

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONFORMABILIDADE DE TRÊS CHAPAS COMERCIAIS DE ALUMÍNIO DISTINTAS COM ESPESSURA VARIÁVEL

Luciano Augusto Lourençato, lalouren@utfpr.edu.br¹

Davi Fusão, davi@utfpr.edu.br¹

Keith Valengo Pinheiro, keith_vp@hotmail.com¹

¹UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Ponta Grossa, CEP 84016-210, PR, Brasil, (55)-(42)-32357061.

Resumo: Os metais, em especial o alumínio, são de extrema importância na vida moderna. Isso se deve às suas características mecânicas, como baixo peso específico, boa resistência mecânica e fácil conformabilidade. Porém, na maioria de suas utilizações, os metais são sujeitos às modificações de forma e dimensões, a fim de adequá-los ao uso final. Uma das maneiras de se obter estas modificações ocorre por meio da aplicação de esforços externos através da conformação mecânica dos metais, tal como o processo de laminação. O objetivo deste trabalho é o estudo das propriedades de chapas comerciais distintas de alumínio com três diferentes espessuras (0,5 mm; 1 mm e 2 mm), segundo três diferentes direções (na mesma direção da laminação, 45° e 90° com relação à direção da laminação). As chapas foram obtidas sem informações técnicas a respeito de suas composições químicas, devido aquisição via licitação. Para tanto, foram analisadas através: da espectrometria suas composições químicas; a estampabilidade pelo ensaio Erichsen; e caracterização da propriedade mecânica pelo o ensaio de tração. Com o propósito de realizar uma análise estatística dos dados obtidos com os ensaios Erichsen, foi utilizado o software Minitab 17. Esse software permitiu que fossem realizadas diversas combinações entre os fatores relevantes neste trabalho, que são os materiais, as espessuras e as direções de laminação. Como resultado, de maneira geral, a direção de laminação não afetou significativamente a tensão de escoamento. O índice de embutimento mostrou ser influenciado pelo tipo de material, mas não é influenciado pela direção de laminação.

Palavras-chave: Alumínio, Conformação Mecânica, Ensaio Erichsen.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Chiaverini (1996), as chapas devem possuir boa ductilidade para garantir maior facilidade de conformação, boa soldabilidade, superfície sem defeitos e baixo custo. Para Bresciani et al. (2011), elas são distinguidas em laminadas a quente, laminadas a frio e revestidas (galvanizadas, aluminizadas e pré-pintadas), sendo a conformabilidade plástica diferente para cada tipo. Dentre os fatores que influenciam a conformabilidade das chapas metálicas estão a composição química, a textura, a microestrutura, o encruamento, as dimensões da chapa e o acabamento superficial. Porém, segundo Lian et al. (1989), a conformabilidade de chapas metálicas depende principalmente das tensões limites de conformação e da uniformidade na distribuição dessas tensões.

Nas chapas metálicas, a resposta à deformação plástica se manifesta por meio de diferentes fenômenos, tais como endurecimento, anisotropia, falhas e fraturas. A maioria destes fenômenos ocorre simultaneamente e podem afetar profundamente o comportamento da chapa metálica devido a alterações significativas que eles causam nas características físicas, nas características mecânicas e nas propriedades. Ferramentas virtuais que fornecem uma perspectiva real dos processos e sistemas em trabalhos com chapas metálicas já existem e permitem previsões precisas sobre as características geométricas, características de pós-conformação e possíveis defeitos e falhas, com base em parâmetros do processo escolhido. Com estas previsões, é possível uma seleção adequada do processo, da ferramenta e do equipamento (Bruschi et al., 2014).

