

ESTUDO COMPARATIVO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS EXPANDIDAS DE AÇOS C-MN E INOXIDÁVEIS

Geraldo Lúcio de Faria ¹
Leonardo Barbosa Godefroid ¹
Joner Oliveira Alves ²

Resumo

Chapas expandidas são conhecidas como um material metálico com orifícios em forma de losango, produzidos por cortes e alongamento. Elas são usualmente fabricadas em aço carbono, mas o aço inoxidável pode também ser especificado em caso de ambientes corrosivos. Neste trabalho foram estudadas e comparadas amostras de chapas expandidas de aços inoxidáveis e aço carbono, em termos de microestrutura e propriedades mecânicas medidas em ensaios de dureza, tração e dobramento. Os resultados mostram que todas as microestruturas são influenciadas pelo processo de expansão da chapa, apresentando grãos com deformação e encruamento predominantemente nas hastes. Foi possível concluir que as diferenças entre materiais não impedem a fabricação de um produto superior em termos de resistência à corrosão e maior durabilidade em ambientes altamente agressivos.

Palavras-chave: Chapas expandidas; Aços inoxidáveis ferríticos; Ensaios mecânicos.

COMPARATIVE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF EXTENDED SHEETS PRODUCED FROM C- MN AND STAINLESS STEEL

Abstract

Extended sheets are commonly known as metallic component with diamond shaped holes conformed by cut followed by strain. They are mostly manufactured by C-Mn mild steel, but in corrosive environment, it is suggested to replace the C steel by stainless steel. This work is a comparative study about mechanical behaviors of extended sheets made by ferritic stainless steels and low C mild steel. Optical microscopy, hardness, tensile and bending tests have been carried out. Results show that the microstructures are influenced by the expansion process. Deformed grains were observed mainly in the extended sheet rods. It was concluded that stainless steels are also suitable material for those products when superior corrosion resistance are mandatory for applications in aggressive environments.

Keywords: Extended sheets; Ferritic stainless steel, Mechanical tests.

I INTRODUÇÃO

O emprego dos aços inoxidáveis na fabricação de alguns componentes de máquinas industriais estabeleceu-se como importante alternativa para um decréscimo na perda específica por corrosão [1-3].

As chapas expandidas são fabricadas por corte e repuxo mecânico sendo, transformadas em telas rígidas, inteiriças e uniformes que proporcionam um menor custo por área quando comparadas a chapas convencionais. Conforme o tipo de malha, elas podem ser usadas em filtros, pisos industriais, grades, portões, e uma infinidade de produtos que a engenhosidade humana é capaz de desenvolver [4].

Em aplicações mais robustas, elas são fabricadas a partir de aços carbono em razão do atendimento de propriedades mecânicas e principalmente custo, visto que hoje no Brasil, o controle de qualidade deste produto é feito basicamente com base na composição química e, algumas vezes, na dureza (rudimentar para se trabalhar com análise e seleção de materiais). Entretanto, quando se contabiliza o custo-benefício em razão de paradas de manutenção em decorrência de perdas por corrosão, as chapas em aço-carbono se tornam menos atrativas, principalmente em setores como

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

E-mail: geraldofaria@yahoo.com.br

²APERAM South America, Timóteo, MG, Brasil.



o sucroenergético e o petrolífero, onde as condições de trabalho são mais severas [4-8].

Nestes casos, os aços inoxidáveis se apresentam como uma solução alternativa, embora com custo específico mais elevado. Uma alternativa para tornar as chapas expandidas de aço inoxidável mais competitivas seria a redução de sua espessura sem o comprometimento da durabilidade e segurança [4-7].

Como a indústria de chapas expandidas não possui uma norma ou método que possibilite caracterizar e comparar chapas feitas de materiais diferentes, o presente estudo propõe uma metodologia experimental de comparação das características mecânicas e estruturais de chapas expandidas pioneiramente confeccionadas de aços inoxidáveis ferríticos AISI 410D e AISI 444A (espessura de 4,5mm) com as tradicionais de aço carbono ABNT 1010 com maior espessura (5,5mm).

A utilização do aço inoxidável 410D é aconselhável quando a aplicação requer resistência a abrasão, especialmente em ambientes úmidos, que são requisitos típicos das indústrias de álcool e açúcar [4-7].

O aço inoxidável 444A possui composição química que garante que a camada passiva permaneça estável em ambientes redutores onde íons de cloreto estão presentes. Este efeito é obtido pela adição do molibdênio e pelo elevado teor de cromo. Por esta razão, este aço é comumente aplicado em aquecedores, evaporadores, cozedores a vácuo, cristalizadores e secadores na indústria sucroalcooleira [8-10].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram comparadas chapas expandidas fabricadas especialmente para o desenvolvimento deste trabalho dos aços inoxidáveis AISI 410D e AISI 444A com as similares do aço carbono ABNT 1010. A Tabela I apresenta a composição química dos aços citados. Os aços inoxidáveis possuem teor de carbono muito inferior ao do aço carbono. A adição de Ti e Nb nos mesmos visa evitar a precipitação de carbonitretos de cromo e consequentemente reduzir a corrosão por sensitização na soldagem [8, 11-13].

