 exibe a vista de topo do defeito transversal após o primeiro passe de trefilação. Percebe-se que sua largura não é uniforme ao longo do comprimento, mostrando uma elevação das partes superior e inferior do defeito (linhas pontilhadas) (Figura 5a). Após a cada passe de trefilação foram avaliados, experimentalmente e numericamente, o comprimento e a largura do defeito. Para a medição do comprimento, foi considerado a média dos comprimentos da borda jusante e da montante, representadas por linhas pontilhadas e verticais (Figura 5b).

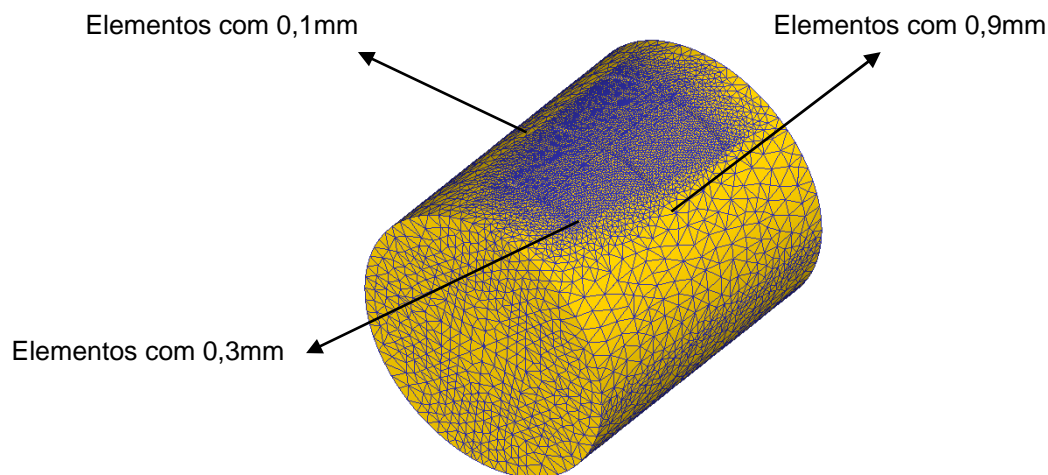
A medição da largura foi realizada na mediana do comprimento médio, representada pela linha contínua na Figura 5b. Após o último passe de trefilação, o defeito experimental foi cortado ao longo do plano de corte A-A' (ver Figura 5a), utilizando um disco de diamante em baixa velocidade, e a amostra preparada para a metalografia. A seta, localizada no canto inferior direito da Figura 5, indica o sentido de trefilação. Este mesmo plano de corte foi adotado numericamente.



**Figura 5.** (a) Plano de corte e a não uniformidade da largura (b) comprimento e largura a serem medidas.

## 2.5 Simulação Numérica

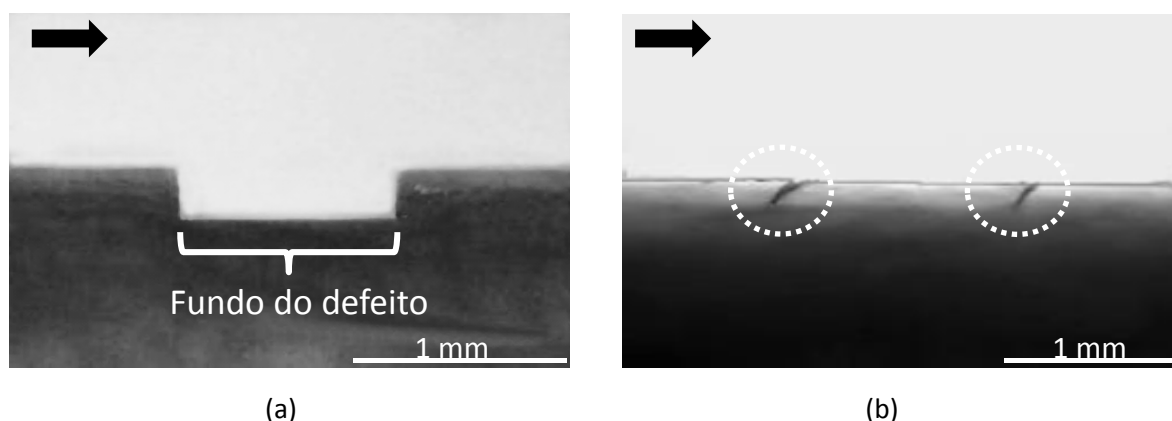
O processo de trefilação foi simulado numericamente através do software comercial DEFORM 3D (SFTC- Scientific Forming Technologies Corporation, Ohio, USA) onde os efeitos térmicos não foram considerados. As fieiras foram consideradas como corpos rígidos, e a barra de cobre como rígido-plástico, obedecendo a equação (1). Para a discretização da barra de cobre foram utilizados elementos tetraédricos. O atrito Coulombiano existente entre a matriz e a barra de cobre foi de 0,1, determinado experimentalmente, a partir da carga média e da tensão de trefilação predita por Avitzur.<sup>(7)</sup> Quando as superfícies do material se tocam uma com a outra (formação de dobra), o coeficiente de atrito entre elas foi de 0,6.<sup>(8)</sup> A fim de melhorar os resultados da simulação numérica, uma malha mais fina, com elementos medindo 0,1mm, foi utilizada nas regiões próximas ao defeito transversal, enquanto que nas regiões mais distantes do defeito, uma malha com elementos de 0,9mm foi empregada, como ilustrado na Figura 6.



