

# LAMINAÇÃO A FRIO DE FIOS ORTODÔNTICOS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304

Rodrigo Santos Messner <sup>1</sup>  
André Itman Filho <sup>2</sup>  
José Benaque Rubert <sup>3</sup>

## Resumo

Os fios de aços inoxidáveis austeníticos são muito utilizados nos estágios finais dos tratamentos ortodônticos. O objetivo deste trabalho é estudar o processo de conformação de fios retangulares a partir de fios redondos comerciais de aço inoxidável austenítico AISI 304, por meio do processo de laminação a frio. A qualidade dos fios é avaliada por meio de análises dimensionais, medidas de microdureza, resistência à ruptura e morfologia da fratura dos fios submetidos aos ensaios de tração. Também é elaborado um estudo sobre a aplicação do método de elementos finitos na simulação do processo, comparando-se a força e a tensão obtidas durante a laminação. Os resultados da simulação são compatíveis com os obtidos no processo real e os fios laminados apresentam fratura dúctil, resistência à ruptura e variações dimensionais adequadas às normas ortodônticas. A morfologia de fratura apresenta características similares ao modelo taça-cone mesmo submetida a deformação a frio própria do processo de laminação.

**Palavras-chave:** Fio retangular; Laminação a frio; Aço inoxidável austenítico.

## COLD ROLLING ORTHODONTIC WIRES OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 304

## Abstract

Austenitic stainless steels wires are widely used in the final stages of orthodontic treatment. The objective of this paper is to study the process of conformation of rectangular wires from round wires commercial austenitic stainless steel AISI 304 by the process of cold rolling. The wire quality is evaluated by means of dimensional analysis, microhardness measurements, tensile strength and fractographic analysis of the wires subjected to tensile tests. Also a study on the application of finite element method to simulate the process, comparing the force and rolling stress obtained in the rolling is done. The simulation results are consistent with those obtained in the actual process and the rolled wires show ductile fracture, tensile strength and dimensional variations appropriate to orthodontic standards. The fracture morphology shows the model cup-cone type besides the high deformation and hardness inherent in the cold rolling process.

**Key words:** Rectangular wire; Cold rolling; Austenitic stainless steel.

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Av. Vitória, 1729, Jucutuquara, Cep 29040-780, Vitória, ES, Brasil E-mail: rmessner@ifes.edu.br

<sup>2</sup>Professor do Departamento de Metalurgia, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Av. Vitória, 1729, Jucutuquara, Cep 29040-780, Vitória, ES, Brasil E-mail: andrei@ifes.edu.br

<sup>3</sup>Professor Adjunto Doutor pelo Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luiz, Km 235, Cep 13565-905, São Carlos, SP, Brasil E-mail: benaquer@hotmail.com

## I INTRODUÇÃO

Os metais nobres foram utilizados inicialmente nas aplicações odontológicas, principalmente pela ótima resistência à corrosão e facilidade para processamento em baixas temperaturas. No caso dos tratamentos ortodônticos, até a década de 1930 os fios eram feitos de ouro, mas começaram a ser substituídos pelos de aços inoxidáveis austeníticos, os quais apresentavam resistência mecânica e rigidez superiores, biocompatibilidade e menor custo.<sup>(1)</sup> Os fios retangulares de aços inoxidáveis austeníticos liberam progressivamente a energia mecânica absorvida após o armazenamento das tensões aplicadas durante a movimentação dos dentes durante o tratamento ortodôntico, favorecendo o torque de incisão, e permitindo o alinhamento dos dentes. Nos tratamentos ortodônticos é importante que os fios apresentem módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, além do assentamento perfeito nos braquetes, para que a tensão exercida atue adequadamente na correção dos dentes.<sup>(2)</sup> A fase inicial do tratamento ortodôntico é a de alinhamento e nivelamento, quando os dentes são colocados em posição um ao lado do outro, na altura correta. A segunda fase é a de fechamento de espaços e correção da posição molar, em razão das possíveis extrações. A terceira e última fase é o acabamento, com o ajuste correto da arcada dentária e posicionamento paralelo dos dentes. Em geral, nas fases de alinhamento e nivelamento, fios redondos da liga níquel-titânio (Nitinol) são os mais adequados pela ductilidade, enquanto que, no estágio final de acabamento, os fios retangulares de aço inoxidável austenítico são os adotados pela combinação da alta rigidez com menor atrito na interface fio/ranhura do braquete, quando comparado às demais ligas.<sup>(3)</sup> Os fios ortodônticos retangulares adaptam-se com maior precisão às canaletas dos braquetes e apresentam maior potencial para produzirem movimentos dentários nos tratamentos. O processo de fabricação de fios retangulares requer tecnologia adequada para a produção em escala industrial de fios com as propriedades mecânicas que atendam às especificações ortodônticas.