O ensaio de espectrometria de emissão ótica permite a obtenção da quantidade dos elementos presentes em amostras ferrosas e não ferrosas, sendo muito utilizado em indústrias do ramo siderúrgico. Segundo Serway e Jewett (2011), o funcionamento desse ensaio é baseado na medição da intensidade, frequência e polarização da luz, as quais são visualizadas a partir da excitação do corpo de prova por meio de uma corrente elétrica. O espectrômetro de emissão óptica é composto por uma rede de difração e um captador. A luz incidente sobre a abertura do espectrômetro é dividida em feixes de onda através da rede de difração. Esses feixes de onda incidem sobre os captadores, que são sensores fotovoltaicos, permitindo identificar a intensidade luminosa de cada comprimento de onda existente na composição deles e obter a caracterização e a quantificação dos elementos químicos presentes na amostra.

Para Chiaverini (1986), o ensaio de embutimento permite caracterizar a qualidade de conformação, pois fornece a capacidade de conformabilidade dos metais e permite verificar o seu aspecto superficial após a estampagem. Segundo Garcia et al. (2008), o ensaio de embutimento relaciona as características mecânicas e estruturais do material com as

máximas deformações possíveis de serem realizadas sem que ocorra ruptura, permitindo assim, a avaliação da estampabilidade de chapas e tiras. Dentro os ensaios de embutimento estão o ensaio Erichsen, o ensaio Olsen, o ensaio Swift e o ensaio Fukui. Os ensaios *Erichsen* e *Olsen* são utilizados para deformações em tiras metálicas e se diferenciam apenas por alterações nas dimensões dos equipamentos e os ensaios Swift e Fukui são utilizados para deformações em discos metálicos. Os resultados deste ensaio variam com a velocidade de avanço do punção, com a lubrificação do equipamento e do *blank* e, em razão dos critérios para a determinação do fim de ensaio (visualização da fratura). Assim, devido às aplicações e disponibilidade, o ensaio Erichsen foi escolhido para ser utilizado e detalhado no presente trabalho.

Este trabalho tem por objetivos analisar as propriedades mecânicas de chapas comerciais de alumínio com três diferentes espessuras (0,5mm; 1mm e 2mm) obtidas de forma distinta. Para tanto, foram analisadas através da espectrometria as composições químicas apresentadas pelas chapas com espessura distintas, como também realizado o ensaio *Erichsen* nas chapas segundo as três diferentes direções (na mesma direção da laminação, 45° e 90° com relação à direção da laminação) e o ensaio de tração nas chapas segundo as três diferentes direções. Com o propósito de realizar uma análise estatística dos dados obtidos com os ensaios Erichsen, foi utilizado o *software Minitab 17*. Esse software permitiu que fossem realizadas diversas combinações entre os fatores relevantes neste trabalho, que são os materiais, as espessuras e as direções de laminação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As chapas utilizadas para realização deste trabalho foram adquiridas de forma comercial sem o conhecimento de suas propriedades mecânicas e composição química, uma vez que foram adquiridas pela Universidade via licitação para emprego em aulas de graduação.

O primeiro ensaio realizado foi o de espectrometria para se determinar a composição química das chapas adotadas para realização do experimental. O ensaio foi realizado no espectrômetro de emissão ótica do fabricante *Shimatzu*, modelo PDA-7000. Para realizar este ensaio, foram removidas pequenas amostras de cada chapa segundo e suas respectivas espessuras. Estes corpos de prova foram lixados manualmente com o objetivo de se retirar quaisquer impurezas que pudessem estar presentes nas amostras. Posteriormente, em cada corpo de prova foram realizados três ensaios de espectrometria a fim de se obter um número maior de evidências dos elementos presentes na amostra.

Com o auxílio de uma guilhotina obtiveram-se os corpos de prova para o ensaio Erichsen e para o ensaio de tração. Os corpos de prova tiveram as direções de corte pré-determinadas (na mesma direção da laminação, 45° e 90° com relação à direção da laminação). Para o ensaio Erichsen, os corpos de prova foram manufaturados com largura igual a 85 milímetros e comprimento igual a 300 milímetros e para o ensaio de tração (conforme a NBR 6152), os corpos de prova foram inicialmente manufaturados com 20 milímetros de largura e 300 milímetros de comprimento. Tanto para o ensaio de tração, como para o ensaio Erichsen, foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio *EMIC modelo DL10.000*.