**Figura 6.** Representação das densidades de malhas empregadas nas simulações numéricas.

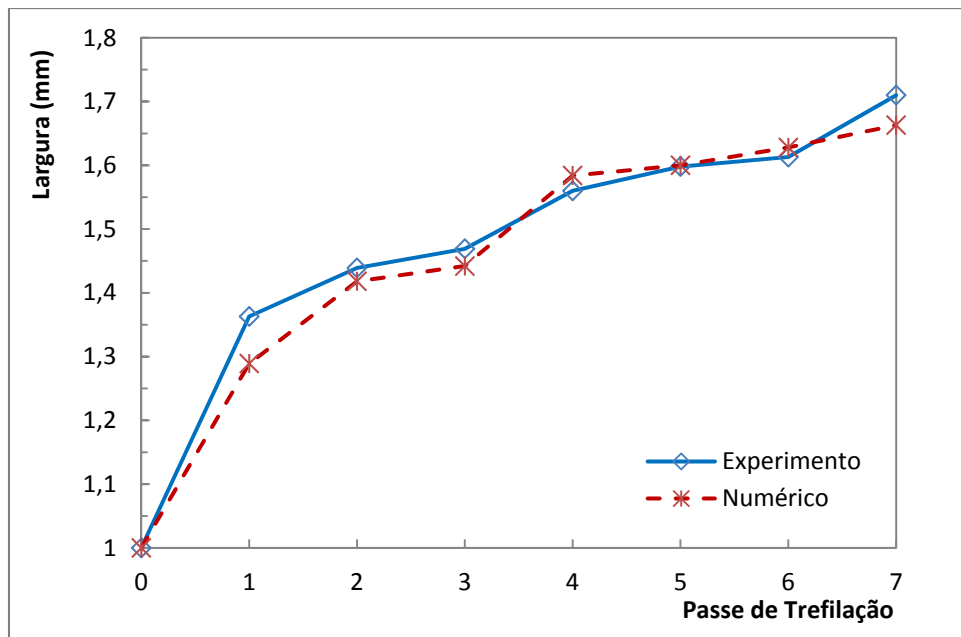
### 3 DISCUSSÃO

No decorrer do processo experimental de trefilação, foi observado o fechamento do defeito com 0,6 mm de profundidade no terceiro passe. O fechamento do defeito foi caracterizado pela ascensão do fundo do defeito até a superfície da barra, ocasionando a formação de dobras nas extremidades, destacadas dentro dos círculos. A Figura 7 mostra em perfil (sem corte), o defeito inicial e no final do sétimo passe. A seta localizada no canto superior esquerdo indica o sentido de trefilação.

