

COMPORTAMENTO DA LIGA 5052 OBTIDA POR ROLL CASTER APÓS PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO E TRATAMENTO TÉRMICO⁽¹⁾

*Heber Pires Otomar⁽²⁾
Ricardo do Carmo Fernandes⁽³⁾
Ivan Carlos de Oliveira⁽⁴⁾
Marcelo Paes⁽⁵⁾*

Resumo

As microestruturas de duas chapas da liga de alumínio 5052 foram investigadas com auxílio de várias técnicas complementares de análise microestrutural. As duas chapas possuíam dimensões similares porém foram produzidas por diferentes rotas de processamento. Uma das chapas tinha 7 mm de espessura e foi produzida por vazamento semicontínuo (DC) de placas com 240 mm de espessura, seguido de homogeneização e laminação a quente. A outra chapa tinha 7 mm de espessura, foi produzida por fundição contínua de chapas ("Caster", CC). Ambas amostras foram, através de laminação a frio e recozimento intermediário, transformadas em chapas com espessura de 1,20 mm e têmpera H34. Foram utilizadas as seguintes técnicas de análise microestrutural: macrografia, microscopia óptica de luz polarizada, medidas de dureza e ensaio erichsen. As análises realizadas permitiram obter informações relevantes sobre a homogeneidade e a evolução microestrutural da liga durante o seu processamento. Os resultados mostram que com um processo de homogeneização bem definido para o material CC as características necessárias para uma boa estampabilidade são obtidas, atingindo níveis melhores que o material DC.

Palavras-chave: Alumínio; Caster; Laminação; 5052

¹ Trabalho apresentado no 60º Congresso Anual da ABM. Julho/2005 Belo Horizonte.

² Engenheiro de Materiais, Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP, Depto de Laminação de Chapas da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), Alumínio, SP

³ (3)Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, Depto de Laminação de Chapas da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), Alumínio, SP.

⁴ Técnico Metalurgista, Depto de Laminação de Chapas da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), Alumínio, SP.

⁵ Engenheiro Químico, Professor Doutor da Universidade Paulista.

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio da série 5XXX (Al-Mg) são largamente empregadas na indústria de transporte na forma de carroceria de ônibus e caminhões, tanques de combustível e em vasos de pressão, além disso, sua alta resistência à corrosão promove seu uso na fabricação de barcos e equipamentos utilizados na indústria naval [1]. Atualmente, o campo de aplicação mais promissor para a indústria do alumínio é o ramo automobilístico. Se não levarmos em conta os fundidos, a maioria das peças de alumínio presente nos automóveis é fabricada por forjamento ou laminação seguida de estampagem. Conseqüentemente uma excelente conformabilidade é requerida para estes materiais [2].

A liga de 5052, contém essencialmente alumínio, magnésio (2,2-2,8%), ferro (max. 0,4%), cromo (max. 0,25) e silício (max. 0,25%). A Tabela 1 apresenta resultados de solubilidade dos principais solutos nos sistemas binários presentes na liga [3].

Tabela 1. Solubilidade (em % em peso) dos principais elementos de liga do alumínio, nos sistemas binários [3].

Elemento de liga	Solubilidade máxima no estado sólido	Solubilidade em temperatura mais baixa	Diferença de raio atômico (%)	Estrutura cristalina
Si	1,65 (577 °C)	0,05 (250 °C)	- 6,3	Cúbica
Fe	0,052 (655 °C)	0,001 (400 °C)	- 11,2	CCC/CFC
Mg	14,9 (451°C)	2,65 (150°C)	+ 11,9	HC

As ligas Al-Mg (série 5XXX) constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou sejam, não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (trabalho mecânico). As ligas Al-Mg são aquelas que possuem a melhor combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade, possuindo propriedades mecânicas intermediárias entre as das ligas da série 3XXX (Al-Mn) e as ligas endurecíveis por precipitação (Al-Cu, Al-Mg-Si e Al-Zn-Mg, séries 2XXX, 6XXX e 7XXX respectivamente). Produtos trabalhados mecanicamente de ligas Al-Mg estão sempre disponíveis na têmpera O (recozido) e em uma ou mais das têmperas H1, H2 e H3 (trabalhadas com diferentes níveis de encruamento) [4].

