

Avaliação de propriedades mecânicas de chapas laminadas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C

Isabella Cristina da Silva Jorge^{1*}, Natália Barros Barony¹, Ângelo Siqueira da Silva¹, Talita Gama de Sousa¹, Saulo Brinco Diniz², Andersan dos Santos Paula¹

¹Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Angra dos Reis, RJ, Brasil

*isabellajorge@ime.eb.br

Resumo: Este estudo foi conduzido em chapas das ligas AA 5052, produzida por processo de fundição direta (DC), e AA 5050C, produzida por processo de fundição contínua de chapas (TRC), com o intuito de caracterizar microestrutural e mecanicamente as referidas ligas, assim como avaliar a ocorrência de envelhecimento dinâmico em função da taxa de deformação aplicada em ensaios de tração uniaxial. De maneira geral, observou-se valores superiores de resistência e menor ductilidade para a liga AA 5052, e ao analisar o aspecto das curvas de tração, pôde-se verificar a presença de serrilhados em ambas as ligas, indicativos de variações rápidas e sucessivas de tensões, na região de deformação plástica, sugerindo a ocorrência do envelhecimento dinâmico, e como, em menor velocidade de deformação, esse efeito é mais pronunciado. A frequência e magnitude de quedas de tensão verificadas podem ser associadas principalmente aos diferentes teores de Mg das ligas, sendo menor para a liga AA 5050C que possui menor teor de Mg.

PALAVRAS-CHAVE: Ligas de alumínio 5xxx, processo de fundição contínua, processo de fundição direta, propriedades mecânicas, envelhecimento dinâmico.

Abstract: This study was conducted on AA 5052 sheets that had been produced by direct casting and AA 5050C sheets that had been produced by twin roll casting to microstructurally and mechanically characterize these alloys and evaluate their dynamic aging occurrence as a function of the strain rate applied in uniaxial tensile tests. In general, AA 5052 alloy showed higher strength values and lower ductility. Analysis of the aspect of tensile curves showed serrations in both alloys, indicating rapid and successive stress variations in the plastic deformation region for both alloys, suggesting dynamic aging occurrence and how this effect is more pronounced at lower displacement speed. The frequency and magnitude of the decrease stress can be associated with the distinct Mg content of the alloys, being smaller in the AA 5050C.

KEYWORDS: 5xxx aluminum alloys, Direct chill process, Twin roll caster process, mechanical properties, aging dynamic.

1. Introdução

As ligas de alumínio por sua atraente combinação entre resistência/peso, boa conformabilidade, elevada resistência à corrosão, entre outras características, tem se destacado como uma alternativa viável para aplicações na indústria automobilística na produção de componentes ou partes estruturais, e ganhando destaque, principalmente para aplicações em carrocerias de ônibus, devido à possibilidade de redução no peso dos automóveis, resultando na diminuição de gastos com combustíveis e emissão de gases [1].

Contudo, tais aplicações ainda são restritas devido à tecnologia de produção complexa e ao alto custo do alumínio quando comparado à produção de aços. O método mais comumente utilizado para a fabricação de ligas de alumínio na forma de chapas é baseado no processo de fundição direta (*Direct Chill – DC*).

O processo de fundição direta (DC) consiste no vazamento de placas, seguido de processo de usinagem e laminação a quente, com o intuito de reduzir significativamente a espessura da placa em um processo de conformação plástica a quente. Na sequência, a chapa segue para laminação a frio, o que lhe confere ganhos nas propriedades mecânicas em termos de resistên-

cia, aliado ao decréscimo da ductilidade, e, em alguns casos, segue posteriormente para tratamento térmico de recozimento para fins de alívio de tensões/estabilização ou recristalização parcial/total em função da aplicação final [2,3].

Outra forma de obtenção de laminados de alumínio e suas ligas, é através do processo de Fundição Contínua de Chapas (*Twin roll caster – TRC*), no qual a fabricação de chapas laminadas a quente e bobinadas ocorre diretamente do metal líquido. O processo consiste na combinação das etapas de solidificação e laminação a quente do material, o que permite que a chapa, na forma de bobina, siga diretamente para o processo de laminação a frio [4,5].