2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Caracterização estrutural

A Figura 1a mostra a chapa expandida como recebida. Devido à geometria complexa, foram analisadas duas regiões distintas: o nó e a haste, Figura 1b.

Ambas as regiões, para cada aço, foram metalograficamente preparadas e analisadas nas secções superficial, longitudinal e transversal, com o auxílio de um microscópio óptico Olympus Cx 31.

Tabela I. Composição química dos materiais utilizados (% em massa)

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	N ₂ (ppm)
410D	0,007	0,58	0,57	0,022	0,0005	11,3	0,34	0,007	0,017	0,003	134
444A	0,009	0,21	0,53	0,021	0,0006	17,5	0,32	1,791	0,164	0,162	116
1010	0,090	0,47	0,01	0,014	0,0177	-	-	0,002	-	-	-

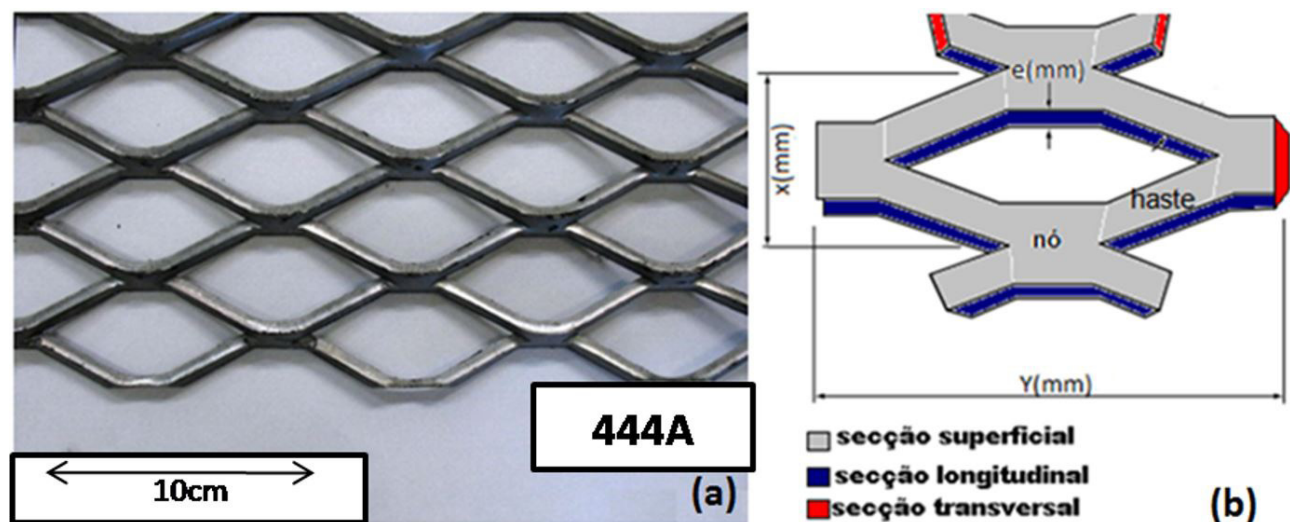


Figura 1. (a) Amostra de chapa expandida recebida para a realização deste trabalho; (b) Detalhe de um losango da chapa, onde se destacam o nó e a haste da malha $x=40\text{mm}$ e $y=100\text{mm}$.

2.2.2 Ensaios mecânicos

Os ensaios buscaram avaliar o desempenho mecânico das chapas em termos de dureza, tração e dobramento.

Foram realizadas 10 medições de dureza Vickers para cada aço, tanto nos nós quanto nas hastes com o auxílio de um durômetro universal Otto Wolpert-Werke. A carga utilizada foi de 30kgf e o tempo de aplicação de 30s.

Como não existem normas para ensaios de tração em chapas expandidas, foi proposta uma metodologia de ensaio. A geometria dos corpos de prova de tração levou em consideração que a máquina exercesse o carregamento sobre apenas dois nós da região central do corpo de prova, conforme apresenta a Figura 2. As demais dimensões das chapas, como espessura das hastes e distâncias entre nós (x e y na Figura 1) foram mantidas inalteradas. Cinco corpos de prova foram ensaiados para cada aço e os valores médios de carga e deslocamento calculados.

A geometria das chapas expandidas torna a distribuição de tensões complexa ao longo da treliça. Apesar de o carregamento tratativo ser uniaxial, como apontado na Figura 2, o estado de tensões desenvolvido nas hastes da chapa não é, visto que elas estão inclinadas em relação ao eixo de carregamento. Esta condição gera componentes de tensão normal e cisalhantes nas hastes. Durante o ensaio, as componentes cisalhantes de tensão promovem o fechamento da malha, ou seja, à medida que a chapa se deforma, o ângulo entre as hastes e o eixo de carregamento diminui. Como consequência, as tensões cisalhantes diminuem e as tensões normais aumentam.