O alumínio puro tem uma alta energia de falha de empilhamento, 150 mJ/m^2 , isto é, sensivelmente maior que outros metais e ligas com que possuem reticulado CFC, tais como prata, cobre, ouro, chumbo, bronze e aço inoxidável austenítico. Esta característica promove uma menor taxa de encruamento pois a alta energia de defeito de empilhamento promove uma aproximação das parciais de deslocamento das discordâncias, facilitando a movimentação das mesmas, com isso há a formação de uma subestrutura celular e, conseqüentemente, a diminuição da densidade de discordâncias. A adição de magnésio promove na liga de alumínio um abaixamento da energia de defeito de empilhamento, reduzindo a capacidade de formar subestruturas celulares. Portanto, as ligas Al-Mg, ao compararmos com ligas de Al puro com o mesmo percentual de deformação a frio, apresentam um maior encruamento [4].

Com a busca incessante pela redução de custos, cada vez mais se procura utilizar na indústria de laminação de alumínio, o processo de fundição contínua de chapas, conhecida como Twin Roll Caster [5,6,7]. Conseqüentemente se torna imprescindível o conhecimento profundo da caracterização dos materiais obtidos por este processo. É sabido que as características microestruturais do material obtido por Caster (CC) são diferentes daquele obtido por fundição semi-contínua (“Direct Chill”, DC) e posterior laminação a quente. Como o processo convencional de laminação a quente já é bem conhecido [8,9,10,11] e com processos definidos, ao contrário do material CC, há o conceito errôneo de que o material CC é “pior” para o processo de estampagem. Na verdade considera-se que o processo termomecânico de algumas ligas e têmperas de material CC ainda não está corretamente definido e, para que isto ocorra, vários estudos estão sendo realizados para que, com melhor conhecimento em microestrutura e textura, estas diferenças sejam dirimidas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma das chapas (DC) foi produzida por lingotamento semicontínuo de placas (“Direct Chill”) com 240 mm de espessura, seguida de homogeneização e laminação a quente até a espessura de 7,0 mm. A amostra (CC) foi retirada de uma bobina obtida por fundição contínua de chapas (“Continuous Caster”) na espessura de 7,0 mm. Posteriormente a bobina foi homogeneizada e resfriada ao ar (não forçado). A primeira espira da bobina foi descartada (expira externa) e as amostras foram retiradas com o uso de uma guilhotina. Como as laterais da bobina apresentam uma taxa de resfriamento diferente do restante da tira, foram descartadas as laterais.

As duas amostras DC e CC com 7,00 mm foram laminadas a frio nas mesmas condições em um laminador quádruplo até a espessura de 1,70 mm, posteriormente foram recozidas, resfriadas ao ar e relaminadas até a espessura de 1,20mm, atingindo desta forma a têmpera H34.

A Tabela 2 apresenta as composições químicas das duas chapas. Para a análise metalográfica, os corpos de prova foram lixados com lixas de carboneto de silício. O polimento grosso foi feito com pasta de diamante (3 microns) em pano de algodão e o polimento final foi feito com sílica coloidal. Para a revelação de precipitados foi utilizado ácido fluorídrico 0,5% como reagente. Para a análise metalográfica com luz polarizada, as amostras passaram por um processo de oxidação anódica, através da imersão em uma solução de Barker (ácido fluobórico, HBF_4 – 1,8%).

Tabela 2. Composição química (em % em peso) da amostra obtidas por “Direct Chill” (DC) e por fundição contínua de chapas (CC).

Processo	Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Cr	Ti	B
DC	0,137	0,264	2,433	0,056	0,010	0,177	0,009	0,001
CC	0,073	0,296	2,531	0,032	0,019	0,132	0,017	0,002

As propriedades mecânicas foram caracterizadas através de ensaios de tração, dureza e Erichsen.

