

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA LIGA AA7004 NO PROCESSO DE TIXOCONFORMAÇÃO

Torres, Luis Vanderlei, torres@fem.unicamp.br¹
Zoqui, Eugênio José, zoqui@fem.unicamp.br¹

¹Departamento de Engenharia de Fabricação, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Caixa Postal 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brasil.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização da liga AA7004 no processo de tixoconformação abrangendo a caracterização micro e macroestrutural como também a caracterização do comportamento viscoso. A liga foi submetida a tratamentos térmicos de globularização pelos tempos de 0s, 30s, 90s e 210s, para duas condições de frações sólidas, 45% e 60%; e ensaios de viscosidade sob as mesmas condições. Os tratamentos térmicos promovem a globularização das partículas de fase primária, de forma que os melhores resultados de viscosidade foram alcançados para a liga submetida ao tempo de 210s e com baixa fração sólida. A liga apresentou resultados de viscosidade aparente na faixa de 10^4 a 10^6 (Pa.s). Segundo a literatura materiais que se encontram nesta faixa de viscosidade possuem o comportamento similar ao do vidro fundido e demonstram alta conformabilidade, mostrando que esta liga se torna viável ao processo de tixoconformação, consequentemente sendo muito atrativo para a indústria automobilística, principalmente na produção de partes near-net-shape (componentes próximos à forma final).

Palavras-chave: tixoconformação, semi-sólido, AA7004

1. INTRODUÇÃO

Na última década, a eficiente indústria automobilista tem se mostrado como a principal patrocinadora para o desenvolvimento de novos processos para produção de peças com materiais no estado semi-sólido. A utilização de alumínio nos automóveis, primariamente sob a forma de fundido, aumentou drasticamente devido à necessidade de se produzir partes com alta resistência mecânica, baixo peso e alta confiabilidade. Contudo, o desenvolvimento da tecnologia de produção de peças com materiais semi-sólidos torna-se importante (Figueredo, 2001; Atkinson, 2005). Além disso, a produção de partes near-net-shape (componentes próximos à forma final), busca a economia de energia, a redução de etapas de produção, os aumentos da produtividade e da qualidade em geral (Garat, Maenner, Sztur, 2000; Young, Eisen, 2000; Atkinson, 2005). Desta forma tem-se aplicações na indústria militar, aeronáutica e maciçamente na indústria automobilística. Na Europa, já estão sendo produzidas peças como componentes de suspensão, suportes para motores e tubulação para injeção de combustível (Alfa Romeo, Fiat, entre outras). Nos Estados Unidos, a produção inclui ainda componentes mecânicos para bicicletas e veículos de neve, na Ásia há uma concentração na produção de eletrônicos como cases para computadores portáteis e componentes para rede elétrica, (Garat, Maenner, Sztur, 2000; Young, Eisen, 2000). Diante disto, este trabalho tem como objetivo geral contribuir com o desenvolvimento do campo da conformação semi-sólida, ou tixoconformação, analisando com mais profundidade a liga de alumínio AA7004 em termos de caracterização micro e macroestrutural e comportamento viscoso no estado semi-sólido para diferentes condições de reaquecimento em termos de tempo e temperatura de tratamento.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga de alumínio escolhida para o desenvolvimento deste trabalho foi a liga comercial AA7004, produzida por lingotamento contínuo convencional. Sua composição química está listada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química conforme fabricante.

Liga	Composição química (wt% peso)						
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Al
AA7004	5,8	1,5	0,1	0,4	0,3	0,5	balanço

Foi realizado um tratamento térmico de solubilização na liga em um forno tipo mufla, após o forno alcançar a temperatura requerida, a liga foi inserida em seu interior e aquecida até a temperatura relativa ao seu tratamento (465°C), mantida por 2 horas e depois resfriada em água.

Após o tratamento de solubilização foi realizada a caracterização das temperaturas de trabalho via ensaios de DSC e *software* Thermo-Calc[®]. Determinando o intervalo de temperatura entre as linhas *solidus* e *liquidus*, zona onde a liga se apresenta em equilíbrio entre as fases sólida e líquida.

O ensaio de DSC mede a diferença de energia necessária à amostra em estudo e a um material de referência, inerte de modo térmico, enquanto ambos são submetidos a uma variação controlada de temperatura, de maneira que a amostra e a amostra de referência sejam mantidas em condições isotérmicas, uma em relação à outra, independente do evento térmico que esteja ocorrendo na amostra. Pode ser definido como uma técnica que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo (Mothé, Azevedo, 2002). Nos ensaios via DSC foi utilizado um equipamento de análise térmica NETZSCH modelo STA 409C, utilizando uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto até 700°C e resfriamento até temperatura ambiente com taxa de resfriamento análoga. A partir dos ensaios de DSC é possível construir uma curva da fração líquida *versus* temperatura.