Neste contexto, o objetivo do trabalho é avaliar a qualidade dos fios retangulares do aço inoxidável austenítico AISI 304 laminados a frio, por meio de medidas dimensionais, dureza, resistência à tração e morfologia de fratura, associando o processo com a simulação matemática pelo método dos elementos finitos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Fios de aço inoxidável austenítico AISI 304 redondos foram laminados a frio no laminador construído na empresa Tecnident Equipamentos Ortodônticos Ltda. Na Figura 1 é apresentado o laminador projetado com quatro discos adaptados a um eixo acoplados a mancais fixados em uma placa.

Foi utilizado um total de 60 amostras de fios (30 circulares e 30 retangulares) – 15 para cada dimensão – para avaliar a qualidade do material. O posicionamento dos conjuntos em forma de cruz mostrado na Figura 2 permite o ajuste dos discos para controle das dimensões finais. As dimensões iniciais e desejadas dos fios são apresentadas na Tabela 1.

Para medir as dimensões das seções transversais dos fios, as amostras foram embutidas em baquelite. As medidas das arestas e do raio de curvatura R dos fios laminados foram feitas utilizando-se o programa IMAGE PRO PLUS 4.5. A norma BS 3507:1976<sup>(4)</sup> prevê uma tolerância de  $\pm 0,01$  mm nas dimensões das arestas. Em relação ao raio de curvatura, os fios retangulares devem apresentar valores inferiores a 1 mm, conforme relatado no trabalho de Yoshida.<sup>(5)</sup>

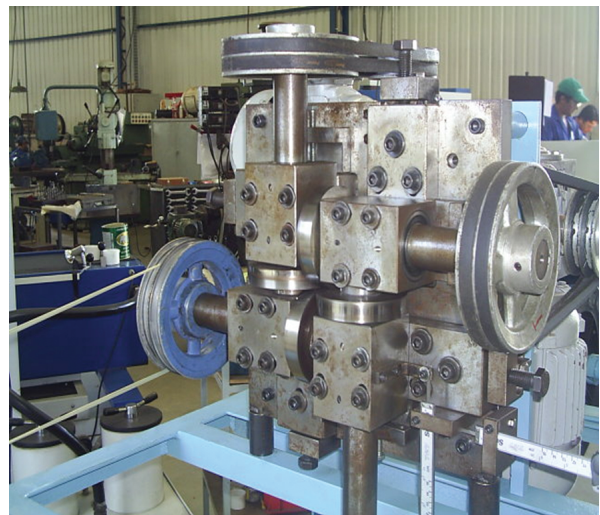


Figura 1. Vista frontal do laminador de fios.

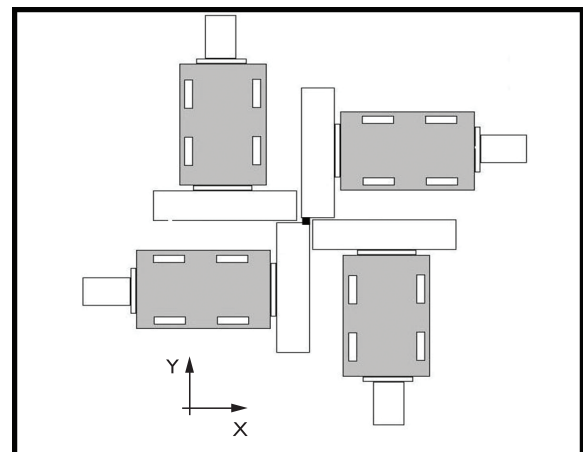


Figura 2. Diagrama esquemático dos conjuntos mancal/eixo/disco.