O objetivo deste trabalho não foi medir propriedades específicas dos aços, mas sim avaliar o desempenho dos mesmos nas geometrias propostas. Portanto, optou-se por registrar e

trabalhar com curvas do tipo força versus alongamento até a fratura da amostra e não com as clássicas curvas de tensão versus deformação.

As superfícies de fratura do ensaio de tração foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação dos mecanismos de fratura.

Os ensaios de dobramento a 90°, foram executados conforme ilustra a Figura 3. As relações geométricas entre o ângulo de dobramento (θ) e a distância de deslocamento do punção (h) são representadas na Figura 4. Observa-se que foram utilizadas relações entre triângulos retângulos e triângulos isósceles, para se determinar o ângulo de dobramento (θ) em função do deslocamento do punção(h).

Considerando que o punção tenha se deslocado de uma altura h em relação à referência horizontal, a chapa dobrada fará com esta horizontal um ângulo φ . Por definição, o ângulo de dobramento (θ) pode ser calculado pela Equação 1. Aplicando-se a relação trigonométrica da tangente ($\text{tg } \varphi$) no triângulo retângulo que contém φ , obtém-se a Equação 2, e dela a 3. Substituindo a Equação 3 na 1, finalmente temos o ângulo de dobramento (θ) como uma função do deslocamento do punção (Equação 4).

$$\theta = 2 \times \varphi \quad (1)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{h}{\frac{128}{2}} \quad (2)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{2 \times h}{128} \quad (3)$$

$$\theta = 2 \times \text{tg}^{-1} \frac{2 \times h}{128} \quad (4)$$

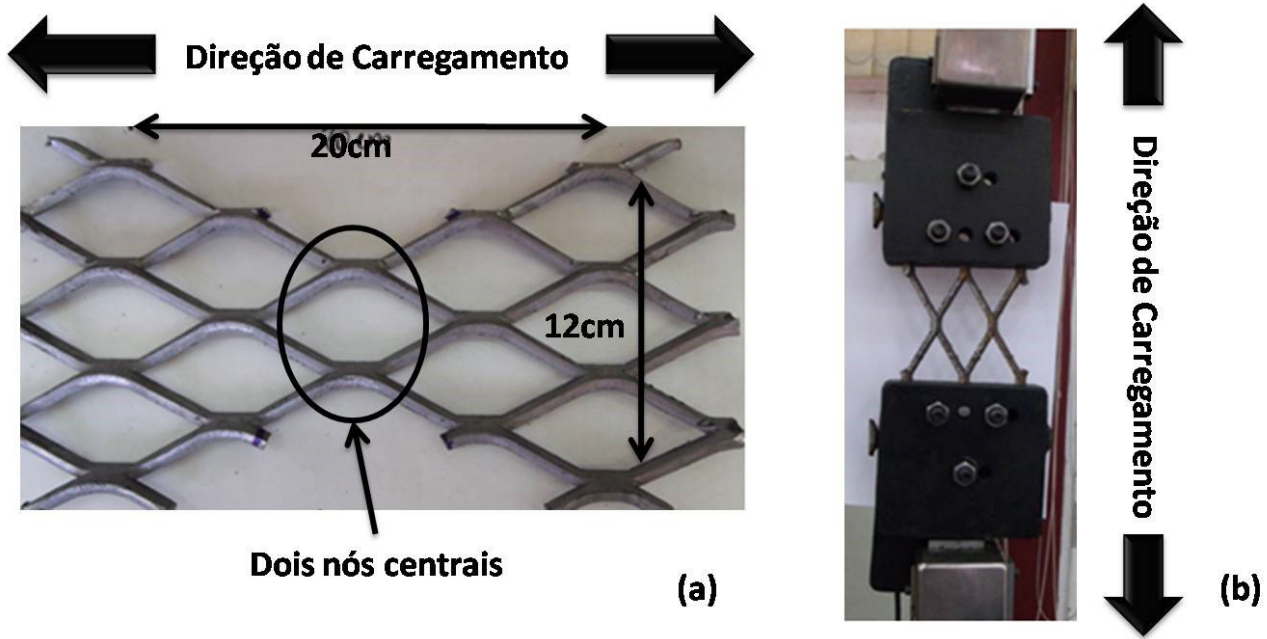


Figura 2. (a) Geometria padrão adotada para os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração; (b) corpo de prova posicionado nas garras da máquina de ensaio.



Figura 3. Montagem do ensaio de dobramento.

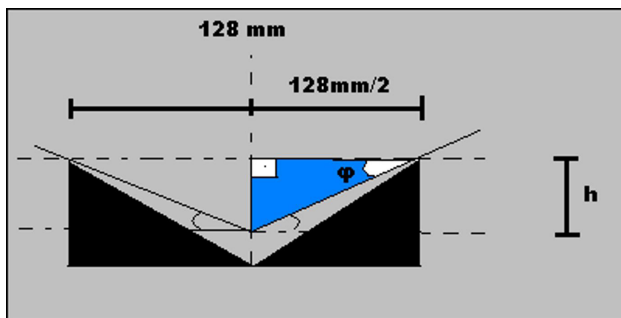


Figura 4. Esquema das relações utilizadas para obtenção do ângulo de dobramento.

