

# ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI-316 POR EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR<sup>1</sup>

Tamires Brekailo<sup>2</sup>  
Adriano Murilo Rosario<sup>3</sup>  
Selauco Vurobi Junior<sup>4</sup>  
Oswaldo Mitsuyuki Cintho<sup>5</sup>

## Resumo

No presente trabalho, amostras de um aço inoxidável austenítico AISI 316 de dimensões 8x8x30 mm foram processadas por extrusão em canal angular (ECA) em uma matriz de 120 graus entre canais. As amostras foram processadas com velocidade de deformação de 1,5, 3 e 6 mm/min e por até 3 passes. As amostras foram avaliadas metalograficamente por microscopia óptica e eletrônica de varredura e por perfil de dureza. Verificou-se grande influência da velocidade de deformação na microestrutura e no perfil de dureza. Foram verificadas ainda heterogeneidades de deformação ao longo da seção transversal de cada amostra em função da atuação de fortes forças de atrito entre a amostra e a matriz. Os dados obtidos por ECA foram comparados com dados obtidos para amostra laminada a frio para o mesmo aço.

**Palavras-chave:** Extrusão em canal angular; Deformação plástica severa; Aço inoxidável austenítico.

## STUDY OF PROCESSING OF AISI 316 STAINLESS STEEL BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

### Abstract

In the present work, AISI 316 type stainless steel was processed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP) in a 120° angle matrix. The AISI 316 samples (dimensions 8x8x30 mm) were processed with 1.5, 3 and 6 mm/min of deformation velocity and by 3 times. Metallographics Analysis' by optical and scanning electron microscopy and micro-hardness measurements was done in all processed the samples. Deformations heterogeneities along the sample cross sections were detected according friction forces during contact between the samples and matrix wall. The ECAP results were checked with conventional cold rolling of material.

**Key words:** Equal channel angular pressing; Severe plastic deformation; Stainless steel AISI316.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de Materiais. Mestranda. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

<sup>3</sup> Engenheiro de Fundição. Mestranda. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Prof. Assistente. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia. Prof. Adjunto. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

## 1 INTRODUÇÃO

A Extrusão em Canal Angular (ECA) é um processo através do qual o material, na forma de barra, passa por dois canais que se cruzam em um ângulo arbitrário. O material passa pelos canais através da aplicação de pressão de um punção, conforme exemplificado na Figura 1, onde  $\phi$  e  $\Psi$  são respectivamente os ângulos que os canais fazem entre si e o ângulo de curvatura da junção, ou “cotovelo”. A tensão sob o qual o material é submetido é de cisalhamento simples, a qual ocorre quando o material passa de um canal para o próximo. Apesar de que durante o processo sejam atingidas tensões muito elevadas o material continua com as mesmas dimensões após o processamento, sendo este um diferencial comparado com os processos convencionais como laminação e forjamento, por exemplo.<sup>(1)</sup>

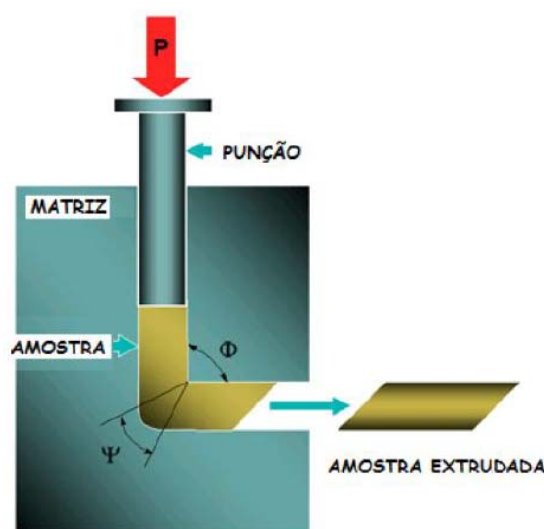


Figura 1. Esquema ilustrativo do processo de extrusão em canal angular.