Tabela 1. Dimensões iniciais e desejadas dos fios

Dímetro inicial (mm)	Dimensões desejadas (mm)
0,49	0,406 × 0,406
0,65	0,483 × 0,635

Para avaliar o efeito da deformação nos fios foram realizadas medidas de microdureza Vickers antes e após a laminação, com uma carga de 200 gf aplicada nas amostras embutidas, de acordo com a norma ASTM E384-97.<sup>(6)</sup>

Amostras de fios antes e após a laminação foram submetidas a ensaios de tração de acordo com a norma ASTM E8M-00b,<sup>(7)</sup> diretamente nos fios que foram fixados à máquina por meio de garras especiais adequadas para o tipo de ensaio. Segundo a norma BS 3507:1976,<sup>(4)</sup> os fios retangulares devem apresentar resistência máxima à tração superior a 1.800 MPa para serem utilizados nos tratamentos ortodônticos. Foram realizadas análises de fratura nos fios submetidos a ensaios de tração para avaliar as morfologias das superfícies de fratura.

Também é feito um estudo sobre a aplicação do método de elementos finitos na simulação do processo de laminação, a partir da utilização do software DEFORM 3D versão 10.0, comparando-se a força e a tensão de laminação obtidas no processo. A tensão e a força de laminação são determinadas conforme as equações da mecânica convencional<sup>(8)</sup> utilizando os parâmetros do motor de acionamento dos discos de laminação. Foi escolhido o fio de 0,49 mm de diâmetro utilizado para laminar a seção retangular 0,406 mm × 0,406 mm que é a mais utilizada nos tratamentos ortodônticos.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise Dimensional

A qualidade dos fios foi avaliada por meio de análises dimensionais. As seções transversais dos fios são apresentadas nas Figuras 3 e 4. Estas amostras são representativas dos melhores resultados. Na Tabela 2 estão apresentados os valores obtidos na laminação.

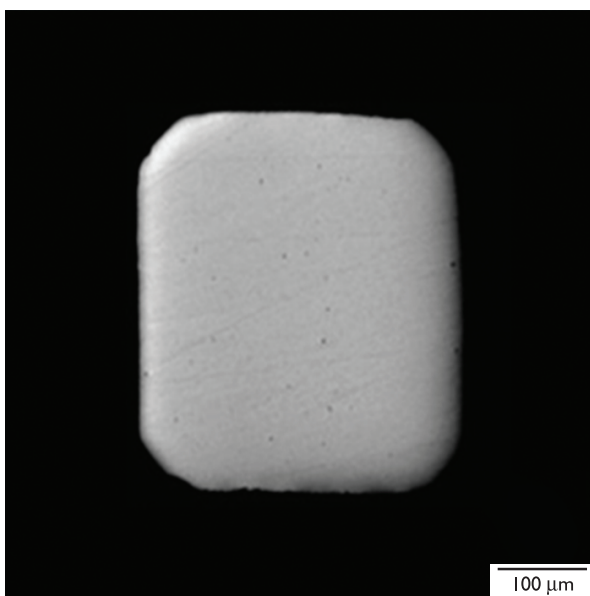


Figura 3. Seção transversal do fio 0,406 mm × 0,406 mm laminado.

#### 3.2 Medidas de Microdureza e de Resistência à Tração

Na Tabela 3 são mostrados os resultados dos ensaios de microindentação Vickers. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração.

#### 3.3 Análise Fratográfica

Nas Figuras 5 e 6 são mostrados exemplos de superfícies de fratura típicas das seções retangulares de fios submetidos a ensaios de tração.

#### 3.4 Simulação Numérica

A tensão e a força de laminação são determinadas pelas equações da mecânica convencional. A seguir, é apresentada a sequência de cálculos utilizando os parâmetros do motor de acionamento dos discos de laminação (Equações 1 a 5):