O processamento de chapas de alumínio através da fundição contínua (*TRC*), ocasiona redução de custos no processo de fabricação, bem como redução do tempo de processamento. Tais características, aliadas a facilidade de alteração da espessura e da largura de vazamento sem a necessidade de alterar as dimensões do molde, tornam a produção mais ágil e vantajosa [5].

Ligas de alumínio de distintas séries normalmente são produzidas a partir do processo DC e posteriormente são laminadas (a quente e a frio) e recozidas, porém também é observado a produção de algumas delas em escala laboratorial e industrial pelo processo TRC com algumas ressalvas. A literatura destaca que ligas com intervalo de solidificação estreito são largamente produzidas em diversas dimensões pelo processo TRC. Contudo, para ligas com amplo intervalo de solidificação, o processo ainda é limitado, não permitindo a obtenção de um produto final com as propriedades mecânicas adequadas [6]. Outro fator limitante é a composição química das ligas, algumas podem apresentar grandes problemas relacionados à formação de linhas centrais de segregação e à formação de camada de óxido excessiva, a citar como exemplo as ligas da série 5xxx. Fator esse que se fez presente na Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Alumínio/São Paulo (SP), ao tentar produzir a liga AA 5052 na sua composição original por TRC, sendo possível contornar o problema apenas com o ajuste

composicional que resultou na liga AA 5050C [7], ambas objeto deste estudo.

Outro aspecto dos produtos laminados das ligas da série 5xxx é que são susceptíveis de apresentar envelhecimento dinâmico em função da taxa de deformação a que são submetidas mesmo a temperatura ambiente, o que se revela por serrilhados na curva tensão-deformadas [8,9]. A justificativa para este comportamento, padrão serrilhado, é atribuída ao movimento brusco das discordâncias que resulta na interação dinâmica das discordâncias com os átomos de soluto substitucional presentes na solução sólida [9]. Nessa percepção, supõe-se que o movimento das discordâncias é impedido por átomos de soluto que as isolam, consequentemente, para as discordâncias serem liberadas, torna-se necessário um aumento da tensão, resultando numa sensibilidade negativa de tensão/deformação, conduzindo a instabilidade de fluxo, ou seja, o efeito Portevin-Le Chatelier (PLC).

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi realizar uma caracterização microestrutural e mecânica de chapas das ligas de alumínio AA 5052 e AA 5050C laminadas e recozidas, produzidas pela CBA a partir de processos DC e TRC respectivamente, como avaliar a ocorrência de envelhecimento nas ligas de quando solicitadas mecanicamente via ensaio de tração uniaxial em duas velocidades distintas em temperatura ambiente.

2. Materiais e Métodos

Os materiais em estudo, fornecidos pela empresa Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) – situada em Alumínio – SP, consistem em duas ligas de alumínio da série 5xxx, AA 5052 e AA 5050C – conforme composição química apresentada na Tabela 1 – que foram produzidas por distintos processos, sendo a primeira via fundição direta (DC) e a segunda por fundição contínua de chapas (TRC). Essas ligas posteriormente foram submetidas a uma mesma rota e parâmetros de processamento até a obtenção de chapas finas com aproximadamente 1,20 mm de espessura na condição final laminada a frio e recozida/estabilizada, conforme Figura 1, que apenas se

distinguirão pelo valor da redução total na primeira etapa de laminação a frio (68,3% para a liga 5052 e 72,8% para a liga 5050C) e temperatura de encharque no recozimento intermediário (360 °C liga 5052 e 380 °C liga 5050C).

