

CHAPAS DE AÇOS LAMINADAS DE SAE 1006 COM E SEM ADIÇÃO DE TITÂNIO SUBMETIDAS À TEMPERATURA ELEVADAS PARA AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE GRÃO¹

Marco Antonio Colosio²
José Carlos Santos³
João Gilberto Lúcio⁴
Claudio Ronqui⁴
Angelo Cecon⁴
Marcelo L. Ferreira⁴
Raphael H. Coelho⁴

Resumo

As chapas de aços laminadas quando submetidas a elevadas temperaturas são suscetíveis a falhas, ou baixo desempenho em uso no campo, porém para superar este problema o estudo presente avalia o crescimento de grão originado pelo excesso de temperatura, o qual é responsável direto na redução das propriedades mecânicas dos aços. Através de testes mecânicos e metalográficos, este estudo mostra oportunidades tecnológicas para aplicações de especificações de chapas de aços, onde os usos de chapas comuns não teriam um desempenho adequado e alguma falha de desempenho poderia ocorrer pelo crescimento de grão excessivo do material. Finalmente, o estudo sugere uma opção tecnológica no uso de aços ligados ao titânio.

Palavras-chave: Crescimento de grão; SAE 1006.

SAE 1006 ROLLED SHEET METAL WITH AND WITHOUT ADDITION OF TITANIUM, SUBMITTED IN HIGH TEMPERATURE FOR EVALUATION OF GRAIN GROWTH

Abstracts

Rolled sheet steels when submitted in high temperatures are susceptible to failures, or low performance during its use in field, however, for overcoming this problem, the current study evaluates the grain growth caused by excessive temperatures, which is responsible mainly for reducing mechanical properties in steels. Throughout mechanical tests and metallography, this study shows technological opportunities for applying specification of sheet steels, since the usage of a regular sheet steels would not have an adequate performance and some failure could occur due to excessive material grain size growth. Finally, the study suggests a technologic option for using titanium alloyed steels.

Key words: Grain growth; SAE 1006.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² PhD, Especialista da Engenharia de Materiais - General Motors do Brasil. marco.colosio@gm.com, (11) 4234-6076.

³ MSc, Especialista da Engenharia de Materiais - General Motors do Brasil. josecarlos.santos@gm.com, (11) 4234-7335.

⁴ Eng. Pesquisador da Faculdade de Engenharia da Fundação Santo André, SP, Brasil. jgilberto@rassini-nhk.com.br (11) 4366-9327; cronqui@brasmetal.com.br, (11) 4070-9685; angelo_cecon@hotmail.com, (11) 8563-9321; marcelo.ferreira@alcoa.com.br, (11) 8377-5836; raphaelt@gmail.com, (11) 7623-7010.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na indústria automotiva tem levado pesquisadores, especialistas e a comunidade acadêmica e instituições a ampliar o escopo de atuação focando os avanços recentes. Produtos com geometrias complexas têm norteado o *design* e trazendo dificuldades para manufatura e exigindo domínio da tecnologia para evitar desperdícios e tornar a empresa competitiva no mercado globalizado. Na indústria, estuda-se parâmetros metalúrgicos como o tamanho de grão, que pode interferir na capacidade de deformação plástica dos materiais metálicos e também tem influência nas características superficiais quando o metal é deformado. Em temperatura ambiente, à medida que se diminui o tamanho de grão, aumenta-se a resistência mecânica, a tração e a dureza. Este fato é justificado pela atuação dos contornos de grão como barreiras naturais à propagação de descontinuidades e à deformação plástica. Devido à sua alta resistência, a relação força-peso, excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade, o titânio comercialmente puro, é um dos mais importantes elementos químicos e amplamente utilizados em muitas áreas tecnológicas.^(1,2)