$$P = P_{\text{total}} \times \eta \quad (1)$$

$$T = (4.500 \times P) \div (2 \times \pi \times n) \quad (2)$$

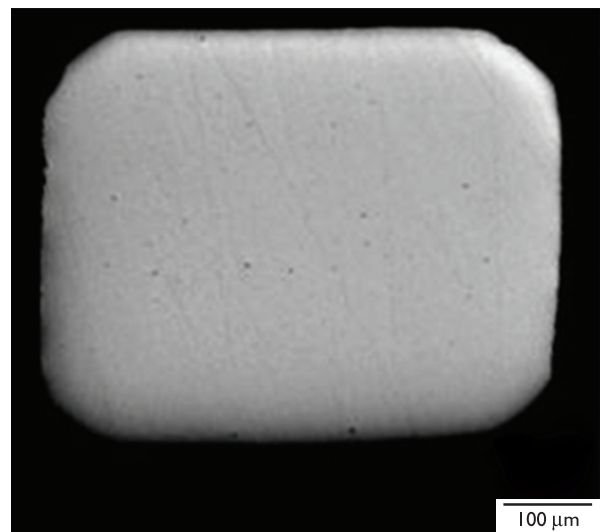


Figura 4. Seção transversal do fio 0,483 mm × 0,635 mm laminado.

Tabela 2. Dimensões dos fios antes e após a laminação em mm

Diâmetro inicial	Retangular obtido	Raio de curvatura
0,49	0,408 × 0,402	0,778
0,65	0,479 × 0,641	0,791

Tabela 3. Resultados dos ensaios de microindentação

Fio	Microdureza Vickers (HV)	
	Inicial	Final
0,49	475 ± 9	556 ± 8
0,65	511 ± 9	617 ± 9

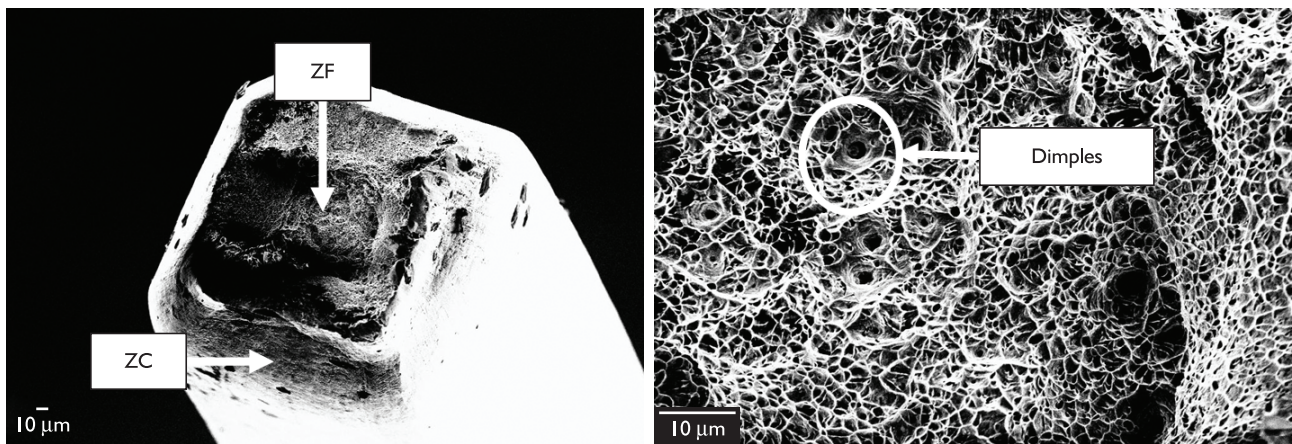


Figura 5. Superfície de fratura obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura em um fio laminado com seção retangular de 0,406 mm × 0,406 mm.