Lista de Símbolos

- DC: “direct chill”, processo convencional de fundição de placas para laminação a quente.
CC: “continuous caster”, processo de fundição contínua de chpas.
CCC: estrutura cúbica de corpo centrado
CFC: estrutura cúbica de face centrada
HC: estrutura hexagonal compacta
 e_0 : espessura inicial (mm)
 e : espessura final (mm)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 apresentam a microestrutura e os precipitados presentes na amostra DC, com 240 mm de espessura, no estado bruto de fusão e após homogeneização da placa, respectivamente. Pode-se verificar que a homogeneização promoveu um pequeno aumento no tamanho de grão porém não houve precipitação secundária ou alteração na morfologia e tamanho dos constituintes primários. A amostra CC bruta de fusão (Figura 3) apresenta grãos que possuem uma orientação preferencial, característica do processo Roll Caster e grãos menores e constituintes primários mais finos e melhores distribuídos que os da placa DC (Figura 1). Esta diferença ocorre devido a maior taxa de resfriamento durante a solidificação (CC~700°C/min; DC~20°C/min) somada à pequena deformação à quente proveniente do processo Roll Caster.

Após a laminação a quente, a amostra DC com 7,00 mm apresentou um tamanho de grão maior que a amostra CC com 7,00 mm obtida diretamente do Caster e homogeneizada, conforme pode ser visto na Figura 4. A distribuição de precipitados ao longo da amostra DC é mais irregular sendo que a estrutura fundida no material DC é quase que completamente “quebrada” devido ao extenso processamento termomecânico (homogeneização e laminação a quente) em laminadores reversíveis. A Figura 5 apresenta os precipitados da amostra CC homogeneizada, que são menores e mais distribuídos, comparando-se com a amostra DC.

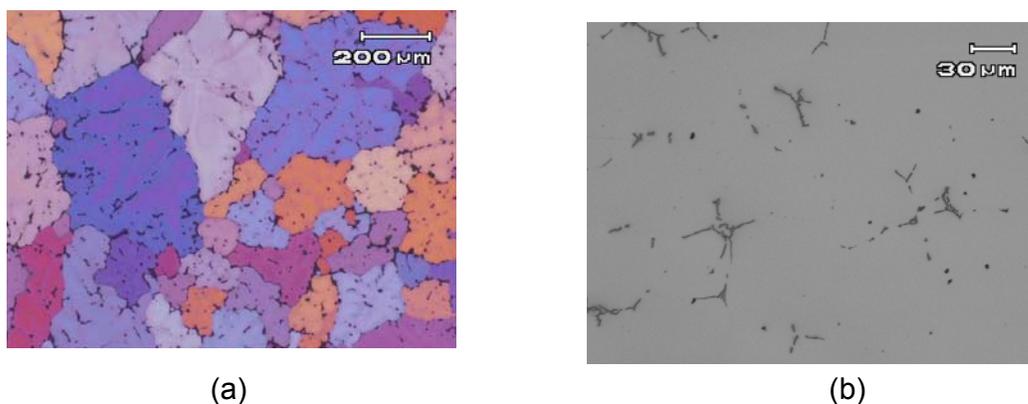
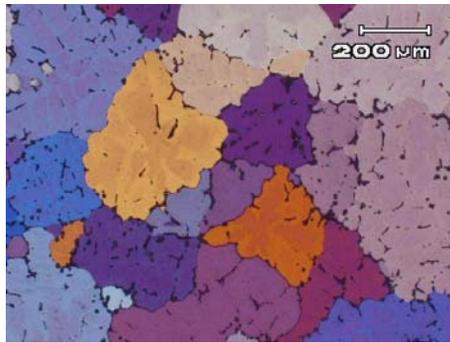
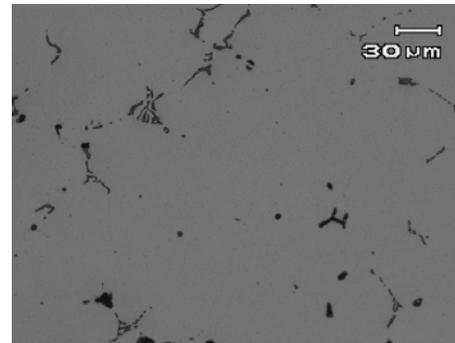