A caracterização microestrutural foi conduzida com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo, FEI Quanta FEG, observando as amostras na espessura da chapa, no plano que contém a direção de laminação (DL), após preparação metalográfica: lixamento de 220 a 4000 mesh, polimento em pasta de diamante de 3 e 1 µm e um polimento final eletrolítico com solução de

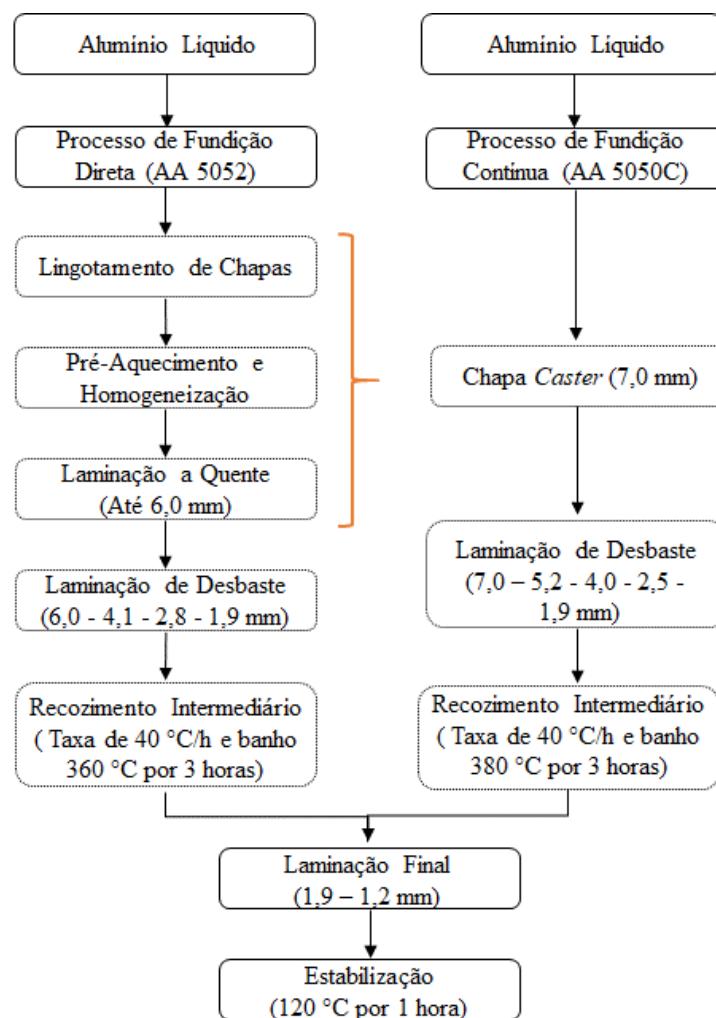
ácido perclórico (20% HClO₄ + 80% C₂H₅OH) por 5 segundos a 10 Volts, em temperatura ambiente.

Tabela 1 - Composição química das ligas em estudo, com destaque aos elementos de ligas e residuais, % em peso.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr
AA 5052						
0,06	0,26	0,06	0,06	2,41	0,20	0,01
AA 5050C						
0,07	0,47	0,36	0,10	1,39	0,00	0,04

Fonte: CBA.

Figura 1 - Etapas de processamento na CBA das ligas da série 5xxx em estudo.



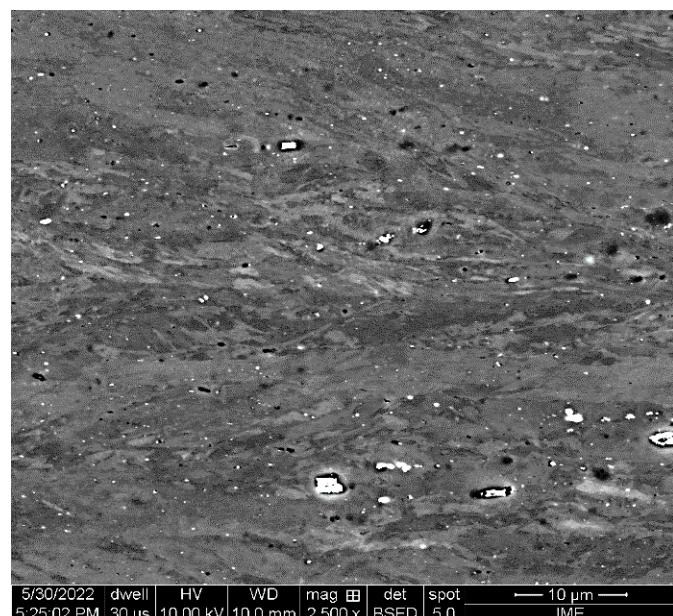
Fonte: CBA.