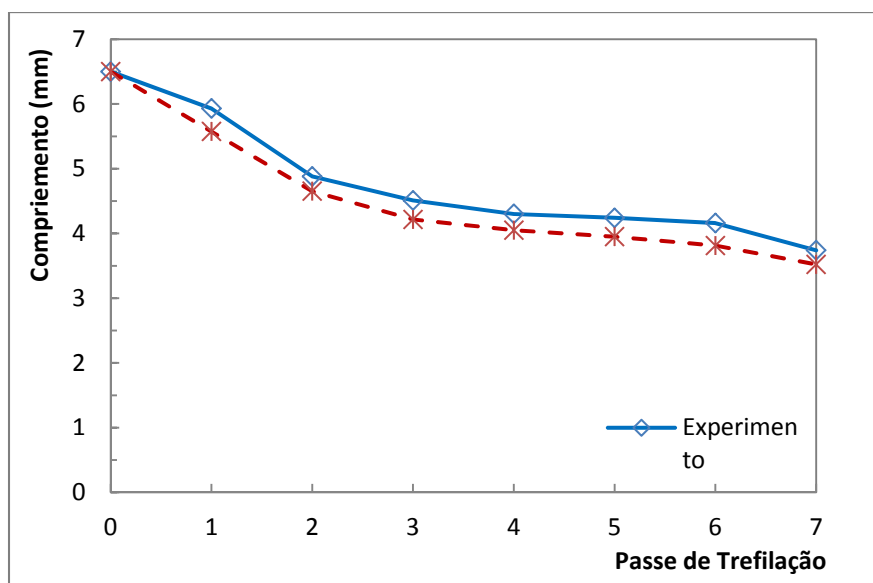


**Figura 7.** (a) Perfil inicial do defeito (b) após o sétimo passe de trefilação.

No decorrer dos sete passes de trefilação houve uma boa semelhança geométrica dos defeitos obtidos experimentalmente e numericamente, tendo a vista de topo com referência. Esta semelhança geométrica é confirmada nas dimensões do comprimento e na largura. Os gráficos das Figuras 8 e 9 mostram as evoluções das larguras e dos comprimentos do defeito transversal, experimentalmente e numericamente.