Figura 1. Micrografias da placa obtida por DC, bruta de fusão com 240 mm de espessura, secção longitudinal. (a) microscopia óptica (a) com e (b) sem auxílio de luz polarizada.



(a)

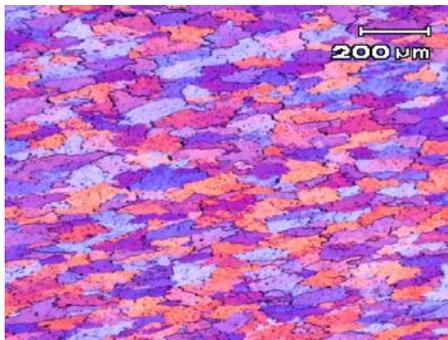


(b)

Figura 2. Micrografias da placa obtida por DC homogeneizada com 240 mm de espessura, seção longitudinal. (a) microscopia óptica (a) com e (b) sem auxílio de luz polarizada.

As amostras laminadas e encruadas até 1,70 mm possuem microestruturas muito similares, como pode ser comprovado na Figura 6.

A Figura 7 ilustra a microestrutura das amostras recozidas. Verifica-se que a amostra CC (5b) apresenta um menor tamanho de grão. Esta diferença se mantém após a laminação a frio até a espessura de 1,20 mm conforme verificado na Figura 8. Pode-se considerar que a maior quantidade e a melhor distribuição de precipitados na amostra CC promove uma melhor recristalização, pois eles atuam como locais preferenciais para nucleação de novos grãos.

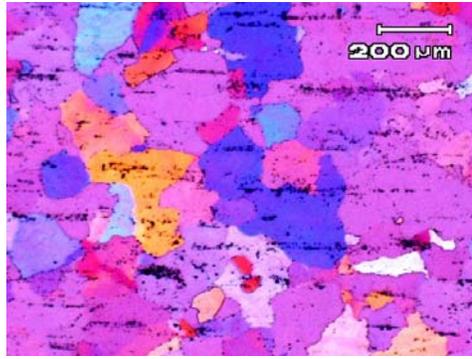


(a)

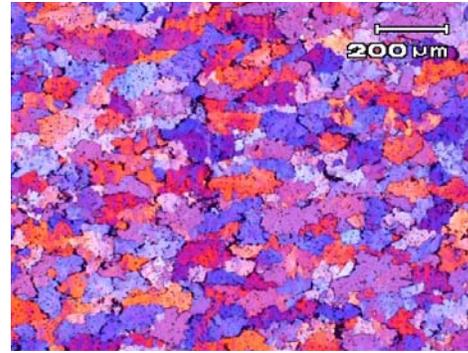


(b)

Figura 3. Micrografias da placa obtida por CC bruta de fusão, seção longitudinal, centro da amostra (a) microscopia óptica (a) com e (b) sem auxílio de luz polarizada.