Para o ensaio de tração, os corpos de prova foram usinados conforme a norma NBR 6152, com o objetivo de se obter as dimensões indicadas e o formato adequado. Os ensaios de tração foram realizados em três corpos de prova (Fig.1 C) para cada espessura e direção de laminação, perfazendo o total de vinte e sete corpos de prova. Os resultados dos ensaios de tração foram obtidos a partir do *software Tesc*, o qual está instalado juntamente à máquina universal de ensaios.

Os ensaios *Erichsen* (conforme norma ASTM 643-84) foram realizados em um corpo de prova para cada espessura e direção de laminação, porém com três medições em cada. Assim sendo, obteve-se nove corpos de prova, perfazendo um total de vinte e sete medições. Os resultados de algumas amostras durante os primeiros ensaios *Erichsen* apresentaram médias com discrepâncias muito maiores do que em outras amostras, e então, os ensaios foram realizados novamente.

A preparação metalográfica foi realizada com o objetivo de se observar qual natureza da estrutura de cada chapa proveniente do processo de laminação. Ela consistiu em 3 etapas de lixamento com lixas de granulometria 320, 600 e 1200 *mesh*, uma etapa de polimento em alumina 1µm, uma etapa de polimento com sílica coloidal de 0,04µm, e por fim um polimento vibratório por 2h. Utilizou-se para o ataque químico o ácido HBF_4 na concentração de 1,8% diluído em água. O microscópio ótico utilizado para captar as imagens foi um *ZEISS modelo Axio Imager.A2m*.

Com o propósito de realizar uma análise estatística dos dados obtidos com os ensaios *Erichsen*, foi utilizado o *software Minitab 17*. Esse software permitiu que fossem realizadas diversas combinações entre os fatores relevantes neste trabalho, seja referente à variação das espessuras e as direções de laminação. Com intervalos de confiança de 95%, o software calcula as médias dos índices de embutimento e traça gráficos com essas médias no eixo das ordenadas e com as amostras analisadas no eixo das abscissas. Se as diferentes amostras não possuem valores coincidentes no eixo das ordenadas (médias de índices de embutimento iguais), pode-se afirmar estatisticamente que aquele determinado fator analisado, influencia no índice de embutimento da amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 ilustra os corpos de prova após os ensaios de Espectrometria, Erichsen e de Tração.

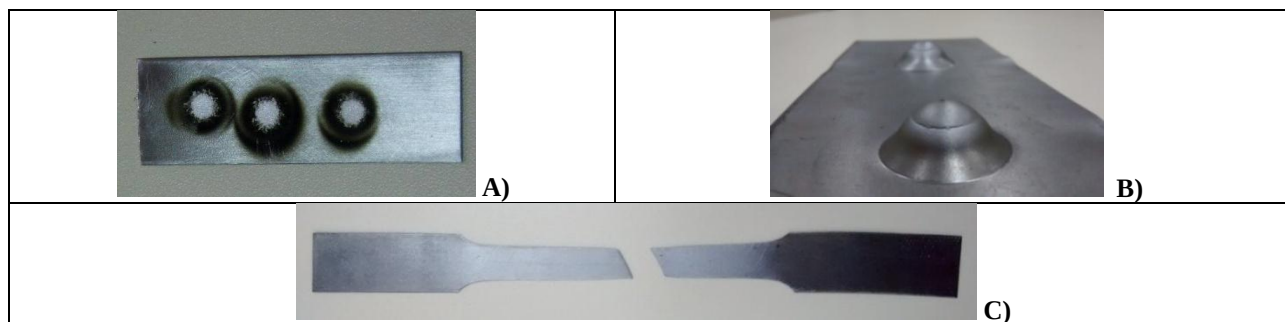


Figura 1. Corpos de prova após Ensaios: A) Espectrometria; B) Erichsen; C) Tração.