**Figura 8.** Evolução da largura do defeito transversal com 0,6 mm de profundidade entre o experimento e o numérico.

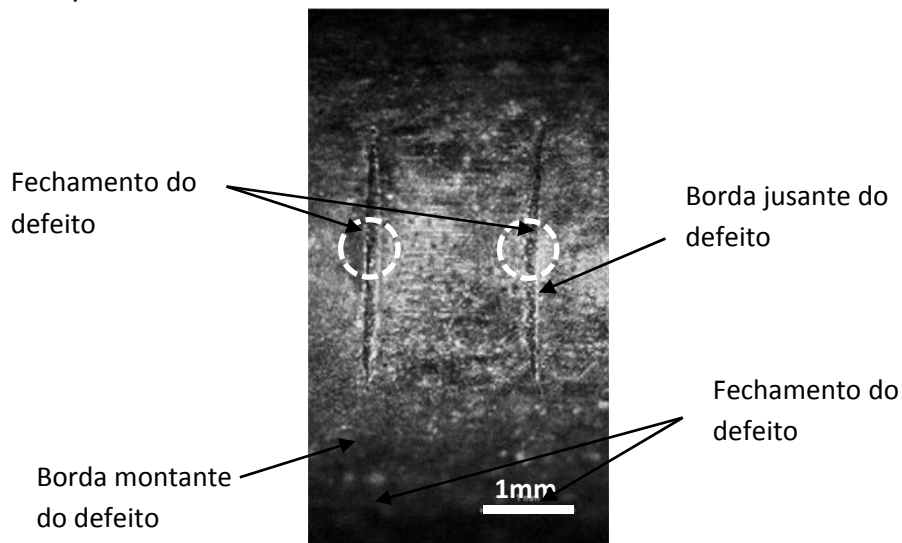


**Figura 9.** Evolução do comprimento do defeito transversal com 0,6mm de profundidade entre o experimento e o numérico.

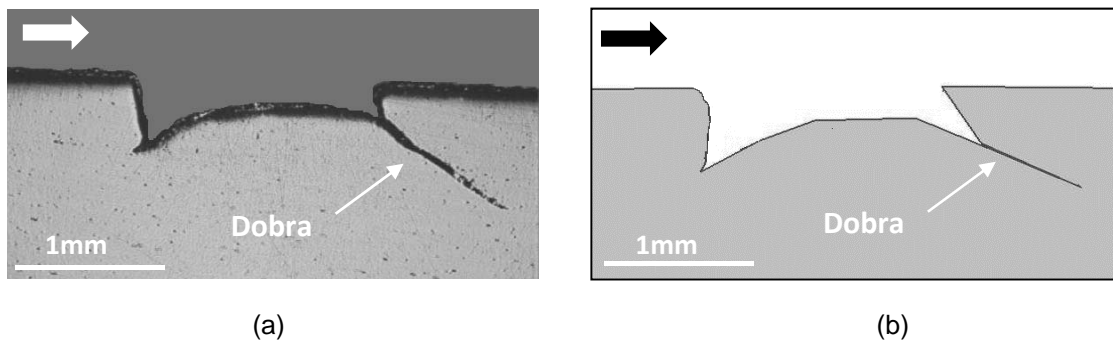
Observando o gráfico da Figura 8, verifica-se que, apesar do fechamento do defeito no terceiro passe, a largura do defeito aumenta com o número de passes. O maior acréscimo na largura ocorreu no primeiro passe (trecho linear com maior inclinação). A largura final experimental foi de 1,7 mm, isto é, 70% maior do que a largura inicial. Já o comprimento do defeito diminuiu significativamente até o terceiro passe de trefilação, a partir daí, este permaneceu quase constante até o sétimo passe (Figura 9).

Através dos gráficos das Figuras 8 e 9, percebeu-se uma boa correlação entre as larguras experimentais e numéricas.

A Figura 10 mostra a vista de topo do defeito após o sétimo passe, enquanto que a Figura 11 mostra os cortes realizados na seção mediana do comprimento dos defeitos experimental e numérico.



**Figura 10.** Vista de topo do defeito após o sétimo passe de trefilação.



**Figura 11.** (a) Corte na seção mediana do defeito experimental (b) corte na seção mediana do defeito numérico.

Observando o perfil do defeito na Figura 7b, percebe-se, apenas nas extremidades, uma elevação acentuada do fundo defeito, remetendo a um fechamento. Porém, na seção mediana do comprimento, onde foi realizado o corte após o sétimo passe, o defeito não fechou por completo, uma vez que, os espaçamentos nas bordas jusante e montante, destacados dentro dos círculos pontilhados, Figura 10, são maiores do que nas extremidades do defeito (fechamento). A Figura 11, que retrata o corte transversal do defeito, mostra a formação de uma dobra na borda jusante do defeito, ao contrário da borda montante, onde não foi observada nenhuma formação de dobra. O modelo numérico proposto foi capaz de prever a formação da dobra, apesar de certas discontinuidades geométricas em relação ao corte experimental.

## 4 CONCLUSÃO

A simulação numérica foi capaz de acompanhar a variação das larguras e comprimentos do defeito transversal em função do número de passe de trefilação e de registrar a formação da dobra na borda jusante do defeito.

Após o terceiro passe de trefilação o comprimento do defeito tende a se estabilizar, ao contrário da largura, que é diretamente proporcional ao número de passe.



## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o suporte da Belgo Mineira Bekaert na fabricação das feiras de carboneto de tungstênio e à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro para a concretização deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Annual Data – Copper, Brass, Bronze – Copper Supply & Consumption, Cooper Development Association Inc, New York, 2008, pp. 2-20.
- 2 Verlag Stahleisen GmbH. Wire Rod Defects, First Edition, Dusseldorf, 1973, pp. 22-23.
- 3 KLEMENS, D. Catalogue of Drawing Defects, First Edition, DGM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, 1985, pp. 1-55.
- 4 Yalamanchili, B., Nelson, J., Power, P.M. Identification and prevention of mechanical damage to wire rod at North Star Steel Texas, Wire Journal International, 2000, 33, 234-239.
- 5 GRIZA, S., BERTONI, F., ZANON, G., REGULY, A., STROHAECKER, T.R. Fatigue in engine connecting rod bolt due to forming laps, Engineering Failure Analysis, 2009, 16, 1542-1548.
- 6 Wright, R.N. The mechanism of chevron or crow's feet development in wire drawing, Wire Journal International, 2002, 35, 86-90.
- 7 Avitzur, B. Metal Forming: Processes and Analysis, First Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1968, pp. 218-228.
- 8 ASM Metals Handbook - Friction, Lubrication, and Wear Technology, 12Th Edition, Ohio, 2005, vol.18, pp. 113-114.