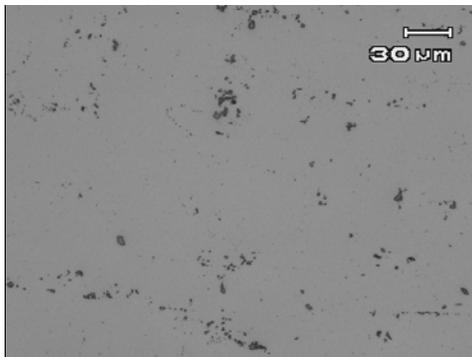


(a)DC

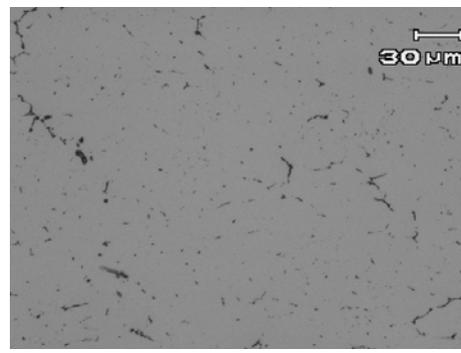


(b)CC

Figura 4. Micrografias da amostra DC homogeneizada e laminada a quente até 7,00 (a) e da amostra CC obtida com 7,00 mm e posteriormente homogeneizada (microscopia óptica com auxílio de luz polarizada, secção longitudinal).

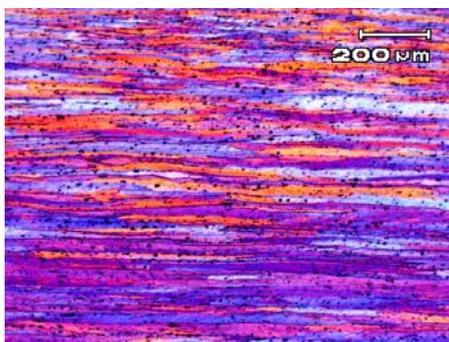


(a)DC

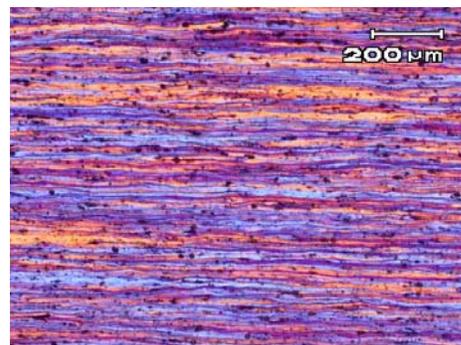


(b)CC

Figura 5. Micrografias da amostra DC homogeneizada e laminada a quente até 7,00 (a) e da amostra CC obtida com 7,00 mm e homogeneizada (microscopia óptica, secção longitudinal).

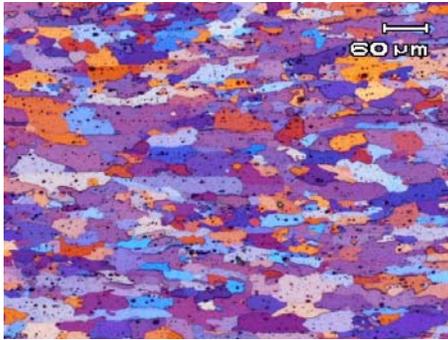


(a)DC



(b)CC

Figura 6. Micrografias das amostras DC e CC laminadas a frio até 1,70 mm (microscopia óptica com luz polarizada, secção longitudinal).

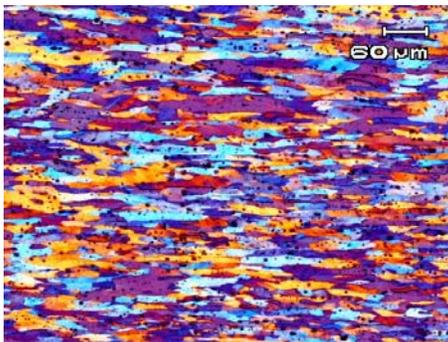


(a)DC

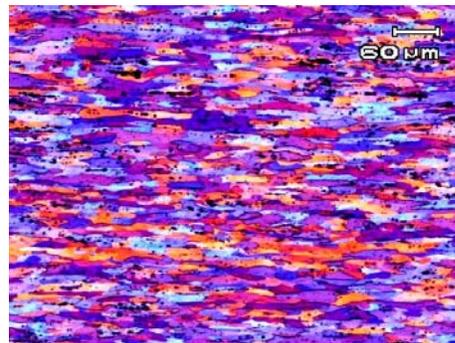


(b)CC

Figura 7. Micrografias das amostras DC e CC laminadas a frio até 1,70 mm e posteriormente recozidas (microscopia óptica com luz polarizada, secção longitudinal).