O padrão também estabeleceu que o punção exercesse o esforço de dobramento sobre as hastes e não sobre os nós, visto que estas são as regiões de menor resistência mecânica. Após dobramento, as amostras foram inspecionadas quanto a defeitos. Em uma segunda etapa, as amostras foram submetidas a ensaios de dobramento a 180° (sobre si próprio). Cinco corpos de prova de cada aço foram ensaiados.

Para a execução dos ensaios de tração e dobramento, foi utilizada uma máquina universal de ensaios com capacidade de 10 toneladas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

As microestruturas das seções transversais das chapas expandidas estão apresentadas na Figura 5. Os três aços estudados são constituídos por grãos de ferrita, conforme esperado [8-13]. Verificou-se que o aço inoxidável AISI 410D possuía estrutura bastante refinada em comparação com os demais, com tamanho médio de grãos de 10 μ m. Por outro

lado, o aço inoxidável AISI 444A apresentou uma estrutura bem mais grosseira, com grãos apresentando tamanhos entre 60 μ m e 80 μ m. Os grãos do aço carbono são de tamanho médio intermediário (30 μ m).

Foi no sentido transversal onde se observou o maior efeito da deformação plástica decorrente do processo de fabricação sobre a morfologia dos grãos dos aços AISI 410D e AISI 444A. Supõe-se que o alongamento dos grãos seja decorrente da combinação da laminação convencional das chapas e de sua expansão, visto que o sentido transversal das chapas expandidas corresponde ao sentido longitudinal das chapas convencionais, que foram laminadas a quente e não recozidas. As diferenças entre os nós e as hastes seriam justificadas pela componente de deformação associada ao processo de expansão que fica mais evidente na interface entre as duas regiões, como ilustra a Figura 6. Destaca-se que no processo de expansão as lâminas cisalham as hastes, promovendo um dobramento localizado na interface, enquanto os nós permanecem pouco alterados [4,5].

3.2 Ensaios Mecânicos

Os resultados das durezas Vickers (H_v) mostram que as hastes possuem maior dureza do que os nós (Figura 7). Esta diferença é resultado do maior grau de deformação no processo de conformação das chapas, como verificado na caracterização microestrutural.

A Figura 8 apresenta as curvas de carga versus alongamento das chapas expandidas. Cada curva foi obtida a partir de uma média de cinco ensaios. Observa-se que a chapa de aço inoxidável AISI 444A apresentou maior alongamento e suportou maior carga. O aço inoxidável AISI 410D e o aço carbono ABNT 1010 apresentaram desempenho semelhante.

A estrição é apresentada na Figura 9. Foi confirmado que a fratura ocorre sistematicamente na interseção entre as hastes e os nós por causa da concentração de tensão naquela região e pela intensa deformação plástica decorrente do processo de expansão. As fraturas foram analisadas por MEV, conforme mostra a Figura 10. Observa-se que o mecanismo de fratura para os três aços estudados é o de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, típico das fraturas dúcteis.

A literatura aponta que o limite de escoamento do aço inoxidável 444A é superior ao do 410D, assim como a baixa estrição do 410D é esperada em função de seus grãos mais refinados e pela presença de carbonetos de Cr e Mo [2,3,8-11,13]. Portanto, os resultados, que estão de acordo com a caracterização microestrutural e com a literatura, indicam que as chapas dos aços AISI 444A e 410D mesmo com menor espessura, possuem desempenho superior em tração do que a chapa ABNT 1010.

Os dados de deslocamento da garra obtidos no ensaio de dobramento foram substituídos nas Equações de 1 a 4 para determinação dos ângulos de dobramento. Assim, foi possível obter a curva de ângulo de dobramento em