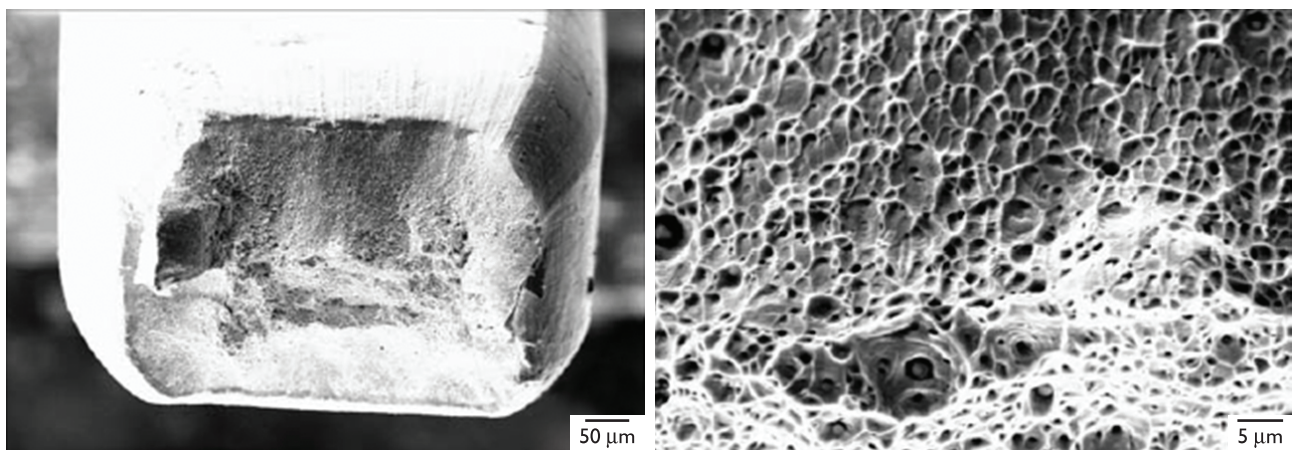


Figura 6. Superfície de fratura obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura em um fio laminado com seção retangular de 0,483 mm × 0,635 mm.

$$F = T \div (2 \times d) \quad (3)$$

$$A = (\pi \times 0,49^2) \div 4 \quad (4)$$

$$\sigma = F \div A \quad (5)$$

Os resultados dos cálculos teóricos de força e tensão de laminação estão apresentados na Tabela 5.

Na Figura 7 são mostrados o perfil do fio no processo de laminação e a distribuição das tensões.

Após a simulação realizou-se uma análise criteriosa dos resultados pela observação da distribuição da tensão efetiva (*stress-effective*) no fio no momento da conformação, e das regiões homogêneas do perfil conformado, indicando a magnitude dos fenômenos mecânicos. Conforme apresentado na Figura 7, a maior tensão obtida durante a simulação do processo de laminação do fio com 0,49 mm de diâmetro é de 1.330 MPa e, conseqüentemente, a força de laminação máxima aplicada para deformar os fios é de 251,37 N. Os valores da tensão e da

Tabela 4. Resultados de resistência à tração

Fio	Resistência (MPa)	
	Inicial	Final
0,49	1.658 ± 21	1.810 ± 15
0,65	1.777 ± 18	1.908 ± 31

Tabela 5. Valores calculados de força e tensão de laminação

Força (F)	Tensão (σ)
264 N	1.398 MPa

Tabela 6. Comparação dos valores da tensão e força de laminação

Valores	Calculado	Simulado	Δ (%)
Tensão (MPa)	1.398,41	1.330	5
Força (N)	264,30	251,37	

força de laminação obtidos na simulação e os calculados pelo processo de laminação estão mostrados, comparativamente, na Tabela 6.

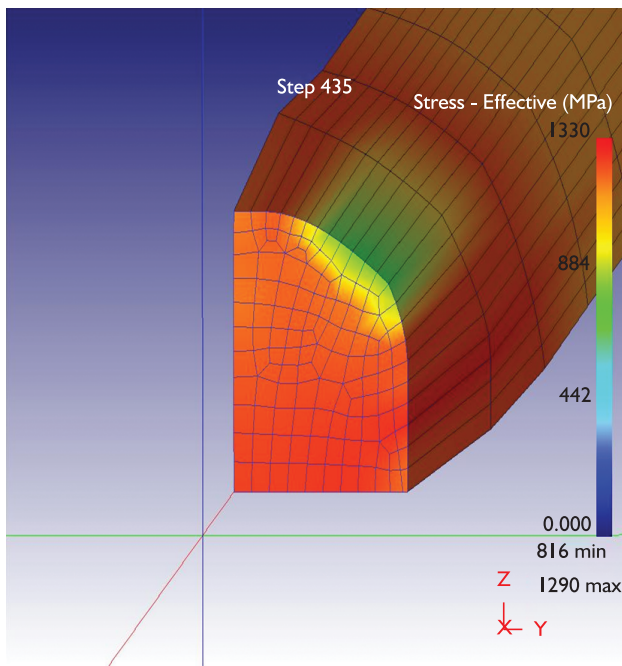


Figura 7. Perfil do fio no processo de laminação.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Dimensional