Nas simulações com o *software* Thermo-Calc[®], foram utilizadas as composições ideais da liga, excluindo-se, portanto, quaisquer inclusões ou elementos residuais, como saída do programa, obtêm-se as curvas de temperatura *versus* fração sólida. Nestas simulações, o *software* empregou uma rotina de cálculos avaliando condições de solidificação dentro e fora do equilíbrio. A partir das simulações é possível construir uma curva da fração líquida *versus* temperatura.

Os tratamentos térmicos de globularização foram realizados em um forno resistivo utilizando amostras com 15mm de altura por 20mm de diâmetro e com furo de 1,6mm de diâmetro na metade de sua altura, aonde foi inserido um termopar *Kromel Alumel* para acompanhamento e aquisição de temperatura durante o ensaio. Após o forno alcançar a temperatura requerida, as amostras foram inseridas sendo reaquecidas até as temperaturas relativas à fração sólida de 45% e 60% e mantidas por tempos de 0s, 30s, 90s e 210s e depois resfriadas em água. Após os tratamentos térmicos, as amostras foram submetidas à preparação metalográfica para caracterização micro e macroestrutural.

Na caracterização microestrutural as amostras depois de lixadas e polidas foram atacadas com reagente *Keller* (2,5ml HNO₃, 1,5ml HCl, 1ml HF e 95ml H₂O) por um tempo de 10s. Para a aquisição de imagens foi utilizado um microscópio óptico Leica DM ILM. Para as medições do tamanho das partículas primárias empregou-se o Método dos Interceptos de *Heyn*, regido pela norma ASTM E112 (1996). O valor do fator de forma da liga foi estimado com o auxílio do *software* ImageJ 1.40g.

Para a caracterização macroestrutural (metalografia colorida) as mesmas amostras empregadas na caracterização microestrutural sofreram um ataque eletrolítico de HBF₄ (ácido fluorbórico) em solução 6,0% e tensão de 20V por aproximadamente 90s sob agitação moderada e constante. As amostras foram analisadas no mesmo microscópio porém, utilizando filtros polarizadores para a obtenção de imagens coloridas, fazendo com que grãos com a mesma orientação cristalina apresentem coloração semelhante, o que torna mais fácil sua identificação. A contagem de grãos foi realizada em cinco diferentes campos de cada micrografia, sendo que para cada amostra empregou-se cinco imagens de diferentes seções desta. Totalizando, portanto, vinte e cinco contagens de grãos para cada amostra. Também foi utilizado o *software* ImageJ 1.40g com a mesma finalidade. Este processo foi empregado de maneira idêntica para as micrografias.

Para a avaliação da viscosidade aparente foram realizados ensaios de compressão a quente, fundamentados no trabalho de Laxmanan e Flemings (1980). A escolha deste método de caracterização deve-se à extrema facilidade operacional e capacidade de gerar excelentes resultados comparativos. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios MTS, modelo 810, (capacidade de carga de 10.000kgf), com um forno resistivo acoplado ao eixo da máquina, (temperatura máxima de trabalho de 1200°C), utilizando-se placas paralelas de Inconel 718 que possuíam área superior a área máxima ocupada pelas amostras deformadas, mantendo assim o volume deformado constante. As dimensões dos corpos de prova utilizados foram as mesmas empregadas no tratamento térmico de globularização, submetidas a uma taxa de compressão constante de 10mm/s e tempo de execução de ensaio de 1s. Os testes de compressão a quente foram realizados nas mesmas condições de tempo e temperatura utilizados na caracterização da evolução morfológica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização da Temperatura de Trabalho

A determinação do intervalo de temperatura entre as linhas *solidus* e *liquidus*, é essencial para a determinação dos parâmetros do processo de conformação, isto é, obtenção da pasta semi-sólida com estrutura globular utilizada como material de partida nos processos de tixoconformação.

Esta etapa do trabalho visou a caracterização da temperatura *solidus*, temperatura *liquidus* e temperaturas de trabalho a serem empregadas no tratamento térmico de globularização e nos ensaios de compressão a quente. Neste trabalho optou-se por dois métodos dos mais empregados na literatura, determinação da transformação sólido-líquido via DSC e via simulação *software* Thermo-Calc[®].