Este processo tem sido bastante estudado porque os materiais assim preparados têm grande potencial para exibir tamanho de grão ultrafino após a recristalização e conseqüente aumento de resistência mecânica e tenacidade, além de permitirem a exploração de diversos aspectos fundamentais de plasticidade, recristalização e formação de textura.<sup>(1,2)</sup> O refino microestrutural e o aumento de resistência mecânica são duas importantes conseqüências, constituindo-se a ECA um processo potencialmente capaz de aumentar ao mesmo tempo a resistência mecânica e a ductilidade, via redução do tamanho de grão.<sup>(3,4)</sup>

A capacidade de fabricação de metais com grãos ultrafinos é interessante por dois motivos principais: primeiro, o material pode ter aumento da sua resistência em baixas temperaturas. Segundo, a retenção de tamanho de grão ultrafino a altas temperaturas, oferece potencial para atingir capacidade de superplasticidade a altas taxas de deformação, e esta possibilidade é importante porque a expansão da superplasticidade em operações comerciais é atualmente restrita pelas taxas de conformação relativamente baixas e conseqüentemente longos tempos de conformação.<sup>(5,6)</sup>

No presente trabalho tem-se como objetivo o processamento por extrusão em canal angular e posterior caracterização do aço inoxidável austenítico AISI 316, visando a caracterização microestrutural e a obtenção de uma estrutura ultrafina.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

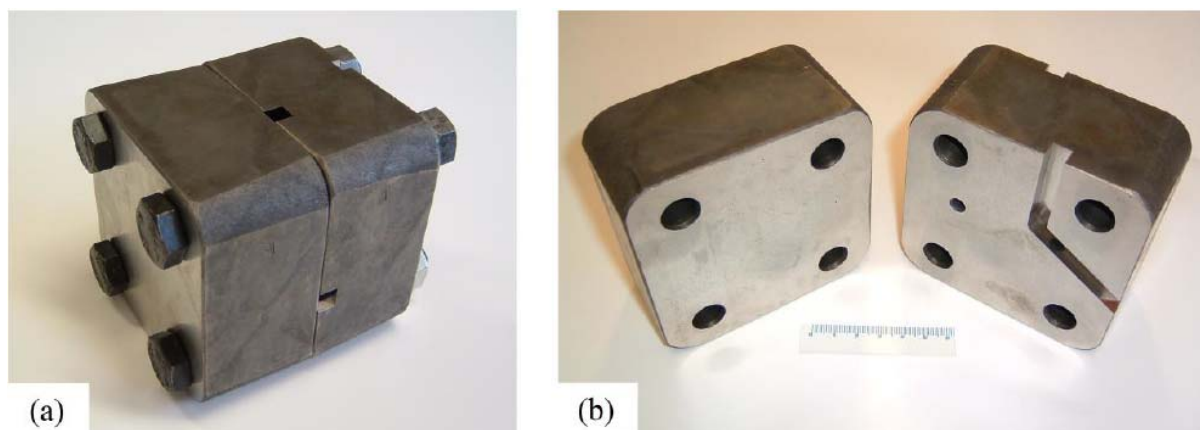
O material utilizado foi o aço inoxidável austenítico AISI 316, outra nomenclatura para este aço é S31600 (UNS designation). As amostras utilizadas possuem as dimensões de 7,5x7,5x30,0 mm, e uma das extremidades foram arredondadas para facilitar o início da extrusão.

A composição do aço deste estudo esta dada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Composição química (% em peso) do aço inoxidável austenítico AISI 316

Elemento	Composição (%)
Carbono	≤0,08
Manganês	≤2,00
Silício	≤1,00
Cromo	16,00 - 18,00
Níquel	10,00 - 14,00
Molibdênio	2,00 - 3,00
Ferro	Remanescente

A matriz foi construída com aço AISI 1045 cementado e temperado. Os ângulos da matriz são  $\phi = 120^\circ$  e  $\Psi = 0^\circ$ , sendo optado pelo ângulo de  $120^\circ$  já que é indicado para materiais mais resistentes, como neste e também para o trabalho em que a matriz foi desenvolvida, que o material utilizado foi um aço inoxidável dúplex. Uma foto da matriz utilizada para a extrusão está representada na Figura 2.