Sabe-se que o tamanho de grão tem importância relevante na fabricação de certos produtos, que sofrem estampagem profunda e extra-profunda, e que tem como característica final um acabamento com aspecto liso, e conhecendo-se limites do tamanho de grão que interfere no visual final da peça poderá servir como base para especificação de matéria-prima. Algumas avaliações preliminares demonstram que granulação grosseira pode ser um fator que gera superfície rugosa, tipo “casca de laranja” e não uma superfície corretamente lisa como seu acabamento exige. O conjunto de processos de fabricação até a peça final consiste de ciclos de deformação e restauração das propriedades (recuperação, recristalização e crescimento de grão), laminação a frio, recozimento em fornos com atmosfera controlada na empresa relaminadora e por fim o processo na fabricação da peça, que requer uma granulação fina; não está claro em literaturas qual o tamanho ideal que pode servir como base para uma normalização. O fundamento para controle de crescimento de grão em aços baixo carbono para estampagem está na utilização de precipitados microestruturais que dificultem o crescimento de grão, ao mesmo tempo em que geram aumento na tensão limite de escoamento do material. Os avanços tecnológicos conduzidos por usinas estão concentrados em aços com elementos inibidores de crescimento de grão, e no caso desse estudo focou-se em aço baixo carbono com adição tradicionalmente conhecida de titânio.⁽¹⁾ Os aços com baixo teor de carbono ocupam hoje cerca de 70% da produção mundial, objetivando aplicações industriais das mais variadas, de imensos componentes estruturais até pequenas peças e dispositivos mecânicos. A obtenção de estruturas ferríticas cada vez mais refinadas é meta da pesquisa atual, possibilitando a obtenção de aços com excelentes propriedades mecânicas e ainda mantendo-se considerável efeito de tenacidade, todavia, partes das propriedades mecânicas dos aços ainda dependem da quantidade de carbono em solução na matriz.⁽³⁾

Com base nestas premissas básicas, o presente estudo aborda estudo de tamanho de grão, que afeta a manufatura e visual de peça final, quando utilizado aço baixo carbono para estampagem profunda e extra profunda. Neste trabalho, busca-se avaliar o efeito do crescimento de grão, assim como obter informações técnicas que favoreçam o direcionamento de parâmetros de processo na conformação mecânica do aço e suas ligas. Focou-se o SAE 1006 comum sem liga em comparação ao SAE 1006 com adição de titânio.

1.1 Descrição

A deformação plástica intensa, envolvendo processos tais com extrusão por canais equiaxiais (ECAP), a torção com alta compressão (HPT) e a colaminação seqüencial (ARB) estão agora atualmente em uso em plantas experimentais por todo o mundo. ECAP foi desenvolvido aproximadamente dez anos atrás, e demonstrou potencialidade para produzir um refinamento grande da microestrutura. Aços carbono contendo elementos como Nb, V e Ti mostram uma tendência para a formação de nitretos e/ou carbonitretos estáveis, que proporcionam a possibilidade de controle da microestrutura e conseqüentemente, podem determinar as propriedades mecânicas do material. Um processamento termomecânico controlado, que envolve deformação intensa, transformação de fases e formação de ferrita induzida por deformação, é um meio importante de obter um controle microestrutural mais apurado, com resultados superiores à laminação controlada.

Está consolidado que o lingotamento contínuo é hoje a forma mais usual de se processar o aço industrialmente e é o método que produz o melhor refinamento de grão.⁽⁴⁾ Este processo é responsável pela solidificação da maior parte dos aços produzidos nas aciarias. O processo de lingotamento contínuo aumentou sua participação na produção de aço, por assegurar notáveis vantagens sobre o processo convencional, permitindo a eliminação de uma série de etapas intermediárias entre o aço líquido e o semi-produto (placa ou tarugo), resultando em um menor custo operacional, menor consumo de energia e maior produtividade. Atualmente, os esforços estão sendo voltados para o lingotamento contínuo de placas finas, com laminação direta para tiras, que elimina o reaquecimento tradicional e desbastes das placas, e o desenvolvimento do lingotamento de tiras para posterior laminação a frio, eliminando ou reduzindo o processo de laminação a quente.^(1,5)

Estudos preliminares mostram que aços sem o titânio não mostram bom desempenho de conformabilidade na temperatura que varia de 600°C a 800°C, devido ao rápido crescimento dos grãos do material. Estudos também mostram que a recristalização dinâmica ocorre em altas temperaturas.⁽⁶⁾

No presente estudo será empregado o tratamento térmico em diversas temperaturas e tempos, para avaliação de crescimento de grãos em amostras de materiais utilizados atualmente na indústria automotiva, os quais, durante processos de manufaturas, são submetidos a processos de específicos com a presença de temperaturas representativas no comportamento do material a quente. Com base nestas informações e parâmetros, o comportamento dos materiais será avaliado microscopicamente. Obtendo-se os resultados, serão definidos parâmetros empíricos para a conformação mecânica e características superficiais.