A curva originária do ensaio de DSC para a liga AA7004 pode ser vista na Fig. (1). Ao analisar a curva gerada pelo ensaio de DSC para a liga AA7004, pode-se notar a ocorrência de apenas um pico endotérmico. Esse pico corresponde à fusão da liga, ocorrendo entre as temperaturas de 603°C (temperatura *solidus* e início do pico endotérmico) a 660°C (temperatura *liquidus* e final do pico endotérmico). Neste caso, como não há cobre ou outro elemento em quantidade

suficiente para estabelecer grande quantidade de compostos intermetálicos, só há a existência do fenômeno de fusão. A caracterização das frações sólidas ocorre nesse intervalo de temperatura, através da integração de área sob o pico endotérmico e seu resultado pode ser visto na Fig. (2).

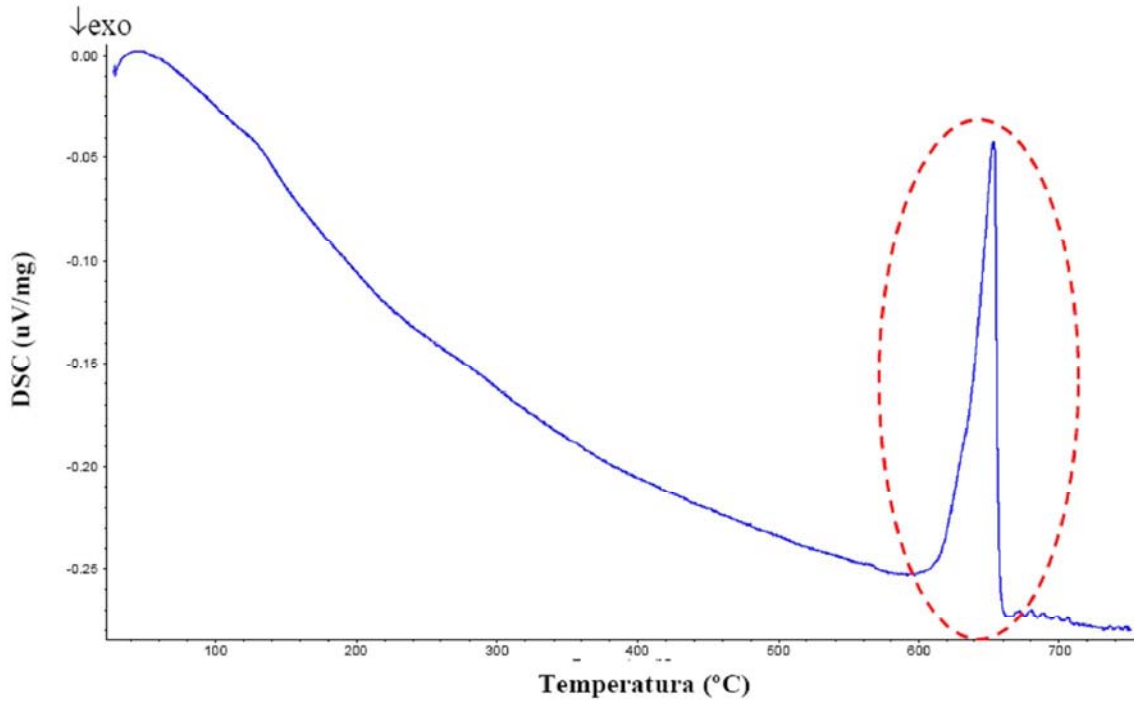


Figura 1. Curva originária do ensaio de DSC da liga AA7004.