O ajuste dos discos no laminador para passagem do fio é realizado por meio de paquímetros digitais, permitindo a obtenção de diferentes dimensões, com apenas algumas regulagens. O controle dimensional é feito a cada 10 minutos, no início e no final de laminação, o que é necessário, pois a norma impõe restrições rigorosas quanto às características dimensionais. A norma BS 3507:1976<sup>(4)</sup> prevê uma tolerância de  $\pm 0,01$  mm nas dimensões das arestas e, pelos valores apresentados na Tabela 2, os valores estão dentro da faixa exigida. Os raios de curvatura inferiores a 1 mm atendem ao especificado conforme trabalho de Yoshida et al.<sup>(5)</sup> O controle da seção transversal final é importante para o assentamento perfeito dos fios nos braquetes. Além disso, o raio de curvatura inferior a 1 mm é fundamental na obtenção do torque para a movimentação dos dentes durante o tratamento ortodôntico. O contato entre o material e o laminador ocorre somente nas bordas dos discos de laminação, o que exige precisão nos ajustes da abertura para passagem do fio para manter a tolerância dimensional. No processo tradicional de trefilação, cada dimensão de fio a ser produzido requer uma fleira específica e com geometria complexa, o que dificulta a conformação devido ao ângulo interno da fleira provocar tensões residuais. A laminação permitiu produzir diferentes dimensões de fios com um simples ajuste dos discos, apresentando uma qualidade dimensional que atende às especificações ortodônticas.

### 4.2 Medidas de Microdureza e de Resistência à Tração

O aumento da microdureza e da resistência à tração dos fios após a laminação é devido ao encruamento e à provável transformação de fase induzida por deformação. Uma vez que o aumento da deformação e do aquecimento pelo atrito dos fios com os discos pode provocar a transformação da austenita em martensita.<sup>(9)</sup> À medida que o fio é deformado são gerados locais para a nucleação martensítica. Após a deformação a frio, uma energia relativamente pequena utilizada na deformação é armazenada no material. Esta energia é armazenada na forma de defeitos cristalinos gerados pela movimentação das discordâncias. Adicionalmente aos defeitos cristalinos, a deformação pode ter gerado duas fases martensíticas: a fase  $\epsilon$  (intermediária) e a fase  $\alpha'$ .<sup>(10)</sup> A caracterização microestrutural para identificação da fase martensítica em aços inoxidáveis austeníticos encruados é extremamente difícil, porém, o teste de magnetismo através da aproximação do fio ao imã sugere desta fase. Neste caso, o comportamento magnético dos fios foi alterado pela quantidade de martensita  $\alpha'$  transformada, a qual tem comportamento ferromagnético.

Segundo a norma BS 3507:1976,<sup>(4)</sup> os fios retangulares devem apresentar resistência mecânica superior a 1.800 MPa para serem considerados adequados aos tratamentos ortodônticos. Conforme os resultados obtidos, os fios laminados apresentam níveis de resistência máxima à tração que atendem às especificações ortodônticas.

### 4.3 Análises de Fratura

A análise fractográfica revela a característica dúctil ou frágil do comportamento do material após a solicitação mecânica. A morfologia das superfícies de fratura das seções transversais dos fios mostradas nas Figuras 5 a 6 caracteriza-se pela presença de *dimples* formados pelo crescimento e coalescência de microvazios no centro e pela ocorrência de cisalhamento nas bordas, o que leva a conclusão de que os fios retangulares apresentam fratura dúctil típica do modelo “taça-cone”. Segundo Anderson<sup>(11)</sup> a nucleação dos *dimples* pode ser devido às tensões triaxiais desiguais que alongam as microcavidades em uma ou outra direção. A possível transformação martensítica nos fios, decorrente do processo de deformação, não altera a morfologia das fraturas, pois o teor de carbono é reduzido e favorece a fratura dúctil. Conforme Reed-Hill<sup>(12)</sup> supõe-se que a fratura dúctil tenha início no centro da região do fio com a formação de microcavidades que coalescem e crescem perpendicularmente ao eixo do fio, constituindo a zona fibrosa (ZF) e a “taça”. Essa região corresponde à zona de propagação estável da trinca. Com a continuidade do carregamento, a trinca propaga-se de maneira instável, segue na direção de 45° com o eixo de escorregamento, formando a zona cisalhante (ZC) e o “cone”, com alívio de tensões próximo à superfície.