**Figura 2** – Foto da matriz utilizada para a extrusão; (a) foto da matriz fechada; (b) foto da matriz aberta.

### 2.1 ECA com um passe

Três amostras de aço AISI 316 foram processadas por ECA. As amostras foram processadas na temperatura ambiente em uma máquina universal de ensaios Shimadzu, modelo AG-I, com capacidade máxima de carga de 300 kN, do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Foi utilizado como lubrificante dos corpos de prova, e também do canal da matriz, graxa de bissulfeto de molibdênio. Para o ensaio foram utilizadas três velocidades do avanço de punção, sendo elas, 1,5 mm/min, 3,0 mm/min e 6,0 mm/min. As amostras foram processadas uma vez, isto é, sofreram apenas um passe segundo a rota A.<sup>(1)</sup>

## 2.2 ECA com Três Passes

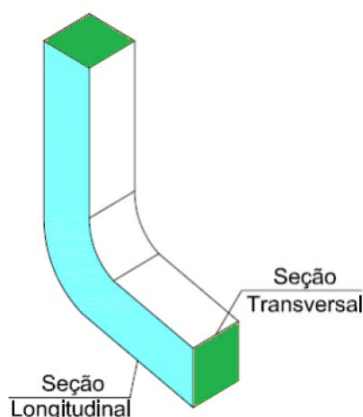
Outra amostra de aço AISI 316 foi processada por ECA nas mesmas condições descritas anteriormente, porém, utilizando velocidade de avanço de punção de 3,0 mm/min e submetida a três passes seguindo a rota A,<sup>(1)</sup> isto é, seguindo sempre a mesma rota de extrusão. Entre cada passe foi realizado o ensaio para determinação da Dureza Vickers através de microidentação.

## 2.3 Laminação

Para efeito de comparação com a amostra processada por ECA por três passes, foi realizado o processamento de laminação de uma amostra. A amostra foi processada na laminadora da marca FENN modelo 042/4-046, onde elas sofreram reduções de espessura de 10, 20, 40, 60, 80 e 90%.

## 2.4 Análise do Material Processado

A metalografia foi realizada para a verificação e constatação de fases presentes na microestrutura do aço. Para a análise metalográfica as amostras após serem processadas foram cortadas em disco diamantado na máquina Buehler, modelo Isomet, instalado no DEMA, da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Uma amostra não processada também foi cortada para comparação com as demais. As que foram processadas por ECA com um passe foram cortadas e embutidas em duas seções, a seção longitudinal e a transversal. A que foi processada por ECA com três passes não foi submetida ao corte. A submetida à laminação foi cortada e embutida apenas na seção longitudinal. Para o embutimento foi utilizado baquelite, no embutidor de amostras metalográficas Arotec, modelo PRE-30, utilizando pressão de 200 kgf/cm<sup>2</sup>. A Figura 3 representa a amostra passando pelo canal de extrusão, sendo que a seção longitudinal esta representada em azul, e em verde a seção transversal analisada.



**Figura 3** – Representação das seções estudadas das amostras processadas por ECA, onde em azul esta representada a seção longitudinal estudada e em verde a seção transversal.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

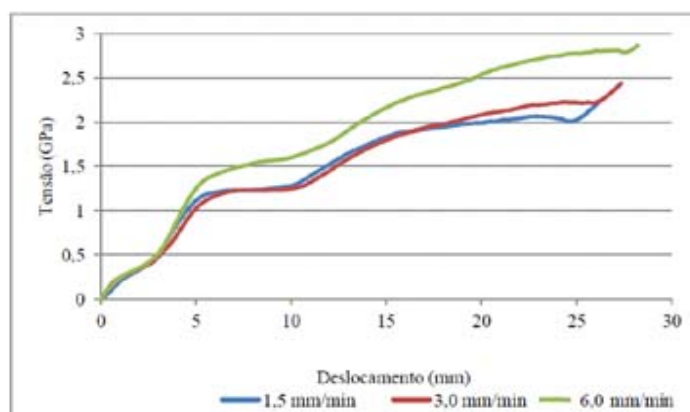
A microestrutura da amostra padrão, isto é, a amostra não processada está mostrada na Figura 4. Pode-se observar, na imagem, a existência de grãos

equiaxiais, com tamanhos em torno de 50  $\mu\text{m}$ , e a presença de apenas uma única fase. Também é possível visualizar a presença de muitas maclas de recozimento no material inicial típicas para este aço. Antes da amostra passar por qualquer tipo de processamento foi realizada a medida de dureza Vickers por microidentação e o valor encontrado foi de 220 HV.



**Figura 4** – Microestrutura do Aço AISI 316 inicial.

O comportamento das tensões atingidas durante a extrusão foram calculadas em função da força de compressão aplicada sobre a área da seção transversal dos corpos de prova durante o processamento das amostras de aço inoxidável austenítico AISI 316 por ECA. A Figura 5 mostra a evolução da tensão de processamento nas velocidades investigadas.