Pelos ensaios de espectrometria pode-se obter a porcentagem dos elementos químicos presentes em cada chapa adotada, quais apresentados na Tab. 1. O ensaio nos auxiliou a identificar qual tipo de alumínio adotado nos experimentos. Pela bibliografia (ASM Metals Handbook, 1990), supõe-se que as chapas de 0,5 mm e de 1 mm estão em conformidade com a especificação para o alumínio SAE1040, porém a chapa de 2 mm não se enquadra nas especificações de alumínio da Série 1000. A composição química da chapa de 2 mm é compatível com a especificação para alumínio da série 5000 (Al-Mg), ressaltando o seu alto teor de magnésio quando comparado às demais chapas.

Tabela 1. Resultados obtidos pelo ensaio de espectrometria referentes nas chapas de alumínio.

Espessura (mm)	0,5	1,0	2,0
Elementos (wt%)			
Alumínio, Al	99,275	99,430	96,926
Cromo, Cr	0,006	0,002	0,188
Cobre, Cu	0,014	0,014	0,013
Ferro, Fe	0,399	0,310	0,220
Magnésio, Mg	0,015	0,001	2,433
Manganês, Mn	0,048	0,004	0,043
Silício, Si	0,206	0,197	0,157
Titânio, Ti	0,021	0,011	0,009
Zinco, Zn	0,002	0,015	0

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração.

Tabela 2. Resultados obtidos no ensaio de tração.

Espessura (mm)	Direção de Laminação	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
0,5	0°	120,66	144,13
	45°	129,74	138,63
	90°	79,04	138,10
DESVIO PADRÃO		27,03	3,34
1	0°	137,07	155,20
	45°	125,00	157,28
	90°	152,5	167,78
DESVIO PADRÃO		13,78	6,74
2	0°	170,87	234,57
	45°	148,78	223,13
	90°	174,32	226,07
DESVIO PADRÃO		13,86	5,94

Ao analisarmos a tensão de escoamento *versus* direção de laminação na Tabela 2, obtido com os ensaios realizados e nas condições existentes para a realização dos mesmos, nota-se que a mudança de direção de laminação não influenciou de forma significativa os valores da tensão de escoamento, a não ser na chapa com 0,5mm de espessura com a direção de laminação de 90°. Analisando a tensão máxima *versus* direção de laminação, nota-se que a espessura influenciou nos valores da tensão máxima, porém estando de acordo com a tendência de aumento da tensão com o

aumento da espessura. Observa-se neste caso que a direção de laminação não influenciou de forma significativa nos resultados. Quanto aos resultados do alongamento *versus* direção de laminação, nota-se que o tipo de material influenciou de forma significativa nos valores de alongamento, mas a direção de laminação não influenciou de forma significativa nos resultados.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos na realização do ensaio de Erichsen. Os resultados mostram que o índice de embutimento é influenciado pela espessura, pois as chapas espessas apresentaram maiores índices de embutimento. Como foi constatado através da espectrometria, a chapa de alumínio que possuía espessura de 2 mm era de liga diferente das de 0,5 mm e das de 1 mm, e isso também demonstrou sua influência no índice de embutimento. Nas chapas ensaiadas também é possível notar que o índice de embutimento não foi influenciado significativamente pela direção da laminação.

Tabela 3. Resultados obtidos com o ensaio Erichsen.