Para caracterização mecânica foram realizados ensaios de dureza Vickers e de tração uniaxial. O ensaio de dureza foi conduzido com 10 medidas para cada amostra ao longo do plano da chapa, com carga de 10 kgf. Enquanto o ensaio de tração uniaxial foi conduzido em corpos de prova confeccionados conforme a norma ASTM E8/E8M [10] sob duas condições de velocidade de deslocamento do travessão (2 e 7 mm/min), utilizando tecnologias diferentes de extensômetro (de contato para velocidade de 2 mm/min e óptico para velocidade de 7 mm/min), a fim de averiguar a ocorrência do envelhecimento dinâmico em função da velocidade de deformação.

3. Resultados e Discussão

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os resultados provenientes da análise microestrutural via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com utilização do detector de elétrons retroespalhados (BSE) das ligas AA 5052 e AA 5050C, respectivamente.

Figura 2 - Micrografia da liga AA 5052 (DL, com setas indicando cavidades (em preto) que continham partes das possíveis partículas de inclusão/precipitados ainda presentes (em branco).

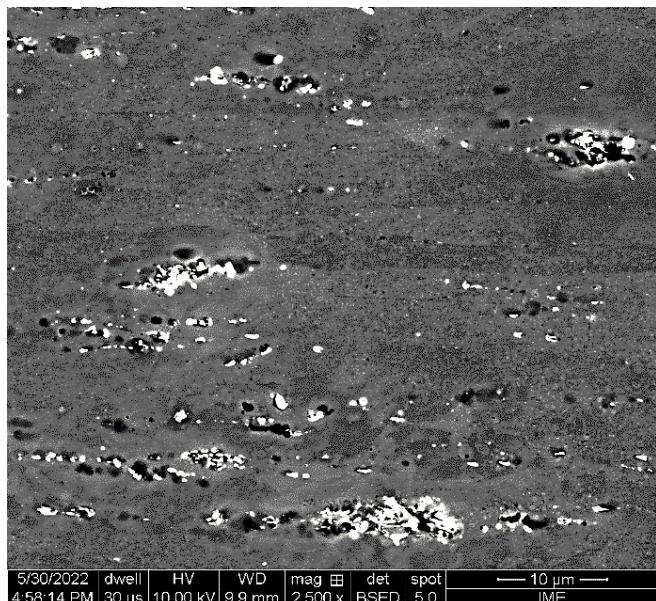


Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se a distribuição homogênea e similar de inclusões e/ou precipitados ao longo das amostras alinhadas na DL, e que a liga produzida pelo processo de fundição contínua de chapas (AA 5050C) apresenta partículas de inclusões/segunda fase aparentemente, em maior quantidade distribuídas ao longo da matriz em relação à liga produzida pelo processo de fundição direta (AA 5052). Tal fato pode ser explicado por dois possíveis motivos. A primeira possibilidade pode estar associada às maiores taxas de solidificação obtidas no processo de fundição contínua de chapas, que favorece a formação de uma maior quantidade de sítios para nucleação de segunda fase [11]. A segunda possibilidade, se a maior parte dessa partículas estiverem associadas a inclusões, refere-se ao fato do lingote produzido por fundição direta – DC, liga AA 5052, ser submetido ao processo de escarfagem da sua superfície antes de ser laminado a quente, o que garante a remoção de grande parte da camada de alumina (Al_2O_3) formada na superfície do lingote, enquanto o produto da fundição contínua de chapas – TRC, liga AA 5050C, mantém em seu volume toda a alumina formada durante o processo de lingotamento conjugado a laminação quente. Observa-se ainda que o polimento eletrolítico promoveu a remoção de parte das inclusões e/ou precipitados devido ao comportamento anódico na célula eletrolítica formada, dando lugar as cavidades apresentadas junto a matriz metálica nestas microestruturas, conforme destacado nas Figuras 2 e 3.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados do ensaio de dureza Vickers realizado. Os valores médios de dureza apresentados nas ligas apresentaram diferença significativa, sendo possível observar uma redução de 21,78% no valor de dureza, para a liga AA 5050C em comparação com a AA 5052. Ressaltou-se, com ajuda do cálculo da variância e da confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio, não haver dispersão significativa entre os valores obtidos para cada liga em estudo.