1.2 Crescimento de Grão

A deformação plástica que é imutável e não recuperável após a libertação do carregamento aplicado é acompanhado de deslocamentos atômicos permanentes. Para pluralidade dos materiais metálicos, o regime elástico prossegue apenas até a deformação de aproximadamente 0,5%, à medida que o material é deformado além dessa referência, a tensão não é mais harmônica como a deformação, incidindo então uma deformação permanente e não recuperável. A deformação e o escorregamento em materiais policristalinos apresentam complexidade, e por conseqüência de orientações cristalográficas aleatórias do amplo número de grãos,

a direção de escorregamento tem variante de um grão para outro. Para cada grão, o movimento da discordância acontece ao longo dos sistemas de escorregamento que possui a orientação mais favorável. O grão é um cristal individual e a deformação plástica de uma prova genérica corresponde à distorção comparável de grãos individuais devido ao escorregamento. Durante a deformação plástica o ajustamento mecânico e a coesão são mantidos ao longo dos contornos dos grãos, que é definido como a interconexão que separa dois grãos adjacentes que possuem orientações cristalográficas distintas, isto é, os contornos de grão geralmente não se apartam ou se abrem. Como consequência cada grão individual está circunscrito em determinado grau, forma que ele pode adotar devido os seus vizinhos. Antes da deformação os grãos são equiaxiais, ou seja, possuem aproximadamente a mesma dimensão em todas as direções. Para esse tipo específico de deformação, os grãos se tornam alongados no sentido da direção a qual a amostra foi deformada.⁽⁷⁾

Os metais policristalinos são mais resistentes que seus equivalentes monocristalinos, o que denota que maiores tensões são exigidas para dar início ao escorregamento e consequente escoamento. Isto ocorre, em grande parte, também como um saldo de restrições geométricas que são conferidas sobre o grão durante a deformação. Embora um único grão possa estar orientado favoravelmente em relação à tensão aplicada para o escorregamento, ele não pode deformar até que seus grãos adjacentes e orientados de maneira menos favorável também sejam capazes de sofrer escorregamento, isso exige um nível maior de tensão aplicada.

A recuperação é um alívio de uma parte de energia de deformação interna, de um metal previamente deformado a frio, geralmente é utilizado tratamento térmico de recozimento e a recristalização é a formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação no interior de um material previamente deformado a frio.⁽⁸⁾ O crescimento de grão é definido como, o crescimento de determinados grãos à custa de outros de modo a diminuir a área total de contornos. Assim como a recristalização primária, o crescimento de grão é termicamente acionado, no entanto, o potencial termodinâmico para o crescimento de grão é da ordem de duas vezes de grandeza menor que o potencial termodinâmico para recristalização primária. A curvatura dos contornos de grão leva a uma diferença de potencial químico, promovendo migração de átomos através dos contornos de grão e tanto a recristalização como durante o crescimento de grão ocorre migração de contornos de alto ângulo.⁽⁷⁾

Os conceitos fundamentais neste mecanismo tratam-se da rapidez de migração de átomos em contornos, sendo maior durante a recristalização que durante o crescimento de grão; durante a recristalização os contornos de grãos migram a sua direção oposta do seu centro de curvatura, enquanto que o crescimento de grão, a migração se dá no sentido do centro de curvatura do contorno. Quando os grãos aumentam de tamanho uniformemente, ou seja, a grande maioria tem “diâmetro” próximo ao diâmetro médio, define-se o fenômeno como crescimento normal de grão ou simplesmente crescimento de grão. Outra possibilidade é o crescimento preferencial de alguns grãos, levando a uma distribuição estatística bi modal de tamanho de grão. Esse processo é conhecido como crescimento anormal de grão ou recristalização secundária.⁽⁷⁾