Espessura (mm)	Direção de Laminação	Força Máxima (N)	Índice de Embutimento (mm)
0,5	0°	1704,10	6,59
	45°	1624,41	6,32
	90°	1720,63	6,27
1	0°	4077,58	7,83
	45°	4255,54	8,05
	90°	4254,50	7,85
2	0°	15975,07	10,43
	45°	16307,20	11,05
	90°	17168,03	10,57

Para verificar a influência da espessura no índice de embutimento, mantiveram-se as direções de laminação e o material, e variaram-se as espessuras, conforme pode ser observado na Fig. 2. Através análise estatística, não se pode afirmar com 95% de confiança que a espessura influencia nos índices de embutimento, pois em alguns gráficos os eixos das ordenadas coincidiram, ou seja, mesmo com espessuras diferentes, o material apresentou médias de índices de embutimento iguais em determinados momentos dos ensaios.

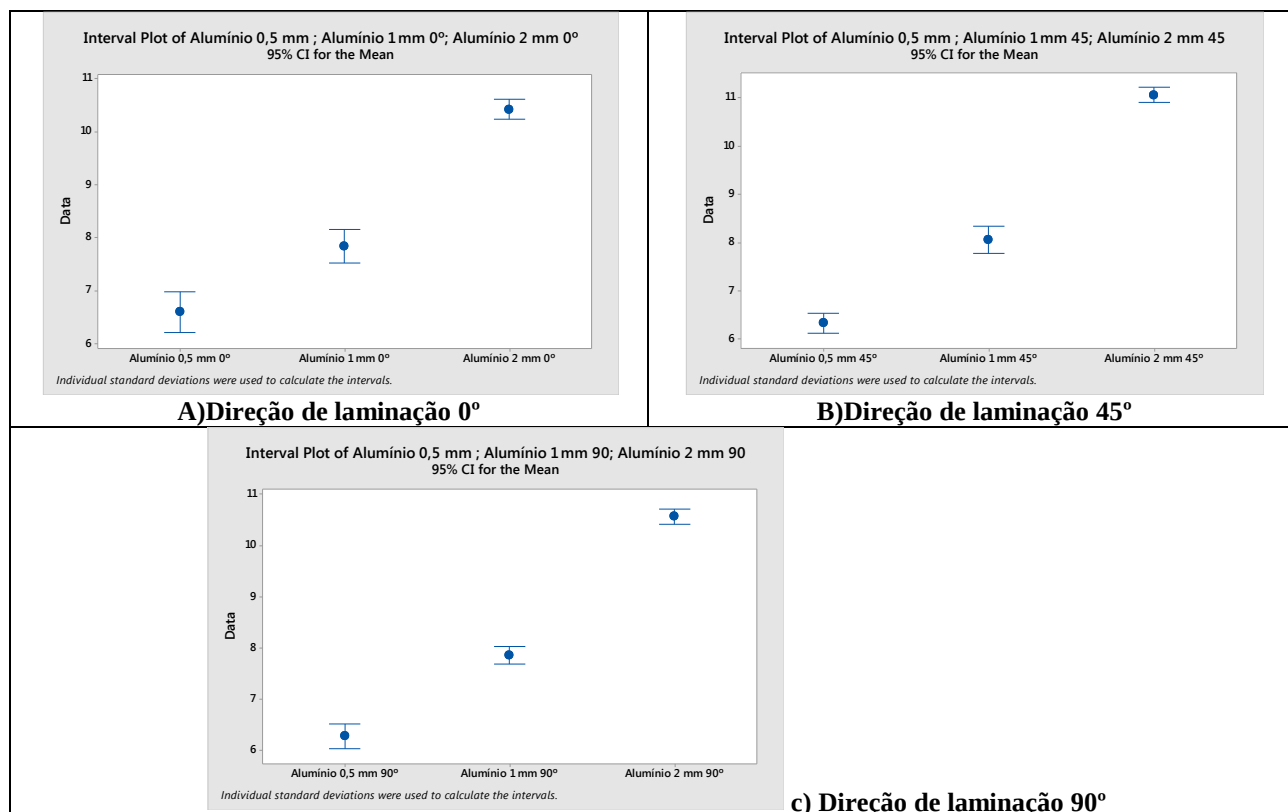


Figura 2. Gráfico de intervalos dos índices de embutimento das chapas de alumínio com as distintas espessuras.