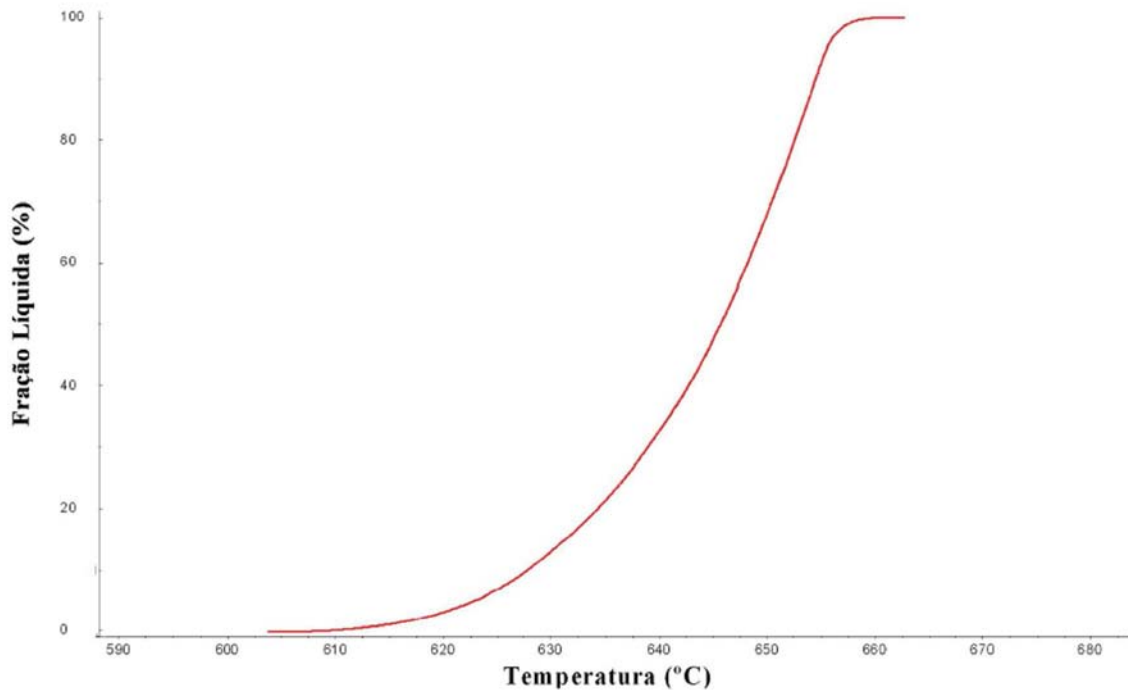


Figura 2. Curva da fração líquida *versus* temperatura, obtida via ensaio de DSC.

Nas simulações com o *software* Thermo-Calc[®] com os dados gerados obtêm-se a curva de fração líquida *versus* temperatura, partindo-se da composição da liga, como pode ser visto na Fig. (3).

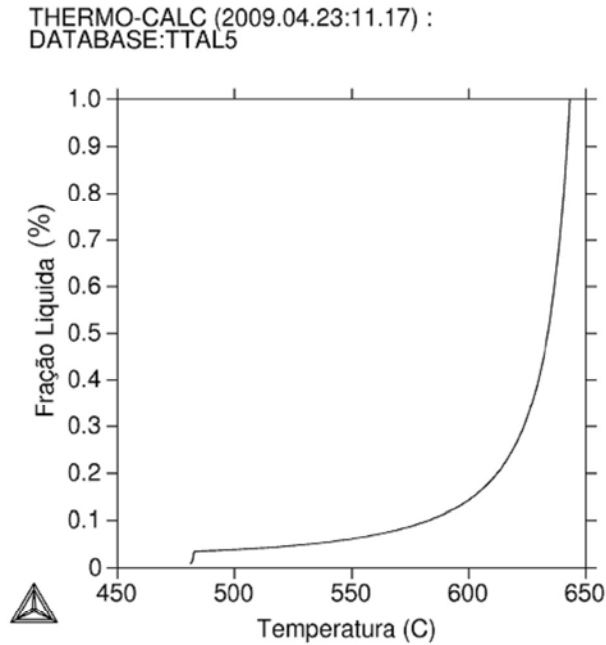


Figura 3. Curva da fração líquida versus temperatura estimada pelo software Thermo-Calc®.

A Tabela (2) sintetiza todas as temperaturas de trabalho encontradas para cada um dos métodos de caracterização da transformação sólido-líquido realizados neste trabalho.

Tabela 2. Sumário das temperaturas de trabalho encontradas para cada um dos métodos de caracterização da transformação sólido-líquido.

Liga	Temperatura (°C) p/ fs=45%		Temperatura (°C) p/ fs=60%	
	DSC	Thermo-Calc®	DSC	Thermo-Calc®
AA7004	646	637	641	631

Pode-se verificar que cada uma das caracterizações forneceu temperaturas diferentes para as frações sólidas de 45% e 60%. Os ensaios de DSC apresentaram temperaturas superiores às encontradas para as simulações através do software Thermo-Calc®, chegando à uma diferença de 10 graus para a condição de 60% de fração sólida.

Todas as temperaturas encontradas para todas as situações foram testadas no tratamento térmico de globularização, com a intenção de se determinar quais seriam as melhores temperaturas para a liga; utilizando as temperaturas obtidas através das simulações do software Thermo-Calc® as amostras permaneceram completamente sólidas durante os ensaios prévios do tratamento térmico de globularização, causando sua exclusão automática. Utilizando as temperaturas obtidas através dos ensaios de DSC, as amostras apresentaram um comportamento coerente durante os testes, sendo então adotadas como temperaturas de trabalho para as condições de ensaio estipuladas neste trabalho. Um fato a ser observado foi que os ensaios de DSC mesmo apresentando temperaturas superiores aos das simulações do software Thermo-Calc®, mostraram-se compatíveis. Diante disto, conclui-se, que para esta liga pertencente a série AA7XXX a princípio a caracterização via DSC parece ser a mais precisa.