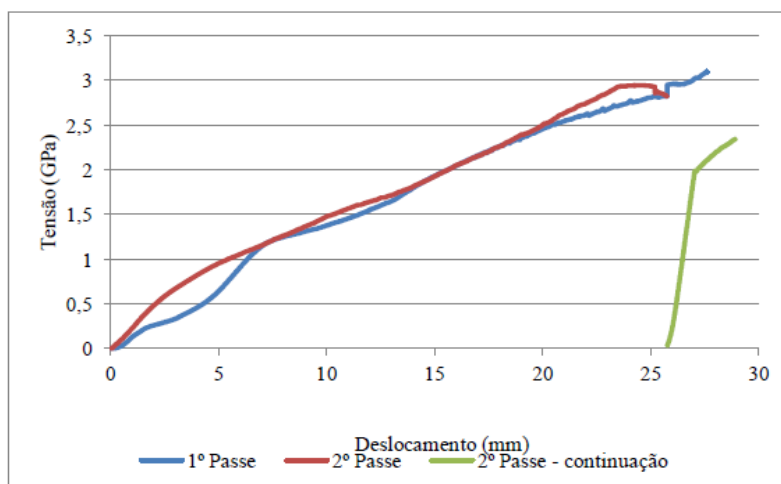
**Figura 5** – Evolução da tensão de processamento para diferentes velocidade de processamento em ECA.

O gráfico da Figura 5 demonstra o aumento da tensão durante a extrusão e que a tensão também aumenta com o aumento da velocidade de extrusão atingindo 2.2 GPa para a velocidade de 1,5 mm/min, com a velocidade de 3,0 mm/min foi de 2.4 GPa e na velocidade de 6,0 mm/min atingindo um máximo de 2.9 GPa.

Analisando o gráfico, observa-se que o aumento contínuo da tensão ao longo das curvas, indica que o atrito gerado entre o material e a superfície do canal de saída contribui para a tensão final de processamento. Como com o passar do processamento, aumenta a porção do corpo de prova presente no canal de saída, crescendo a área de contato entre as superfícies do aço processado e das paredes

do canal da matriz, aumentando a contribuição do atrito na tensão atingida, já que o material que passou pelo “cotovelo” está severamente encruado.<sup>(7,8)</sup>

Outro ponto a ser considerado é o número de passes ao qual o material foi submetido. Analisando o gráfico da Figura 6, pode-se visualizar o desenvolvimento da tensão durante a extrusão, e também que esta foi praticamente a mesma durante ambos os passes, porém, durante o segundo passe ocorreu a quebra do punção, ocasionando uma interrupção para troca do mesmo, e na sequência, deu-se continuidade ao ensaio. Os dados das tensões atingidas no terceiro passe foram perdidos.