Para verificar a influência da direção do corte em relação a direção da laminação no índice de embutimento, manteve-se o material e as espessuras, e variou-se as direções de laminação, resultados quais ilustrados na Fig. 3. Comparou-se os resultados obtidos das chapas de alumínio com espessuras de 0,5 mm com cortes de 0° com relação a direção de laminação, com os das chapas de alumínio com espessuras de 0,5 mm com cortes de 45° com relação a direção de laminação e com os das chapas de alumínio com espessuras de 0,5 mm com cortes de 90° com relação a direção de laminação. Essa mesma análise foi feita para todas as espessuras. Através da visão estatística, não se pode afirmar com 95% de confiança, que a direção do corte em relação a direção da laminação influencia nos índices de embutimento, pois em alguns gráficos os eixos das ordenadas coincidiram, ou seja, mesmo com direções de laminação diferentes, o material apresentou médias de índices de embutimento iguais em determinadas amostras.

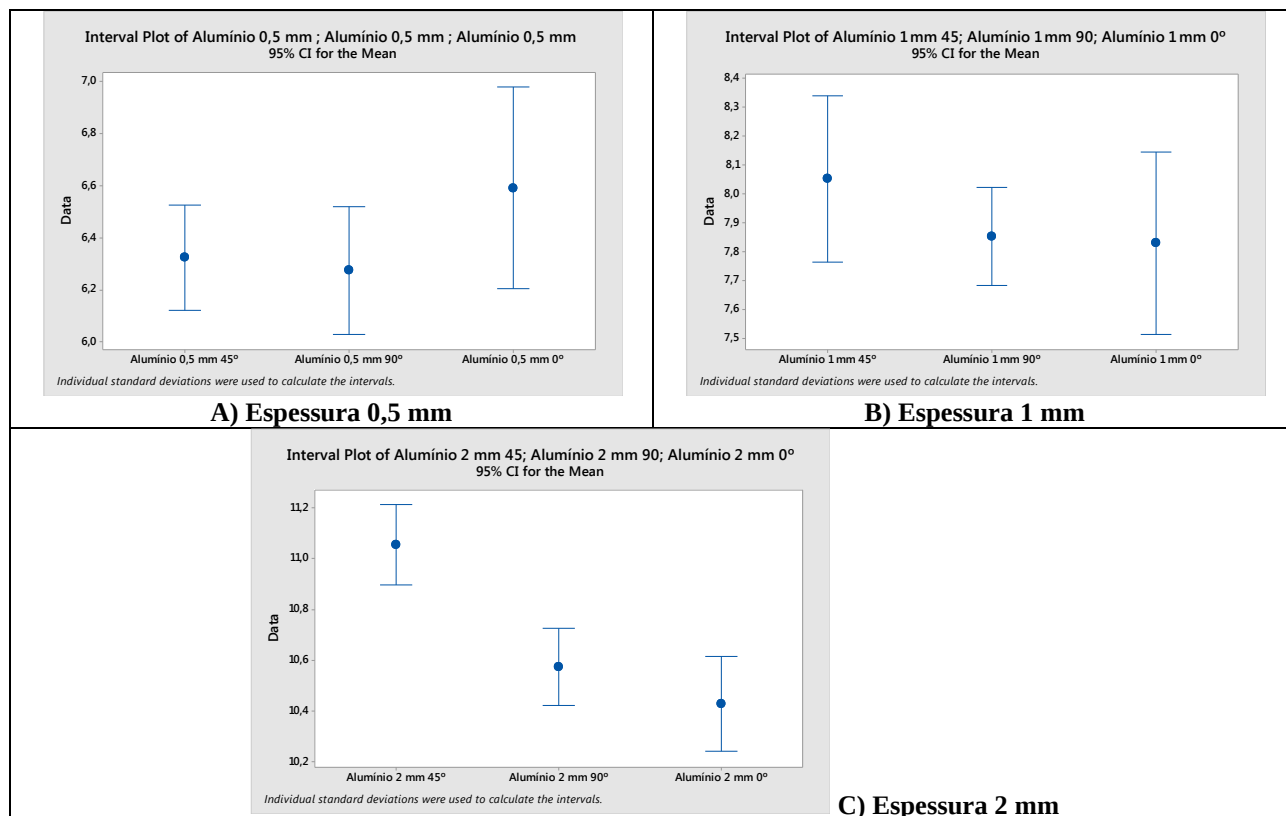


Figura 3. Gráfico de intervalos dos índices de embutimento das chapas de alumínio com cortes de 0°, 45° e 90° com relação a direção de laminação; A) Espessura 0,5 mm; B) Espessura 1 mm; C) Espessura 2 mm.

A Figura 4 ilustra as micrografias das amostras obtidas. Não foi possível através das micrografias visualizar grande diferença na estrutura, e nem visualizar os grãos, fato qual possivelmente devido ao fato do material estar sob a condição de laminado.