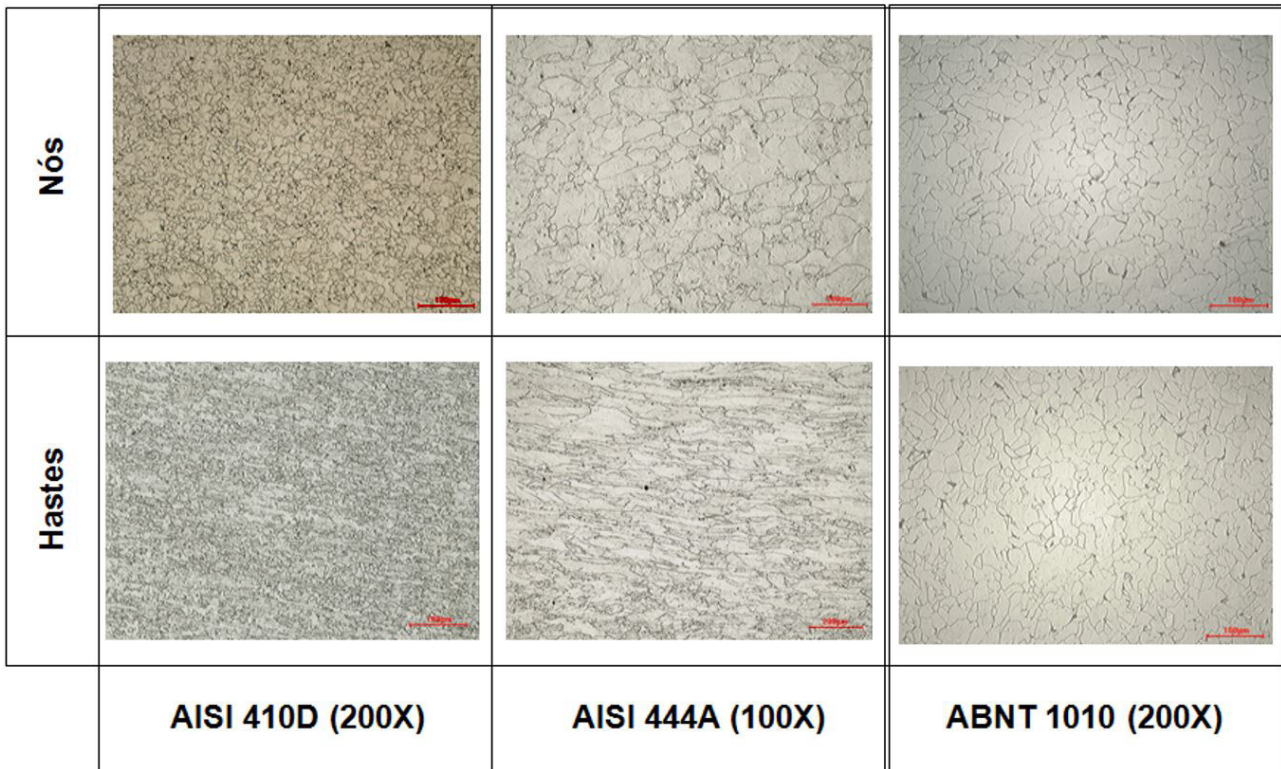


Figura 5. Microestruturas das seções transversais das hastes e dos nós dos aços estudados.

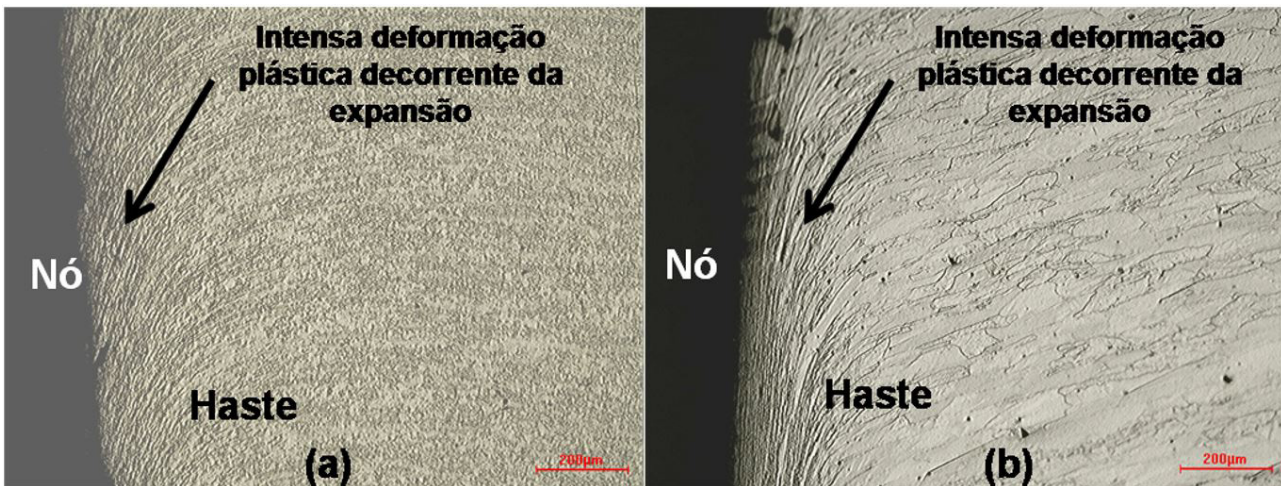


Figura 6. Microestruturas das interfaces haste-nó dos aços (a) 410D; (b) 444A.

função da carga aplicada, que é apresentada na Figura 11. A Figura 12 corresponde ao cálculo da derivada de primeira ordem das curvas da Figura 10.

Inicialmente observa-se que a variação do carregamento versus ângulo de dobramento tem tendência linear, ou seja, está dentro do regime elástico, conforme é previsto pela Lei de Hooke. Em seguida, a taxa de carregamento para a realização do mesmo dobramento é reduzida. Por fim, a curva mostra que existe uma variação muito pequena da carga para uma grande variação do ângulo de dobramento,

indicando que o material já entrou no regime de deformação plástica.