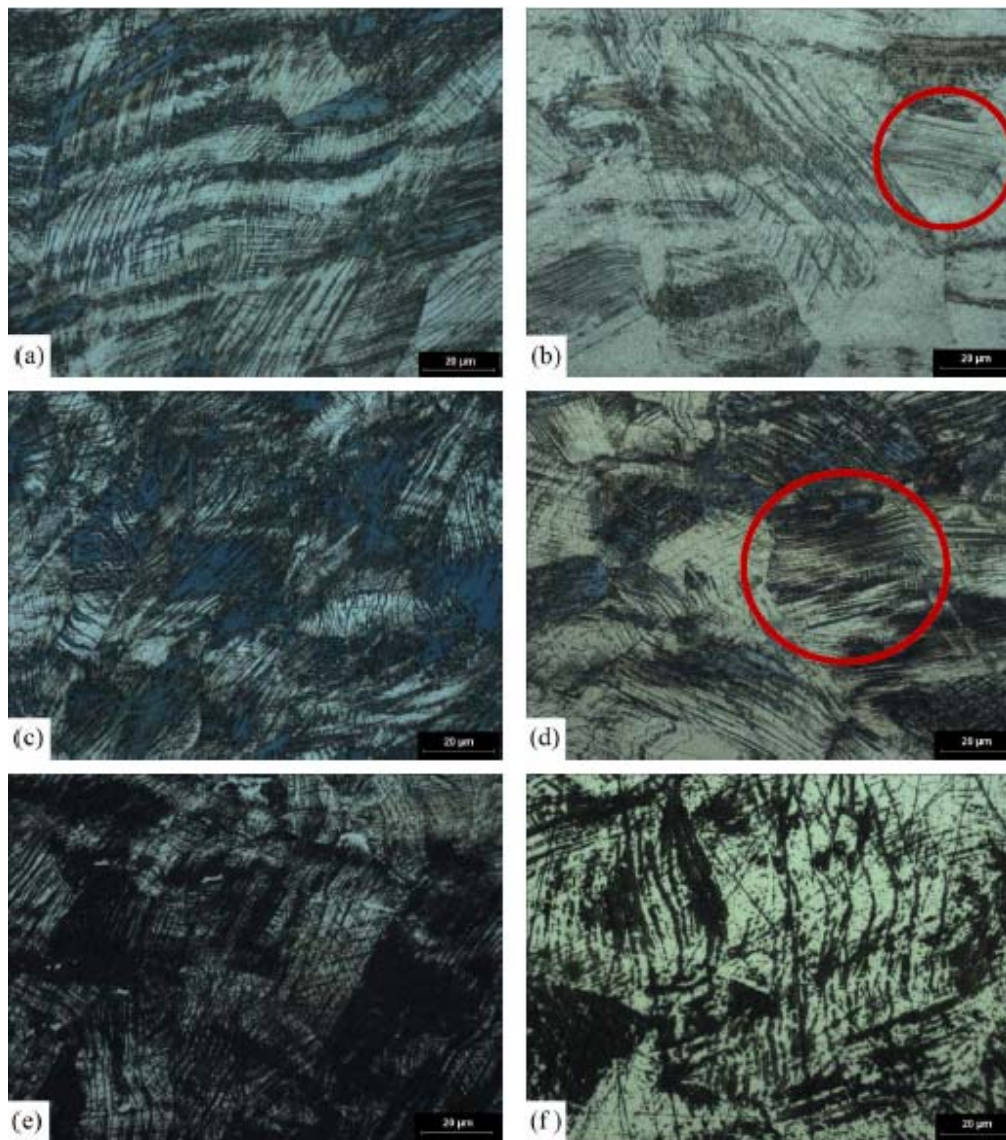


**Figura 6** – Evolução da tensão de processamento em função do número de passes.

Dados da literatura mostram que o aumento da tensão de processamento não aumenta continuamente com o número de passes e tendem a estabilizar após a saturação da capacidade de encruamento do material.<sup>(4,8)</sup> O material processado neste estudo, o aço inoxidável austenítico AISI 316, provavelmente saturou a sua capacidade de encruamento no primeiro passe, por isso as curvas obtidas para os diferentes passes são parecidas, já para o aço inoxidável duplex, estudado por Farias, Pontes e Cintho<sup>(7)</sup> e Farias,<sup>(8)</sup> esta saturação não ocorreu.