Figura 3 - Micrografia da liga AA 5050C (DL→), com setas indicando cavidades (em preto) que continham partes das possíveis partículas de inclusão/precipitados ainda presentes (em branco).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de dureza Vickers.

	AA 5052	AA 5050C
Média	87,38	68,35
Desvio Padrão	2,42	1,38
Variância	5,86	1,91
Mínimo	83,59	65,64
Máximo	91,17	69,92
Número de Medidas	10	10
Índice de confiabilidade (95%)	1,50	1,18

Fonte: Elaborado pelos autores.

Esperava-se que a liga AA 5050C, por possuir maior quantidade de inclusões e/ou partículas segunda fase dispersas na matriz devido o processo de produção via processamento contínuo, seria mais dura que AA 5052. Tal fato não é observado e pode ser explicado através da diferença composicional das ligas (Tabela 1). A liga AA 5050C é uma adequação composicional da liga AA 5052 com o intuito de reduzir a camada

de óxido formada durante o processamento TRC. O magnésio foi um dos elementos alterados, tendo a sua quantidade reduzida, e por se tratar de um elemento que se encontra em solução sólida preferencialmente, essa redução de teor afeta diretamente a dureza e resistência mecânica da liga. Indícios estes que destacam que provavelmente estas partículas observadas em análises no MEV estão associadas em grande parte a inclusões de alumina (Al_2O_3), as quais não tem papel no endurecimento da liga, como ocorre com as partículas de segunda fase intermetálicas formadas neste tipo de ligas. Outro ponto que suporta o comportamento de menor dureza para a liga 5050C são as condições nas quais foi submetida ao processamento termomecânico, ou seja, a maior redução total aplicada na primeira etapa de laminação a frio e maior temperatura de encharque que foi exposta no recocimento intermediário (Figura 1). Fatores estes que podem ter propiciado uma redução na temperatura de recristalização (pela redução imposta na laminação de desbaste) somada a possibilidade de crescimento de grão (pela temperatura de encharque imposta no recocimento para recristalização) na condição que foi posteriormente submetida a laminação a frio final e recocimento para estabilização, contribuindo assim também para o decréscimo da dureza.

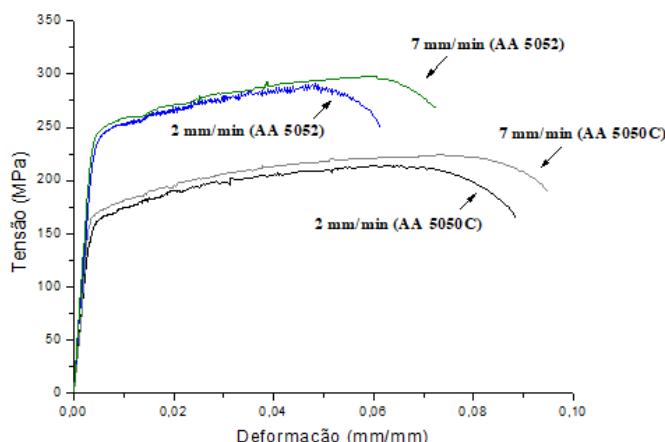
Na Figura 4 têm-se as curvas tensão-deformação de engenharia das ligas AA 5052 e AA 5050C, com velocidades de deformação no ensaio de tração uniaxial de 2 mm/min e 7 mm/min.