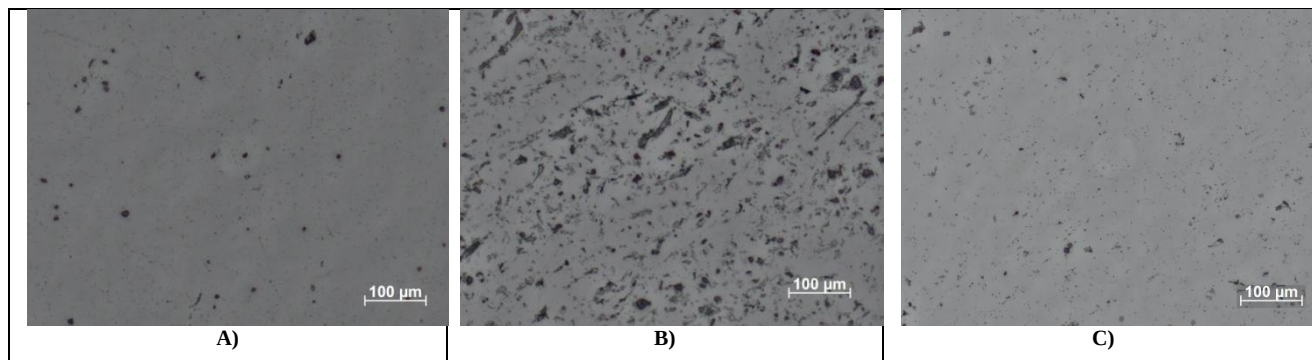


Figura 4. Microestruturas para espessura de: A) 0,5 mm; B) 1 mm; C) 2 mm.

3. CONCLUSÕES

As conclusões que são apresentadas a seguir são válidas para os materiais testados no presente trabalho, nas condições em que foram relacionadas e com os equipamentos citados.

Ensaio de Spectrometria:

- As amostras de alumínio de 0,5 e de 1,0 mm de espessura apresentaram composição compatível com a série 1000 (1040). As amostras de 2,0 mm de espessura apresentaram composição compatível com a série 5000.

Ensaio de tração:

- De maneira mais geral a direção de laminação não afetou significativamente a tensão de escoamento.
- A espessura das amostras demonstrou influência sobre os valores da tensão de escoamento, onde as amostras de maior espessura apresentaram maior tensão de escoamento, podendo ser decorrente de diferenças no processo de laminação. As amostras de alumínio de 2,0 mm de espessura apresentam ainda a influência de composição química.
- A espessura das amostras apresentou influência nos valores da tensão máxima.
- A chapa de alumínio de espessura de 2,0 mm apresentaram um alongamento um pouco maior que as demais.
- A direção de laminação não apresentou influência significativa sobre o alongamento.