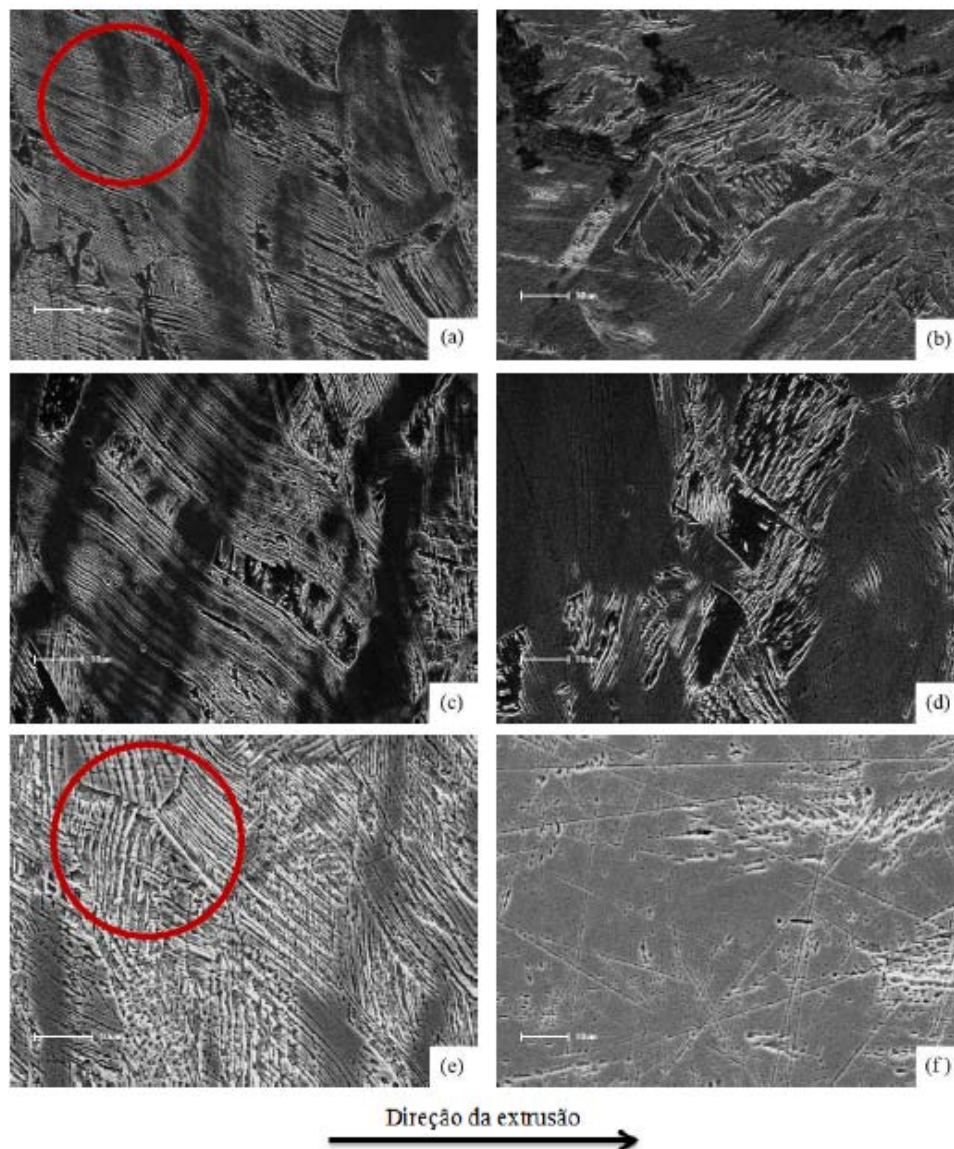
Na Figura 7 (a) são mostradas as imagens obtidas por microscopia ótica e na Figura 8 as imagens realizadas no microscópio eletrônico de varredura. Logo abaixo das figuras está representado a direção de extrusão, entretanto deve-se destacar que apenas há sentido apenas considerar em direção para a seção longitudinal, uma vez que a seção de extrusão é normal a seção transversal.

Por meio da análise metalográfica das amostras processadas é possível observar (em destaque nas Figuras 7 e 8) a formação de bandas de deformação e/ou cisalhamento, e que a presença dessas bandas é mais intensa na seção longitudinal. Este fato decorre do maior cisalhamento aplicado no plano definido pelos canais do que no plano da seção transversal a estes, devido ao maior atrito a que essa seção apresenta em relação a esta.



**Figura 7** - Amostras processadas por ECA com apenas um passe na temperatura ambiente e atacadas com reagente Behara fotografadas no microscópio ótico (a) Seção Longitudinal, velocidade 1,5 mm/min; (b) Seção Transversal, velocidade 1,5 mm/min; (c) Seção Longitudinal, velocidade 3,0 mm/min; (d) Seção Transversal, velocidade 3,0 mm/min; (e) Seção Longitudinal, velocidade 6,0 mm/min; (f) Seção Transversal, velocidade 6,0 mm/min.

Comparando as seções transversais e longitudinais com velocidades de 1,5 mm/min, 3,0 mm/min e 6,0 mm/min, percebe-se que existe uma influência da velocidade de extrusão na quantidade de bandas de deformação e/ou cisalhamento formadas. Por meio da análise comparativa é possível verificar que com o aumento da velocidade ocorre também um aumento das bandas de deformação e/ou cisalhamento formadas. Devido a quantidade elevada de bandas de deformação e/ou cisalhamento formadas e ao ataque químico severo torna-se difícil visualizar os contornos dos grãos. De uma forma geral, as amostras sofreram uma deformação extremamente severa, dificultando a diferenciação entre as bandas de deformação e as bandas de cisalhamento. É evidente o aumento do encruamento durante a deformação por cisalhamento, indicado pelo aumento de dureza Vickers, além da formação das bandas de deformação e/ou cisalhamento.