Em relação ao aspecto da curva, observa-se serrilhados causados pelo efeito Portevin-Le Chatelier, ou comportamento de envelhecimento dinâmico, na região de deformação plástica de ambas as ligas ensaiadas com a velocidade 2 mm/min. A liga AA 5052 exibe não só uma magnitude maior de quedas de tensão (diferença entre o pico e o vale de tensão em cada dentição), como também uma maior frequência (número de quedas de tensão) quando comparada a liga AA 5050C.

Segundo o modelo dinâmico de envelhecimento de tensão, quando a movimentação das discordâncias é temporariamente interrompida em obstáculos, tais como florestas de discordâncias, os átomos de soluto que já estão isolados nesses obstáculos, migram em

direção a essas discordâncias fixas. Eles então formam atmosferas em torno das discordâncias e fazem com que elas sejam bloqueadas. Quando a força aplicada é elevada o suficiente, as discordâncias móveis se desprendem das atmosferas e avançam livremente em direção a outros obstáculos. A repetição deste processo constitui a produção serrilhada observada na curva de tensão-deformação [12].

Figura 4 - Curvas tensão-deformação de engenharia das ligas AA 5052 e AA 5050C com velocidades de deformação no ensaio de tração uniaxial de 2 mm/min e 7 mm/mm



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, é possível inferir que, como a liga AA 5052 possui maior concentração de magnésio (Tabela 1), a maior parte dos átomos de soluto de Mg movimentam-se no sentido das discordâncias e, portanto, o deslocamento das discordâncias é mais difícil. Logo, uma força maior é necessária para a movimentação da discordância, resultando em uma maior queda de tensão na curva tensão-deformação. Por outro lado, quando a concentração de magnésio é alta, a interação de átomos de soluto de magnésio com as discordâncias é mais frequente e, consequentemente, o processo de quedas por tensão torna-se mais frequente. Observa-se que o serrilhado ocorre a uma frequência mais elevada para a liga AA 5052 do que para a liga AA 5050C.

Para as curvas ensaiadas com velocidade de deformação de 7 mm/min, constata-se, como esperado, uma

diminuição na quantidade e na intensidade do serrilhado. Tal fato ocorre pelo aumento da taxa de deformação, pois não há tempo para a movimentação da atmosfera de soluto, que é responsável pelo envelhecimento dinâmico. Dessa forma, essa velocidade de ensaio não é suficiente para eliminar o serrilhado, contudo, as quedas de tensão tornam-se menos frequentes.

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas das ligas AA 5052 e AA 5050C obtidas através dos ensaios de tração uniaxial realizados com velocidade de deformação de 2 mm/min e de 7 mm/min.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das ligas AA 5052 e AA 5050C extraídas dos ensaios de tração.

Propriedades	Velocidade de Deformação (mm/min)			
	AA 5052		AA 5050C	
	(2)	(7)	(2)	(7)
Limite de Escoamento (σ_e) (MPa)	240,74 ± 8,06	254,26 ± 6,13	156,61 ± 6,96	169,88 ± 0,41
Módulo de Elasticidade (E) (GPa)	66,78 ± 5,83	71,84 ± 6,36	68,58 ± 11,68	73,52 ± 13,38
Limite de Resistência à Tração (LRT) (MPa)	286,76 ± 9,39	298,91 ± 20,47	211,13 ± 2,39	209,46 ± 0,48
Alongamento uniforme (%)	4,24*	5,44*	5,91*	5,69*
Alongamento de ruptura (%)	4,82*	6,05*	6,60*	6,32*