#### 4.4 Simulação Numérica

Em relação à simulação numérica do processo de laminação, e pela análise da Tabela 6, observa-se uma excelente aproximação entre os valores de tensão e força de laminação obtidas na simulação com os valores calculados, apresentando uma diferença de 5%. A qualidade da descrição das condições de contorno, dos dados das propriedades do material e a facilidade na preparação da geometria da peça e da ferramenta de trabalho favorecem o sucesso da simulação. As parametrizações adotadas para a simulação do processo de laminação mostram-se eficientes, considerando que os resultados alcançados estão muito próximos aos valores calculados. Um maior grau de ajuste nas condições de contorno na simulação numérica e reavaliação do uso das equações utilizadas podem conduzir a graus de precisão mais apurados. A utilização de um maior número de elementos da malha (malhas de menor dimensão), apesar de requerer um tempo maior para a simulação devido ao volume de elementos a serem resolvidos computacionalmente, permite a obtenção de resultados precisos.

O comportamento rígido-plástico adotado na simulação numérica mostra ser o mais adequado em comparação com a formulação elasto-plástica, pois considera apenas o fenômeno da deformação plástica e despreza a influência dos esforços abaixo da tensão de escoamento do material. A utilização do critério de simetria, considerando  $\frac{1}{4}$  da seção transversal da seção do conjunto, otimiza o processo de simulação, com menor tempo de duração e menor complexidade de cálculo computacional.

#### REFERÊNCIAS

- 1 KUSY, R. P. Orthodontic biomaterials: from the past to the present. *The Angle Orthodontist*, v. 72, n. 6, p. 501-12, Dec. 2002. PMID:12518941.
- 2 DOLCI, G. S. et al. Biodegradação de braquetes ortodônticos: avaliação da liberação iônica in vitro. *Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial*, v. 13, n. 3, maio-jun. 2008.
- 3 KUSY, R. P. Influence of force systems on archwire-bracket combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v. 127, n.3, p. 333-42, Mar. 2005. PMID:15775948. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajodo.2004.07.037>
- 4 BRITISH STANDARDS ASSOCIATION. *BS 3507:1976*: Specification: orthodontic wire and tape and dental ligature wire. London, 1976.
- 5 YOSHIDA, K. et al. Drawing of stainless shaped steel microwire of 400-600 $\mu$ m size. *Wire Journal International*, v. 37, n. 5010, p. 56-61, Mar. 2004.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E384-97*: Standard test method for microhardness of materials: Designation E384-89. West Conshohocken, 1990.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E8M-00b*: Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2001.
- 8 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física: mecânica*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- 9 WAYMANM, C. M.; BHADESHIA, H. K. D. H. Phase transformation. In: CAHN, R. W.; HAASEN, P. *Physical metallurgy*. 4. ed. Neetherlands: North-Holland, 1996. v. 2, p. 1507-1554.

A Figura 7 mostra a variação das tensões efetivas de laminação ao longo do perfil do fio no momento da deformação, ao longo da maior parte do perfil a tensão efetiva de laminação com valor de 1.330 MPa. Aproximando-se da extremidade do fio, próximo ao raio de curvatura, a tensão efetiva é de 884 MPa, o que indica que esta região é a que sofre menor esforço de compressão.

#### 5 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que:

- O laminador produz fios com dimensões e resistência mecânica à tração que atendem às especificações exigidas pela norma;
- O aumento da microdureza nos fios após o processo de laminação pode ser explicado pelo efeito do encruamento e da transformação martensítica;
- Os fios conformados apresentam característica dúctil conforme modelo do tipo taça-cone; e
- O método de simulação numérica apresenta resultados compatíveis com os obtidos pelo método de cálculo teórico, reproduzindo a tensão e força de laminação, e podendo trazer contribuições para os processos de projeto e fabricação dos fios.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – IFES e à ArcelorMittal Tubarão.

- 10 PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. *Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades*. São Paulo: Hemus, 1994.
- 11 ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- 12 REED-HILL, R. E. *Princípios de metalurgia física*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

Recebido em: 15/08/2012

Aceito em: 18/02/2013