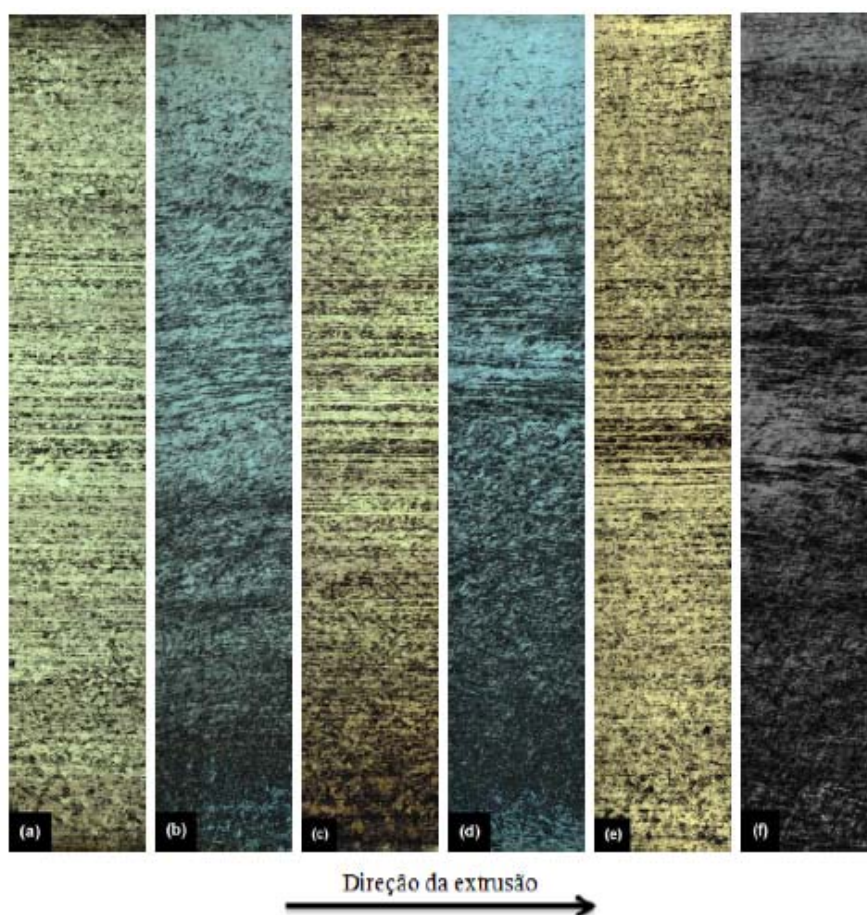


**Figura 8** - Amostras processadas por ECA com apenas um passe na temperatura ambiente e atacadas com reagente Behara fotografadas no microscópio eletrônico de varredura (a) Seção Longitudinal, velocidade 1,5 mm/min; (b) Seção Transversal, velocidade 1,5 mm/min; (c) Seção Longitudinal, velocidade 3,0 mm/min; (d) Seção Transversal, velocidade 3,0 mm/min; (e) Seção Longitudinal, velocidade 6,0 mm/min; (f) Seção Transversal, velocidade 6,0 mm/min.

Através das imagens obtidas no microscópio ótico foi realizada uma foto montagem de toda a seção transversal e longitudinal da amostra, e estas imagens estão representadas na Figura 9, onde pode-se observar toda a seção, longitudinal e transversal. Pode-se notar que há uma heterogeneidade de deformação ao longo da seção, visualiza-se este efeito através da diferença de tonalidade da seção, sendo as partes escuras as bandas de deformação e/ou cisalhamento. Foi possível verificar que, nas extremidades das seções, são as regiões onde ocorre a maior deformação devido ao atrito da amostra com a matriz. Observa-se que na parte inferior da seção (mais afastada do ângulo que os canais fazem entre si,  $\phi$ ), uma maior deformação ocorreu e nota-se que esta região está sujeita a maior atuação das forças de atrito entre o material processado e a parede inferior do canal da matriz. Obter uma deformação plástica homogênea em um metal é algo muito difícil porque normalmente diferentes sistemas de deslizamento são acionados, ocorrendo



então na maioria dos casos uma distribuição heterogênea da deformação plástica, então a distribuição dos defeitos cristalinos em um material deformado é heterogênea.<sup>(8)</sup>



**Figura 9** - Foto montagem de toda a seção transversal e longitudinal das amostras realizadas com as imagens obtidas no microscópio ótico das amostras processadas por ECA na temperatura ambiente com apenas um passe do aço inoxidável austenítico AISI 316 atacadas com reagente Behara (a) Seção Transversal, velocidade 1,5 mm/min; (b) Seção Longitudinal, velocidade 1,5 mm/min; (c) Seção Transversal, velocidade 3,0 mm/min; (d) Seção Longitudinal, velocidade 3,0 mm/min; (e) Seção Transversal, velocidade 6,0 mm/min (f) Seção Longitudinal, velocidade 6,0mm/min.