*Dados extraídos das curvas tensão-deformação da Figura 4.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto às propriedades mecânicas observadas no ensaio de tração, é possível verificar que a liga AA 5052 apresentou valores maiores de resistência à tração e limite de escoamento e menores de alongamento quando comparada à liga AA 5050C, como também se observou no ensaio de dureza. De acordo com a literatura, materiais processados por fundição contínua de chapas (TRC), apresentam propriedades mecânicas superiores

em termos de resistência quando comparados aos produzidos por fundição direta (*DC*). Tal fato decorre da presença de maior número de segunda fase precipitada durante o *TRC*, onde, possivelmente, os precipitados são ancorados, preferencialmente, nos contornos de grão, atuando como refinadores dos grãos [13]. Analisando a equação de Hall-Petch, observa-se que a relação entre o tamanho de grão e tensão são inversamente proporcionais; isto é, quanto menor o tamanho de grão, maior será a resistência à tração do material. Infere-se, por meio das propriedades mecânicas obtidas, que as ligas em estudo apresentaram comportamento contrário ao apresentado na literatura.

Esse comportamento pode ser explicado pela diferença de composição entre as ligas, uma vez que a liga AA 5050C apresenta menor teor de magnésio e cromo e maior teor de cobre, somado ao fato de ter sido submetida a maior redução na espessura e maior temperatura de encharque nos processamentos subsequentes a laminação a quente, ou seja, de laminação a frio de desbaste e recozimento intermediário para recristalização, que foram adotados para a liga AA 5052, antes de ser submetida a condições semelhantes a liga 5052 na laminação final e recozimento para estabilização (Figura 1). Essa variação composicional foi necessária a fim de reduzir a oxidação superficial durante a solidificação no processamento *TRC*. Com isso, apesar de ter a propensão de apresentar grãos mais refinados pelo processo *TRC*, em relação à liga AA 5052, a liga AA 5050C apresenta menores limites de resistência à tração e escoamento, e maior ductilidade, provavelmente justificado pelo menor endurecimento por solução sólida e/ou por precipitação, devido a composição, somado ao maior tamanho de grão, devido ao processamento intermediário (conforme Figura 1).

Acerca da utilização de diferentes velocidades de ensaio na tração uniaxial, comparando os resultados obtidos, observou-se que estes apresentaram diferenças para os valores de limite de escoamento, módulo de elasticidade, limite de resistência e alongamento. Esse efeito em relação aos valores do limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, pode ser explicado devido ao aumento da quantidade de discordâncias empilhadas em função do aumento da taxa de deformação,

que provocam maior resistência ao início da deformação, maior encruamento e extensão na capacidade de deformação plástica, no regime de deformação uniforme e localizada na estrição [14]. No entanto, em relação ao módulo de elasticidade a diferença pode ser atribuída ao fato do ensaio ter sido conduzido com tecnologias diferentes de extensômetro (de contato para velocidade de 2 mm/min e óptico para velocidade de 7 mm/min).

4. Considerações Finais

As resistências mecânicas apresentadas pelas propriedades da liga AA 5052, tais como limite de escoamento e resistência à tração, foram superiores às apresentadas pela liga AA 5050C, tanto nos ensaios em tração uniaxial quanto em dureza Vickers, ao contrário da ductilidade inferior. Esse resultado pode ser explicado pelas variações existentes nas composições químicas de cada liga e variações nos processos de produção. É possível que pequenos decréscimos nas temperaturas e/ou no tempo de encharque nos tratamentos de recozimento intermediário e para estabilização propiciem ajustes que resultariam em valores próximos de propriedades de ambas as ligas submetidas a reduções distintas na laminação a frio de desbaste e similares na laminação a frio final, sem novos ajustes na composição química da liga 5050C.

Assim, a liga AA 5050C pode ser considerada como uma opção viável de substituição da liga AA 5052 para aplicações que não demandem elevada resistência mecânica e exibam maior ductilidade nas condições de processamento adotadas para o presente estudo.