A Figura 12 mostra que para o escoamento das amostras de chapas de aço AISI 444A é necessário uma carga média de 508kgf e para as amostras das chapas de aço inoxidável AISI 410D é necessário próximo de 487kgf (padrão adotado: pontos a partir do qual $dF/d\theta$ se aproxima de uma constante). O escoamento em dobramento das duas chapas teve início quando o ângulo de dobramento alcançava valores próximos a 15°.

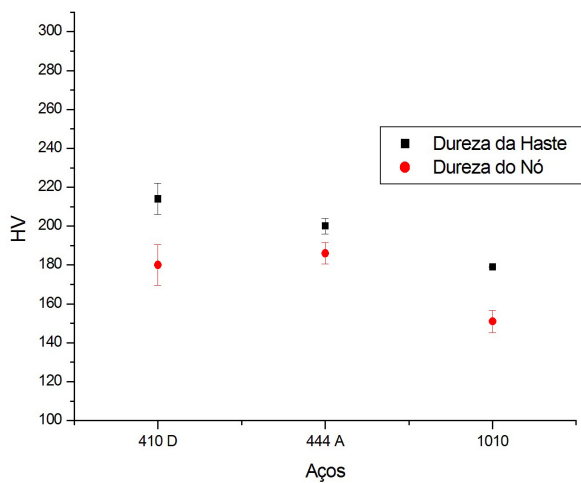


Figura 7. Durezas médias e desvios padrão das hastes e nós das chapas expandidas.

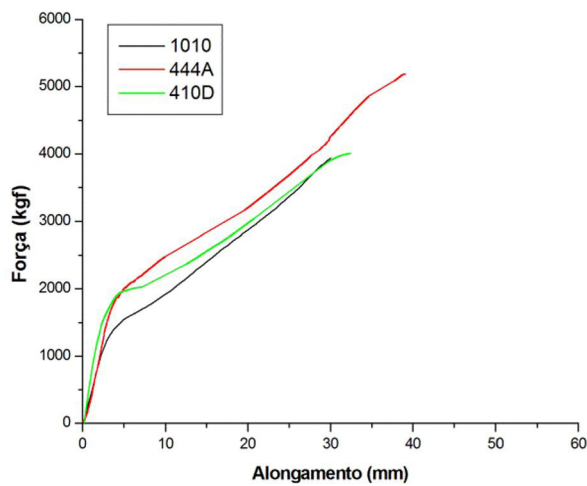


Figura 8. Comparativo das médias das curvas de tração das amostras das diferentes chapas.

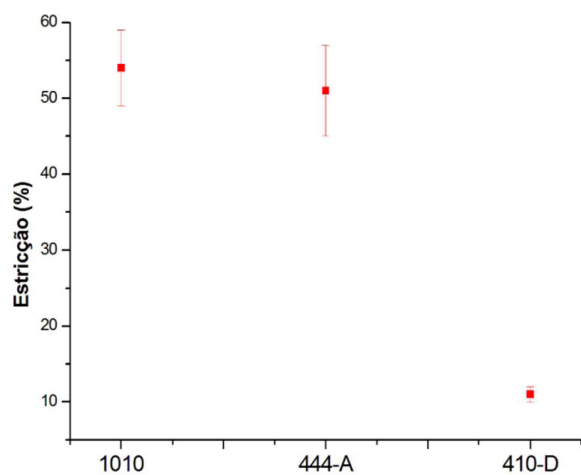
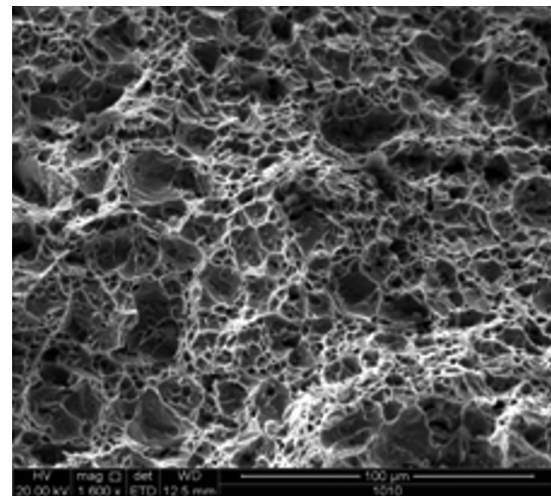
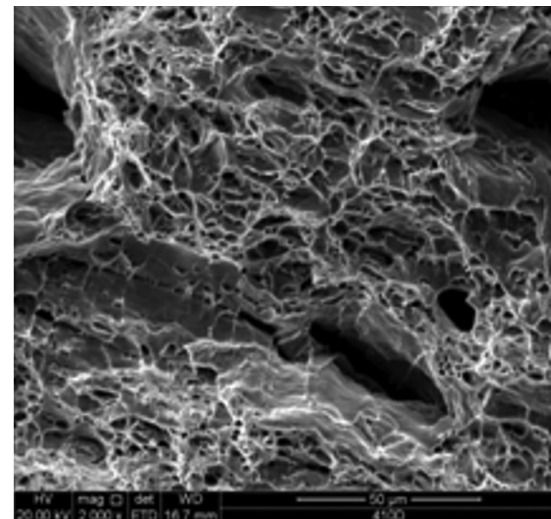