Os principais fatores que influenciam o crescimento de grão são:

- temperatura, onde a cinética de crescimento de grão tem subordinação à migração dos contornos de alto ângulo, a qual é função da mobilidade destes, que, por sua vez, é termicamente ativada e o crescimento ocorre de forma melhorada em temperaturas elevadas;
- elementos em solução e partículas onde ambos funcionam como ancoragem dos contornos;
- dimensões do material: sobretudo em chapas finas, quando o tamanho de grão supera a espessura da chapa, a força motriz é atenuada porque o crescimento passa a ser bidimensional; e
- textura cristalográfica: um material com textura complexa tem geralmente, muitos contornos com ângulos menores o que reduz a força motriz e, conseqüentemente, a cinética de crescimento.⁽⁷⁾

As mudanças na textura durante o crescimento de grão estão em acordo qualitativo com os anteriormente relatados para matéria-prima com titânio deformado e recristalizado.⁽⁹⁾

A referência de estudos de *Ueji* entre outros mostram o efeito da granulometria sobre a tensão propriedades de aços sem carbono. Como era esperada, a elasticidade foi aumentada por refino de grão em detrimento da ductilidade.^(10,11)

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os aços para os experimentos foram obtidos comercialmente em forma de chapa com espessura final de 2,70 mm, que foram submetidos a uma redução na espessura de 45% aplicada em um laminador quádruplo reversível com tecnologia avançada em controle de espessura no sentido longitudinal e transversal por medidores de raios-X e ajuste de coroamento da fita acoplado ao próprio equipamento. Para caracterizar os materiais a serem analisados os elementos químicos foram avaliados através de espectrofotômetro de emissão óptica *Spectrolab* e os resultados estão descritos na Tabela 1. O recozimento dos materiais foi feito em banho de sal líquido.

A medição do tamanho de grão foi avaliada pelo método comparativo conforme ASTM E-112⁽¹²⁾ e foi utilizado microscópio com aumento de 100X e 200 x e também comparou-se o resultado visual com tabela comparativa Stahl-Eisen-Prufblatt 1510-61.

Tabela 1. Composição química dos dois materiais avaliados (% em massa)

Amostra	C	Mn	Ti	P	S
Aço / sem Ti	0,03	0,306	---	0,012	0,068
Aço ao Ti	0,03	0,245	0,019	0,011	0,0116

Uma variedade de microestruturas em aços microligados pode ser obtida em função da temperatura de deformação mecânica, taxa de resfriamento e a composição química.⁽¹³⁾ O aço baixo carbono com adição de titânio se encaixa na norma SAE J403, no entanto devido à característica especial do controle do tamanho de grão se faz necessário processo de fabricação e garantias especiais não previstas pela norma. Nestas condições, é usual uma especificação especial entre o

fabricante do aço e o processador do aço. Para realizar tratamento térmico utilizou-se uma matriz de experimentos para estabelecer parâmetros comparativos conforme Tabela 2.

Tabela 2. Matriz de tratamento térmico nas amostras

Temperatura °C	Tempos min.					
	10	20	30	40	50	60
700	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
750	A7	A8	A9	A10	A11	A12
	B7	B8	B9	B10	B11	B12
800	A13	A14	A15	A16	A17	A18
	B13	B14	B15	B16	B17	B18
850	A19	A20	A21	A22	A23	A24
	B19	B20	B21	B22	B23	B24
900	A25	A26	A27	A28	A29	A30
	B25	B26	B27	B28	B29	B30

Aço tipo A = SAE 1006; Aço tipo B = SAE 1006 com Ti

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos utilizando aço SAE 1006 comum em comparação com SAE 1006 com titânio, demonstraram a eficiência deste elemento de liga na restrição de crescimento de grão. A amostra do material em chapa que sofreu 45% de redução em processo de laminação, obtendo dimensional final de 2,70 mm e após ser submetido à temperatura de 700°C e tempo de 10 minutos, quando submetido ao ensaio metalográfico verificou-se que o titânio teve efeito no crescimento de grão. Observando a Figura 1, nota-se que o aço comum de baixo carbono (sem adição de titânio) obteve recristalização já na primeira fase de tratamento térmico, isso deve-se ao efeito do aquecimento a 700°C, permitindo rearranjo atômico ordenado resultando em grãos equiaxiais.