Quanto à ocorrência de envelhecimento dinâmico, a presença de serrilhados na região de deformação plástica em ambas as ligas, indica a existência do fenômeno. A frequência e magnitude de quedas de tensão verificadas podem ser associadas aos diferentes teores de Mg das ligas, em função da sua presença em solução sólida. Observa-se ainda que o aumento da velocidade de deformação de 2 mm/min para 7 mm/min durante o ensaio de tração, promove uma diminuição na quantidade e intensidade do serrilhado, como também, maior extensão no alongamento uniforme e total, provavelmente devido a redução do tempo para a movimentação

da atmosfera de soluto durante o deslizamento das discordâncias. Ou seja, o processamento de conformação dessas ligas para obtenção de peças, pode ser facilmente realizado sem a ocorrência de envelhecimento dinâmico quando realizado sob taxas de deformação superiores.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CBA pela doação das ligas para este estudo, ao Instituto Militar de Engenharia

(IME) pela infraestrutura laboratorial para condução das caracterizações e, particularmente, ao Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) por realizar os ensaios de tração com extensômetro óptico. Somado ao CNPq e a CAPES/PROEX pelas bolsas de mestrado e doutorado, como também pelos recursos para confecção dos corpos de prova de tração subsidiados pela CAPES/PROEX do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM) do IME.

Referências Bibliográficas

- [1] ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Vantagens e desvantagens do alumínio. *Abal*, São Paulo, [20--?]. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio/>. Acesso em: 27, jul. 2018.
- [2] OTOMAR, H. P.; PLAUT, R. L. Comparision of the microstructure and texture evolution in AA 1050 aluminum alloy sheets produced by the DC and CC methods. In: SUAREZ, C. E. et al. (org.). *Light Metals 2012*. New York: Springer, 2012. p. 223-238.
- [3] DU, Q.; ESKIN, D. G.; KATGERMAN, L.; NADELLA, R. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 421-480, 2008.
- [4] BAREKAR, N. S.; BHAGURKAR, A. G.; DAS, S.; FAN, Z. FAKIR O. E.; HUANG, Y.; YANG, X.; ZHOU, L.; The impact of melt conditioning on microstructure, texture and ductility of twin roll cast aluminium alloy strips. **Materials Science & Engineering A**, [s. l.], v. 650, p. 365-373, 2016.
- [5] KARLÍK, M.; ROUBAUT, F.; SLÁMA, P.; SLÁMOVÁ, M.; VÉRONA, M. Differences in microstructure and texture of Al-Mg sheets produced by twin-roll continuous casting and by direct-chill casting. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 231-240, 2003.
- [6] OGATA, C. T. **Correlações entre microestrutura, parâmetros térmicos e propriedades mecânicas de ligas de alumínio da série 5xxx solidificadas unidirecionalmente**. 2017. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- [7] BARONY, N. B. **Avaliação estrutural e mecânica de chapas das ligas de alumínio AA 5052 E AA 5050C**. 2019, 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, 2019.
- [8] CHEN, X.; FANG, Y.; MAO, J.; PAN, F.; WANG, B. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 2481-2489, 2015.
- [9] ABOULFADL, H.; CHOI, P.; DEGES, J.; RAABE, D. Dynamic strain aging studied at the atomic scale. **Acta Materialia**, [s. l.], v. 86, p. 34-42, 2015.
- [10] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M – 13a**: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2013. 28 p.
- [11] HOSEINIFAR, A.; SALARI, S.; SOLTAN, M. A. N. Effect of twin-roll casting parameters on microstructure and mechanical properties of AA5083-H321 sheet. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, [s. l.], v. 26, n. 10, p. 2552-2560, 2016.
- [12] MORRIS, J. G.; WEN, W.; ZHAO, Y. The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 392, n. 1-2, p.136-144, 2005.
- [13] MARTINS, J. P.; PADILHA, A. F. Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (twin roll caster) – microestrutura. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 4, p. 427-431, 2006.
- [14] DONIČ, T.; KOČIŠKO, R.; KOVÁČOVÁ, A.; KVAČKAJ, M.; KVAČKAJ, T.; POKORNÝ, I. Influence of strain rate on ultimate tensile stress of coarse-grained and ultrafine-grained copper. **Materials Letters**, [s. l.], v. 64, n. 21, p. 2344-2346, 2010.