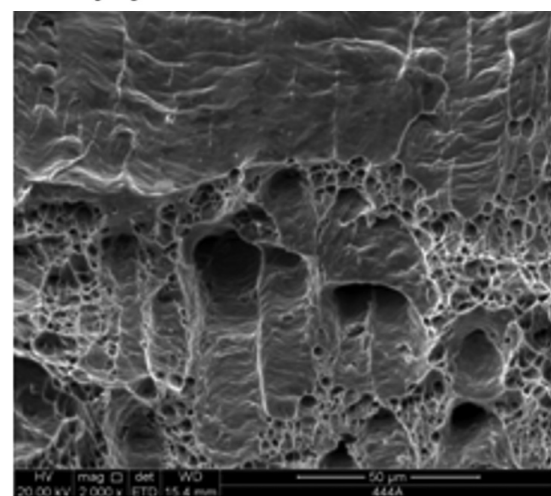
Figura 9. Estrição média e desvio padrão associado dos diferentes materiais.



(a) – MEV – 1600X



(b) – MEV – 2000X



(c) – MEV – 2000X

Figura 10. Fractografias ilustrando a presença de microcavidades em (a) ABNT 1010; (b) AISI 410D; (c) AISI 444A.

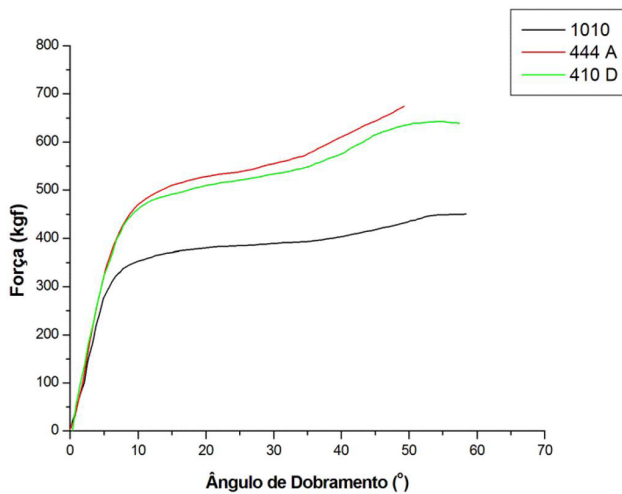


Figura 11. Curvas médias do carregamento versus angulação nas amostras de diferentes chapas.

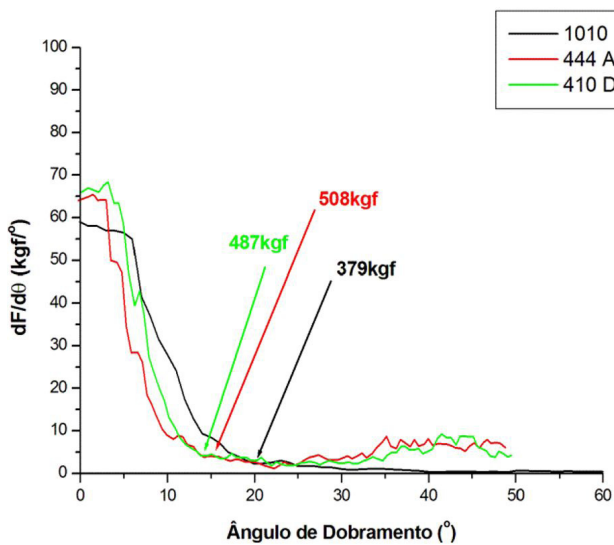


Figura 12. Derivação das curvas médias do carregamento versus angulação nas amostras de diferentes chapas.

As chapas de aço carbono ABNT 1010 escoaram em dobramento a uma carga média de 379kgf, a partir de um ângulo de dobramento próximo de 20°, mostrando que esse material suporta um ângulo de dobramento ligeiramente maior e cargas muito menores antes que escoe em dobramento. Este fato se deve à menor resistência e maior tenacidade deste aço comparado aos inoxidáveis.

Não se observou defeitos nos dobramentos a 90°. Nos ensaios subsequentes de dobramento a 180°, as únicas chapas que apresentaram defeitos foram as de aço inoxidável AISI 410D. Os defeitos variavam de trincas à completa ruptura do material. Todos os defeitos foram observados na interface entre haste e nó das amostras. Segundo a literatura, estes defeitos podem ter sido ocasionados devido às restrições à deformação plástica ocasionadas pela microestrutura

refinada e pela presença de carbonetos de Cr e Mo, comuns neste aço [8, 13].