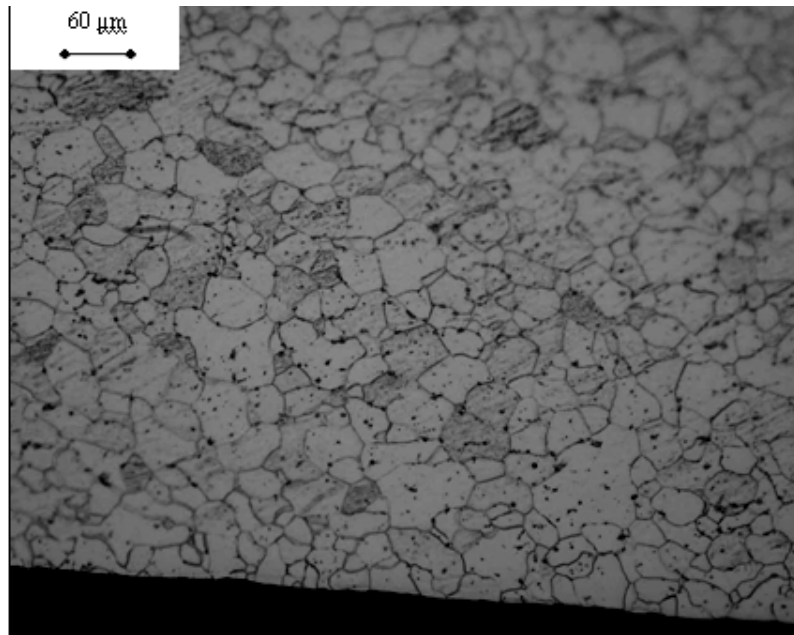


Figura 1. Imagem do SAE 1006 comum que sofreu aquecimento a 700°C durante 10 minutos.

Enquanto que na Figura 2, observa-se que no aço SAE 1006 com Ti o processo não se mostra eficiente na recrystalização com baixos fatores (tempo e temperatura), ocorrendo recrystalização somente na superfície da chapa.



Figura 2. Mostra imagem do SAE 1006 com Ti que sofreu aquecimento a 700°C durante 10 minutos.

O retardamento na recrystalização do aço SAE 1006 com titânio demonstra que a adição desse elemento intersticial age como uma trava para movimentação, devido ao titânio formar precipitados em contorno de grão, agindo como uma ancoragem mecânica. Vale salientar que para chapas muito finas, onde o tamanho de grão ultrapassa a espessura da chapa, a força motriz diminui devido ao crescimento ser bidimensional.

O aço SAE 1006 com Ti apresenta um melhor desempenho em características superficiais quando comparado com SAE 1006 comum (sem Ti), sendo essa uma característica fundamental para o mercado automobilístico em peças de valor estético (peças expostas), a Tabela 3 ilustra os resultados obtidos para ambos os aços a temperatura fixo de 800°C.

Tabela 3. Rugosidade dos aços no topo das calotas

<i>Tipo de aço</i>	<i>Valores de rugosidade ($\mu\text{m Ra}$)</i>
SAE 1006 comum	0,33
SAE 1006 com Ti	0,23

Na avaliação do ensaio de embutimento *Erichsen* utilizado para determinar tamanho de grão ferrítico, pode-se observar um melhor desempenho do SAE 1006 com Ti com relação ao SAE 1006 comum, ambos tratados termicamente a 800°C, a Figura 3 ilustra a média das alturas das calotas variando tempo.