Ensaio de Embutimento de Erichsen:

- O índice de embutimento é influenciado pela espessura das amostras, sendo mais elevados para as chapas mais espessas. Também, ele mostrou ser influenciado pelo tipo de material. Porém, ele não é influenciado pela direção de laminação.

4. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, Volume 2, 1990 (2th printing: 1992), “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA.
- ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1990 (2th printing: 1993).
- ASTM E643-84(2000). Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material.
- Bresciani, F. E., Zavaglia, C.A.C., Button, S.T., Gomes, E., Nery, F.A.C., 2011, “Conformação Plástica dos Metais”, São Paulo: EPU, 254p.
- Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P.F., Brosius, A., Cao, J., Ghiotti, A., Khraisheh, M., Merklein, M., Tekkaya, A.E., 2014, “Testing and Modelling of Material Behaviour and Formability in Sheet Metal Forming”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 63, p. 727 – 749.
- Chiaverini, V., 1996, “Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos”, 7. Ed. São Paulo, SP: ABM, 599 p.
- Garcia, A., J. A., Santos, C. A., 2008, “Ensaio dos Materiais”, Rio de Janeiro, RJ: ABM, 2008. 247 p.
- Lian, J., Barlat, F., Baudalet, B., 1989, “Plastic Behaviour and Stretchability of Sheet Metals, Part II: Effect of Yield Surface Shape on Sheet Forming Limit”, International Journal of Plasticity, vol. 5, pp.131-147.
- NBR 6152, 2002. Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.
- Serway, R. A., Jewett, Jr, J.W., 2011, “Física para Cientistas e Engenheiros: Eletricidade e Magnetismo”, São Paulo: Cengage Learning, 341 p.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Luciano Augusto Lourençato, Davi Fusão e Keith Valengo Pinheiro são os únicos responsáveis pelo material impresso incluídos neste artigo.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONFORMABILITY OF THREE DIFFERENT ALUMINUM COMMERCIAL SHEETS WITH VARIABLE THICKNESS

Luciano Augusto Lourenço, lalouren@utfpr.edu.br¹

Davi Fusão, davi@utfpr.edu.br¹

Keith Valengo Pinheiro, keith_vp@hotmail.com¹

¹UTFPR, Federal University Technology of Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brazil, Av. Monteiro Lobato, km04, s/n, 84016-210, (55)-(42)-32357061¹.

Resumo: Metals, especially aluminum, are extremely important in modern life. This is due to its mechanical characteristics, such as low specific weight, good mechanical strength and easy conformability. However, in most of their uses, metals are subject to modifications of shape and dimensions in order to fit them to the end use. One of the ways to get these modifications occurs through the application of external stresses through the mechanical conformation of the metals, such as the rolling process. The objective of this work is the study of the properties of different aluminum plates with three different thicknesses (0.5 mm, 1mm and 2 mm), according to three different directions (in the same direction of the rolling, 45° and 90° in relation to the direction of rolling). The plates were obtained without technical information regarding their chemical compositions, due to acquisition through bidding. To do so, they were analyzed through: the spectrometry of their chemical compositions; the Erichsen test; and characterization of the mechanical property by the tensile test. In order to perform a statistical analysis of the data obtained with the Erichsen tests, Minitab 17 software was used. This software allowed several combinations to be made between the relevant factors in this work, which are the materials, the thicknesses and the directions of lamination. As a result, in general the direction of rolling did not significantly affect the yield stress. The inlay index showed to be influenced by the type of material, but not influenced by the lamination direction.

Key Words: Aluminum, Mechanical Forming, Erichsen Test.

Responsibility notice

The author's Luciano Augusto Lourenço, Davi Fusão and Keith Valengo Pinheiro are the only responsible for the printed material included in this paper.