4 CONCLUSÃO

A metodologia experimental proposta permite a comparação de desempenho mecânico de chapas dos aços inoxidáveis AISI 444A e AISI 410D, com espessura reduzida, com as de aço ABNT 1010 nos modos de sollicitação mecânica em serviços mais comuns para este tipo de produto (tração e dobramento).

As microestruturas dos aços estudados são majoritariamente constituídas por grãos de ferrita, sendo o aço AISI 444A o que apresentou o maior tamanho médio de grãos (70 μ m) e o AISI 410D o menor (10 μ m). Todos os aços apresentaram estrutura de grãos alongados nas hastes em decorrência do processo de expansão das chapas. Estas regiões se apresentaram mais encruadas do que os nós, possuindo assim os maiores valores de dureza.

Em tração, o aço AISI 444A suportou maior nível de carregamento até a ruptura, seguido do AISI 410D e ABNT 1010. O mecanismo de fratura dos três aços foi o de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades (dúctil). Os três aços foram aprovados nos ensaios de dobramento a 90°, sendo o ABNT 1010 o que apresentou menor resistência mecânica. No dobramento a 180° (condição extrema em serviço) o aço AISI 410D apresentou defeitos. Sua ductilidade é limitada pela estrutura refinada de grãos associada à presença de carbonetos de Cr e Mo que aumentam a densidade de pontos preferenciais para a nucleação de microcavidades.

As chapas expandidas de aços inoxidáveis possuem melhor desempenho mecânico em tração e dobramento do que a de aço carbono com espessura convencional. Tendo em vista os benefícios da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, sugere-se a substituição de materiais sem prejuízos em termos de propriedades mecânicas, e o desenvolvimento de um novo produto que pode ser aplicado em ambientes quimicamente agressivos.

Atualmente, na grande maioria das empresas que trabalham com chapas expandidas, tanto fornecedor quanto usuário, não se faz um controle de qualidade adequado do produto, sendo ela restrita apenas à composição química. Este trabalho foi eficiente e pioneiro ao caracterizar os efeitos do processo de fabricação sobre a microestrutura e o comportamento mecânico das chapas expandidas, permitindo que metodologias semelhantes sejam adaptadas e implementadas como critério de seleção de materiais neste segmento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa APERAM por ceder gentilmente as amostras utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Carbó HM. Aço inoxidável desenvolvimento e aplicação. Belo Horizonte: Acesita; 2001.
- 2 Carbó HM. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox; 2008.
- 3 Carvalho JAN. Aços inox: características e propriedades de uso. In: Seminário Inox 2000; 2000; Timóteo, Brasil. Belo Horizonte: Acesita; 2000.
- 4 Labiapari WS, Carvalho JAN, Andrade JR, Alcântara CM, Schmalz RC, Mello JDB. Consolidação de um novo produto: P410d para usinas sucroalcooleiras. Núcleo Inox. 2008;30:299-307.
- 5 Faria GL, Alves JO, Godefroid LB. Chapas expandidas em aço inoxidável ferrítico. Revista do Aço. 2013;9:30-37.
- 6 Labiapari WS, Alcântara CM, Costa HL, Mello, JDB. Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry. Wear. 2013;302:1536-1545.
- 7 Durmoo S, Richard C, Beranger G, Moutia Y. Biocorrosion of stainless steel grade 304L (SS304L) in sugar cane juice. Electrochimica Acta. 2008;54(1):74-79.
- 8 Han J, Li H, Zhu Z, Barbaro F, Jiang L, Xu H, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 18Cr–2Mo ferritic stainless steel thick plate. Materials & Design. 2014;63:238-246.
- 9 Tavares SSM, Souza JA, Herculano LFG, Abreu HFG, Souza CM. Microstructural, Magnetic and Mechanical Property Changes in an AISI 444 Stainless Steel aged in the 560°C to 800°C range. Materials Characterization. 2008;59:112-116.
- 10 Abreu HFG, Bruno, ADS, Tavares SSM, Santos, RP, Carvalho SS. Effect of high temperature annealing on texture and microstructure on an AISI-444 ferritic stainless steel. Materials Characterization. 2006;57(4-5):342-347.
- 11 Lee KS, Yoon DH, Lee SE, Lee YS. The effect of thermomechanical treatment on the interface microstructure and local mechanical properties of roll bonded pure Ti/439 stainless steel multilayered materials. Procedia Engineering. 2011;10:3459-3464.
- 12 Aksoy M, Kuzucu V, Korkut MH. The influence of strong carbide-forming elements and homogenization on the wear resistance of ferritic stainless steel. Wear. 1997;211:265-270.
- 13 Han J, Huijun L, Haigang X. Microalloying effects on microstructure and mechanical properties of 18 Cr-2Mo ferritic stainless steel heavy plates. Materials & Design. 2014;58:518-526.

Recebido em: 16 Mar. 2016

Aceito em: 23 Fev. 2016