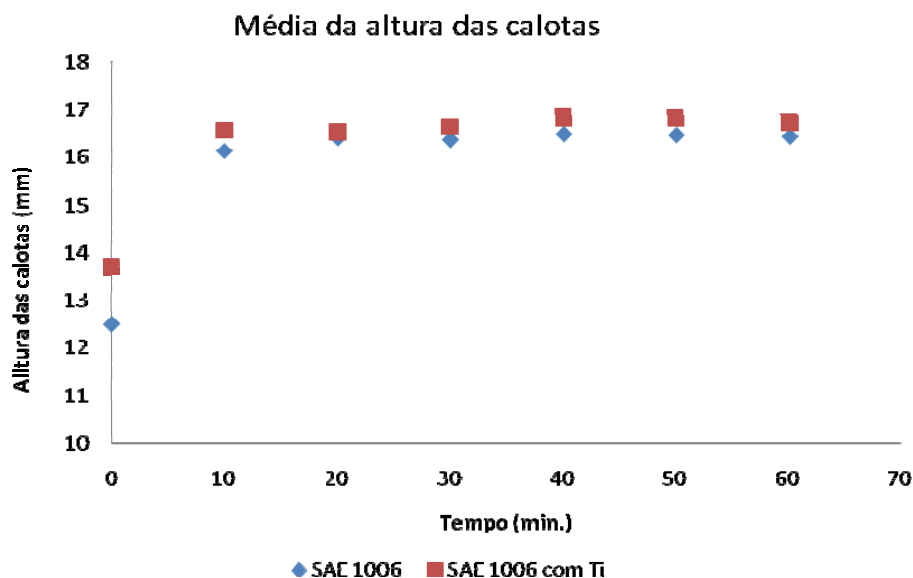


Figura 3. Média das alturas das calotas a 800°C.

Observa-se no gráfico um constante domínio do SAE 1006 com Ti com relação à altura das calotas quando variou-se o tempo, isso ocorre devido à maior coesividade do aço com Ti, definida como interconexão que separa dois grãos adjacentes que possuem orientações cristalográficas distintas.

Quando compara-se os dois corpos de prova após embutimento *Erichsen* é possível constatar um aspecto rugoso, denominado como “casca de laranja” no SAE 1006 comum.



Figura 4. Aspecto visual das calotas SAE 1006 comum (esq.) e SAE 1006 com Ti (dir.), ambos a 800°C.

Quando se fez comparativo de tamanho de grão observando em microscópio óptico e comparando com tabela ASTM não se encontra variação no tamanho de grão.

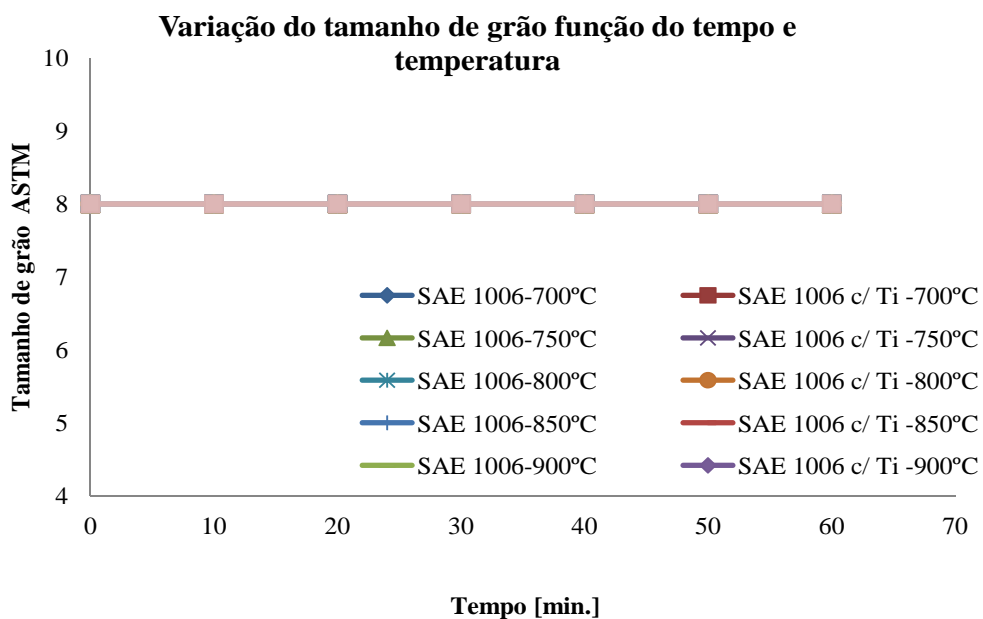


Figura 5. Tamanho de grão em função do tempo e temperatura.