(a)DC



(b)CC

Figura 8. Micrografias das amostras DC e CC laminadas a frio, recozidas com 1,70 mm e posteriormente laminadas a frio até 1,20 mm (microscopia óptica com luz polarizada, secção longitudinal).

O comportamento da amostra CC nos ensaios mecânicos foi muito similar ao da amostra DC com diferenças significativas apenas na espessura de recozimento (1,70 mm) Nas Figuras 9, 10 e 11, as reduções do limite elástico, do limite de resistência à tração e da dureza ocorridas na amostra CC foram maiores do que na amostra DC após o recozimento. Da mesma forma, a Figura 12 apresenta um maior alongamento da amostra CC após recozimento. Estes resultados estão coerentes com a microestrutura obtida após recozimento, onde a amostra CC apresentou uma maior recristalização.

O ensaio Erichsen (Figura 13) apresentou maiores valores de profundidade da calota na amostra CC após o recozimento e também na espessura final da chapa (1,2 mm H34).

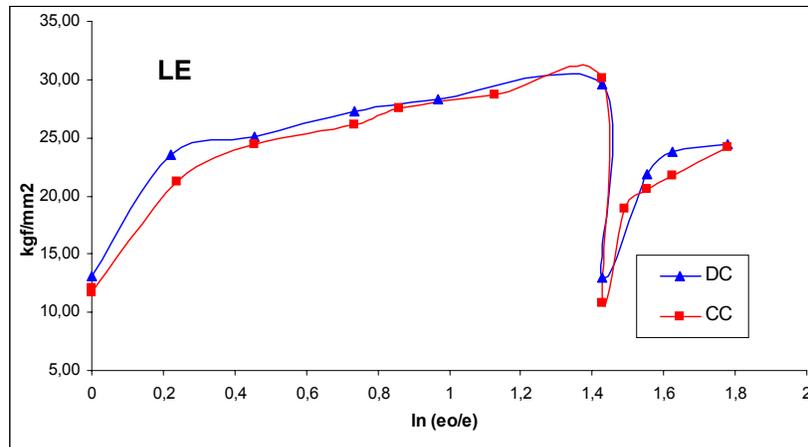


Figura 9. Curva do limite elástico das amostras DC e CC laminadas a frio a partir de 7,00mm, recozidas a 1,70mm e laminadas a frio até 1,20 mm ($e_0 = 7$ mm, $e = 1,2$ mm).

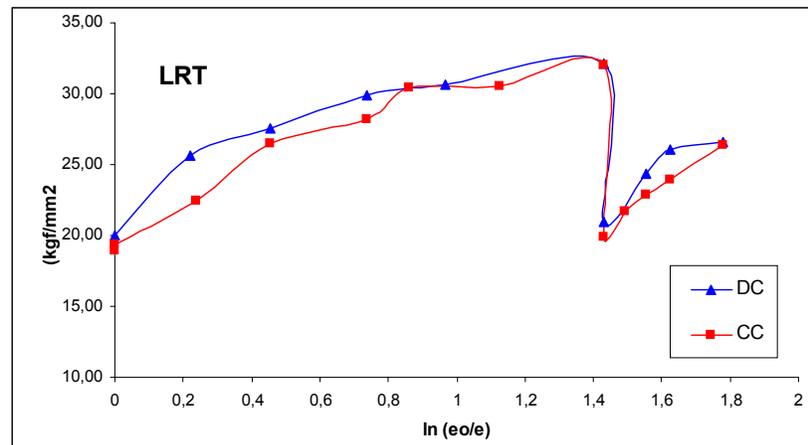


Figura 10. Curva do limite de resistência a tração das amostras DC e CC laminadas a frio a partir de 7,00mm, recozidas a 1,70mm e laminadas a frio até 1,20 mm ($e_0 = 7$ mm, $e = 1,2$ mm).