As Tabelas 2 e 3 mostram a evolução da dureza das amostras processadas por ECA em função do número de passes e das amostras processadas por laminação convencional em função da redução de espessura, respectivamente.

**Tabela 2** - Valores obtidos no ensaio de dureza Vickers por microidentação para a amostra processada por ECA na velocidade de 3,0 mm/min na seção longitudinal

Amostra	Dureza Vickers por microidentação por posição		
	1	2	3
1º Passe	390 ± 10	400 ± 13	473 ± 26
2º Passe	424 ± 19	473 ± 25	498 ± 14
3º Passe	489 ± 12	525 ± 21	504 ± 16

Observa-se que os níveis de dureza determinados para o material processado em ECA em um passe atinge níveis correspondentes à laminação com redução de 80% na espessura enquanto que para três passes de ECA, a dureza atingida podem ser comparáveis às obtidas em níveis de deformação de 90%. Deve-se ressaltar entretanto que, diferentemente ao processamento por laminação, o processamento por ECA mantém praticamente inalteradas as dimensões iniciais do material processado.

**Tabela 3** - Valores obtidos no ensaio de dureza Vickers por microidentação para a amostra processada por Laminação na seção longitudinal

% de redução de espessura esperada	% de redução de espessura obtida	Dureza Vickers por microidentação
10	11,11	269 ± 15
20	20,26	315 ± 15
40	39,87	369 ± 7
60	62,09	439 ± 15
80	80,39	480 ± 23
90	88,89	532 ± 17

## 5 CONCLUSÕES

Como principais conclusões do presente trabalho tem-se:

- no processamento pode Extrusão em Canal Angular do aço AISI 316 elevado níveis de tensão de processamento (2,9 GPa) foram atingidos;
- não foi observado o aumento significativo da tensão de processamento com o número de passes de ECA aplicados;
- verificou-se heterogeneidades de deformação ao longo da seção transversal em função do atrito do material processado por ECA com a matriz; e
- os níveis de dureza atingidos pelo material processado por ECA foram comparáveis com o material laminado com redução de espessura de 80% a 90% .

## Agradecimentos

A autora Tamires Brekailo agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação do programa PIBIC da UEPG.

## REFERÊNCIAS

- 1 VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Progress in Materials Science. USA, v. 6, p. 881-981, 2006.
- 2 GONÇALVES, L. R. G., SORDI, V. L. AND FERRANTE, M. (2006) “Efeito da Extrusão em Canal Angular na Microestrutura e na Resistência Mecânica de uma Liga Al-4%Cu”, In Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, p. 7533-7534.
- 3 MENDES FILHO, A. A., SORDI, V. L., FERRANTE, M. AND RUBERT, J. B. (2008) “A Influência da Geometria da Matriz de Deformação em Canal Angular (ECA) na Intensidade e Homogeneidade da Deformação”, In Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 18, p. 2. 55

- 4 PRADOS, E. F., SORDI, V. L., & FERRANTE, M. Microstructural development and tensile strength of an ECAP- deformed Al-4 wt.(%)Cu alloy. *Materials Research*, 11(2), 199-205, 2008
- 5 SHIN D. H.; PARK J.J.; CHANG S. Y.; LEE Y.K.; PARK K.T. Ultrafine Grained Low Carbon Steels Fabricated by Equal Channel Angular Pressing: Microstructures and Tensile Properties. *ISIJ International*. vol. 42. 12. p. 1490-1496. 2002.
- 6 HUANG C.X.; YANG G.; GAO Y.L.; WU S.D.; ZHANG Z.F.. Influence of Processing Temperature on the Microstructures and Tensile Properties of 304L Stainless Steel by ECAP. *Materials Science and Engineering*. A485. p.643– 650.2008.
- 7 FARIAS, F. A.; PONTES, M.J.H; CINTHO, O. M.; Processing of a Duplex Stainless Steel by Equal Channel Angular Extrusion; *Revista Matéria*, V.15; n.2; pp.356-369;2010.
- 8 FARIAS F. A. Processamento de Aço Inoxidável Duplex por Extrusão em Canal Angular. dissertação de mestrado; Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais UEPG. 2009.