O fato de não se encontrar tamanho de grão com crescimento pode ter sido devido à textura cristalográfica, pois um material com textura forte tem em geral muitos contornos com ângulos menores o que reduz a força motriz e, portanto, a cinética de crescimento.

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos neste estudo, podem-se concluir as seguintes constatações:

- a recristalização do aço SAE 1006 pode ser retardada pela adição de Ti; e
- tratamentos térmicos de curto tempo e baixas temperaturas mostram menores crescimentos de grão. As análises do comportamento mecânicos e metalúrgicos de chapas de aço submetidas a longos tempos e elevadas temperaturas podem definir a melhor especificação de material, sendo estas, algumas vezes necessários o uso de elementos inibidores do crescimento de grão e outras vezes desnecessários e como resultado, a possibilidade de empregos de aços de baixos custos que tem que ser avaliado na fase de projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa General Motors do Brasil, Brasmetal Waelzholz pelo suporte técnico e experimental e a Faculdade de Engenharia de Materiais da Fundação Santo André pelo apoio acadêmico neste estudo.

REFERENCIAS

- 1 HURLESS, B.E.; FROES, F.H. Lowering the cost of titanium. The AMPTIAC Quarterly, v.6, n. 2, p. 3-9, 2002.
- 2 C.Y. Gao, P. Lours, G. Bernhart, Thermomechanical stress analysis of superplastic forming tools, Journal of Materials Processing Technology 169, p. 281-289, 2005.
- 3 BRZUSZEK, R.K., P.C.M. Rodrigues, L.S. Motta and D.B. Santos , Microstructural evolutions of ultra-fine grained C-Mn steel warm rolling and intercritical annealed. Material Research, 5(3): São Carlos , Brazil, 343-348, 2002.
- 4 ADEBIYI, D.I., "Effect of carbon content on grain refinement in plain carbon steel through thermal cycling", Thesis, M. Eng., FUT, Akure, Nigéria, 2006.
- 5 G.Lothonkum, P. Wangyao N. Thaweepornkhasemsukh, The Effect of long-Term Thermal Exposure at Elevated Temperatures on Microstructures and Mechanical Properties in Centrifugally Casted Iron-Based Alloy, J. of Metals, Mater. & Minerals. 16 (2) p. 25-31, 2006.
- 6 M.J. Tan, X.J. Zhu School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 2007.
- 7 PADILHA, Angelo Fernando; SICILIANO, Fulvio. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura: crescimento de grão e recristalização secundária. 3ª Ed. São Paulo: ABM Livros, p. 59 – 66, 2005.
- 8 CALLISTER, Willian D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução: imperfeições diversas. 5ª Ed. São Paulo: LTC - editora, p. 50 – 62, 2002.
- 9 K. Okazaki, Formerly Visiting Research Associate, Metallurgical Engineering and Materials Science Department, University of Kentucky, Lexington, Ky; 1971.
- 10 R. Ueji, N. Tsuchida, H. Fujii, D. Kondo, K. Kunishige, J. Japan Inst. Met. 71 ; 815–821, 2007
- 11 R. Ueji, N. Tsuchida, D. Terada, N. Tsuji, Y. Tanaka, A. Takemura, K. Kunishige, Scripta Mater. p. 59 and 963–966, 2008.
- 12 ASTM E 112-96, Standard test method for determining average grain size, In Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.01, p. 237-259, 1999.
- 13 J.H. Woodhead, G. Krauss, S.K. Banerji, Fundamentals of Microalloyed Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, pp. 3–17, 1986.