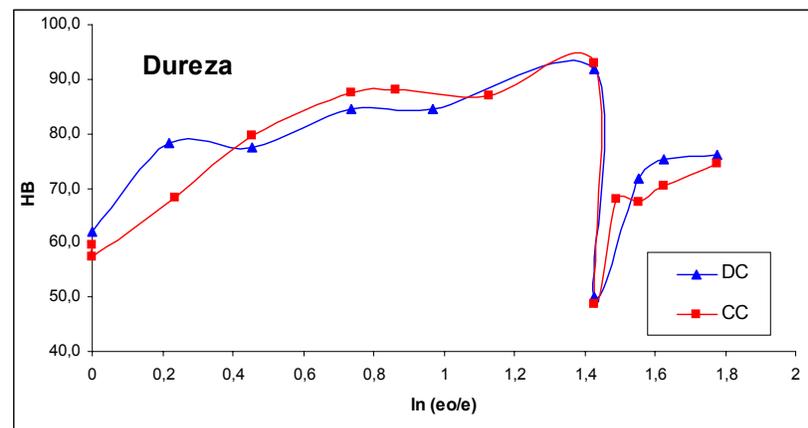


Figura 11. Curva da dureza das amostras DC e CC laminadas a frio a partir de 7,00mm, recozidas a 1,70mm e laminadas a frio até 1,20 mm ($e_0 = 7$ mm, $e = 1,2$ mm).

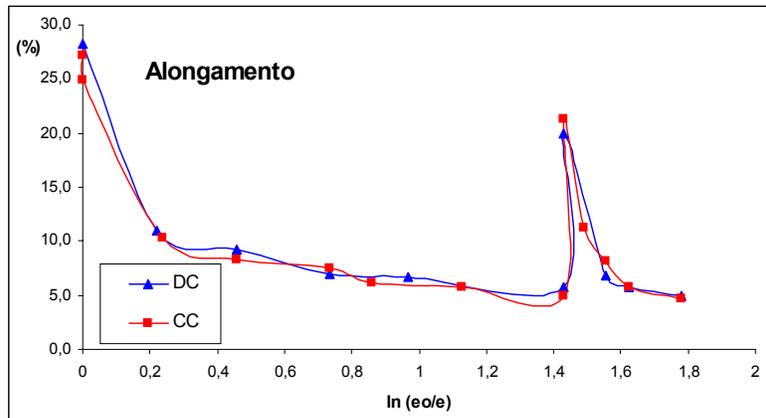


Figura 12. Curva do alongamento das amostras DC e CC laminadas a frio a partir de 7,00mm, recozidas a 1,70mm e laminadas a frio até 1,20mm ($e_0 = 7$ mm, $e = 1,2$ mm).

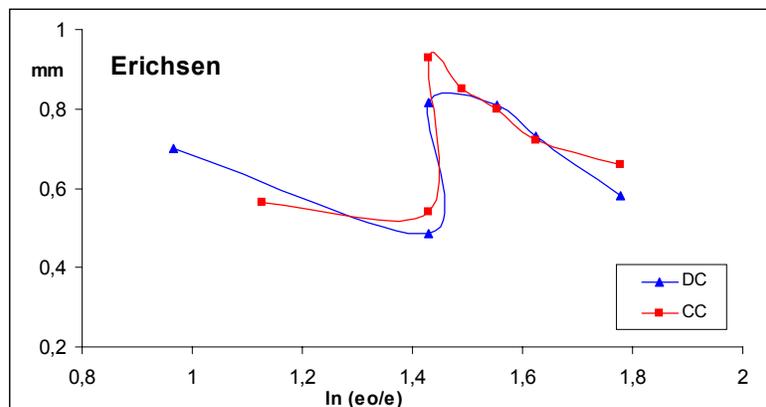


Figura 13. Resultado do ensaio erichsen das amostras DC e CC laminadas a frio a partir de 7,00mm, recozidas a 1,70mm e laminadas a frio até 1,20mm ($e_0 = 7$ mm, $e = 1,2$ mm).

4 CONCLUSÕES

O processamento termomecânico do material CC foi capaz de promover propriedades mecânicas semelhantes ao material DC laminado a quente com características adequadas à utilização em estampagem, com eficiência similar conforme apresentado no ensaio Erichsen.

Para a fabricação de produtos que exigem estampagem profunda, é importante que se faça o estudo da microtextura pois esta característica terá influência significativa no aparecimento de “earing”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MERCHANT, H.D.; MORRIS, J.G. Annealing Response of 3000 and 5000 Series Aluminum Alloys. **Metallurgical Transactions A**, v. 21A, p. 2643-2654, 1990.
2. LIU, J.; MORRIS, J.G. Texture and Grain-Boundary Evolutions of Continuous Cast and Direct Chill AA5052 Aluminum Alloy During Cold Rolling. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v. 34A, p. 951-966, 2003.
3. TOTTEN, G.E.; MACKENZIE, D.S. **Handbook of Aluminum**. V. 2 Alloy Production and Materials Manufacturing. Nova Yorque, Marcel Dekker. 2003
4. PADILHA, A.F.; SICILIANO Jr., F.; **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 2ª ed. São Paulo, ABM, 1996.
5. LI, B.Q.; Producing Thin strips by twin-roll casting - Part I: Process aspects and quality issues. **JOM**, p.29-33, May. 1995.
6. GUPTA M.; COOK, D.P.; SAHAI, Y.; Strip casting of aluminum using twin roll casters. **Light Metals**, p. 925-930, 1999.
7. TRICIBAR, R.; Jin, I.; Rolling aspects of twin roll casting. **Light Metals**, p. 1129-1143, 1999.
8. SIMIELLI, E. A.; PLAUT, R. L; PADILHA, A. F.: Influence of heating time on the recrystallization of two aluminium alloys. **Zeitschrift für Metallkunde**, v. 78, p. 770-776, 1987.
9. VATNE, H.E., WELLS, M.A. Modelling of the Recrystallization Behaviour of AA5XXX Aluminum Alloys After Hot Deformation. **Canadian Metallurgical Quaterly**. V.42, n. 1, p.79-88, 2003.
10. RICHARDS, T.L.; PUGH, S.E.;; The influence of prior heat treatment on recrystallization of commercial aluminum. **Journal of the Institute of Metals**, vol. 88, p. 141-150, 1959/60.
11. WELL, M.A., LLOYD, D.J., SAMARASEKERA, I.V., BRIMACOMBE, J.K. Modeling the Microstructural Changes During Hot Tandem Rolling of AA5XXX Aluminum Alloys. **Metallurgical and Materials Transactions B**. v. 29B, p.621-633, 1998.

BEHAVIOUR OF 5052 ALUMINUM ALLOY PRODUCED BY ROLL CASTER AND AFTER ROLLING PROCESS AND HEAT TREATMENT

*Heber Pires Otomar
Ricardo do Carmo Fernandes
Ivan Carlos de Oliveira
Marcelo Paes*

Abstract

The microstructure of two sheets of 5052 aluminum alloy was investigated with employing several complementary techniques of microestructural analysis. The two sheets had similar dimensions, but were produced by different processes. One of the sheets had 7 mm of thickness and it was produced by semi-continuous casting of plates (DC) with 240 mm of thickness, followed by homogenization annealing and hot rolling. The other sheet had 7 mm thickness and produced by continuous roll casting ("Caster", CC). Both samples were cold rolled annealed with 1,70 mm of thickness and cold rolled until 1,20 mm (H34 temper). The following techniques of microestructural analysis were used: polarized light optical microscopy, hardness measurements and erichsen test. The comparative analysis showed that if the CC material had the homogenization process well established, it will have good characteristics to be used in a drawing industry and it could be better than DC material.

Key-words: Aluminum; Caster; Rolling; 5052