3.2. Caracterização Micro e Macroestrutural

De posse das temperaturas correspondentes às frações sólidas de 45% e 60%, deu-se início a execução dos tratamentos térmicos de globularização para os tempos de 0s, 30s, 90s e 210s com o objetivo de se avaliar a evolução morfológica da fase primária. A caracterização estrutural, (por metalografia convencional aqui chamada de micro e a metalografia colorida aqui chamada de macro), compreende a caracterização da estrutura da liga fundida (como recebida); fundida-solubilizada e tratadas termicamente para 45% e 60% de fração para tempos de 0s, 30s, 90s e 210s, perfazendo-se a contagem de tamanho da fase primária ou tamanho de glóbulo, tamanho de grão, determinação do fator de forma e cálculos de *RQI*. Zoqui (2001) desenvolveu um ferramenta de trabalho, o *Rheocast Quality Index (RQI)*, que correlaciona parâmetros morfológicos com parâmetros macro e microestruturais, permitindo assim analisar a eficiência do método de obtenção da matéria prima, utilizando a Eq. (1):

$$RQI = \left(\frac{GLS}{GS} \right) SF \quad (1)$$

Onde GLS é o tamanho da partícula primária, GS é o tamanho de grão na macroestrutura e SF é o fator de forma na microestrutura. Estes valores de RQI , indicam o quanto o tamanho de grão é igual ao tamanho de glóbulo, implicando assim em uma estrutura menos complexa e mais globular.

No que diz respeito à caracterização da microestrutura da liga AA7004 fundida, nota-se que ela possui uma microestrutura tipicamente em forma de roseta, já na condição fundida-solubilizada pode-se observar que o tratamento térmico de solubilização não causou modificações significativas no que diz respeito a morfologia da estrutura, permanecendo com uma microestrutura em forma de roseta, como pode ser visto na Fig. (4). O tratamento de solubilização teve como efeito principal a diminuição de tensões residuais nas amostras possibilitando as operações de usinagem dos corpos de prova, pois sem o tratamento o material se tornava quebradiço em plena operação de usinagem. O tratamento de solubilização foi imprescindível para melhorar a trabalhabilidade a frio do material. Pode-se notar, que houve uma maior definição do contorno dendrítico da liga estudada. Nota-se ainda a presença extensa de particulados não dissolvidos completamente após o tratamento.

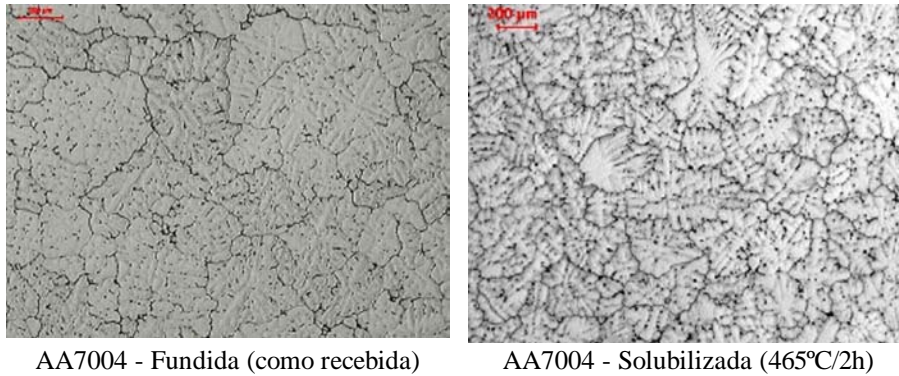


Figura 4. Micrografias da liga fundida (como recebida) e da correspondente solubilização. Aumento: 50x.

Nas Figuras (5) e (6) são apresentadas as micrografias da liga AA7004 tratada para 45% e 60% de fração sólida nos tempos de 0s, 30s, 90s e 210s, respectivamente. Analisando-se qualitativamente as microestruturas da liga AA7004, pode-se notar que os glóbulos primários mesmo para o tempo de tratamento térmico de 0s apresenta-se com grande esfericidade, ocorrendo também o aumento no tamanho destes glóbulos primários durante a manutenção do material à faixa semi-sólida para o tempo de 210s de tratamento, como esperado.

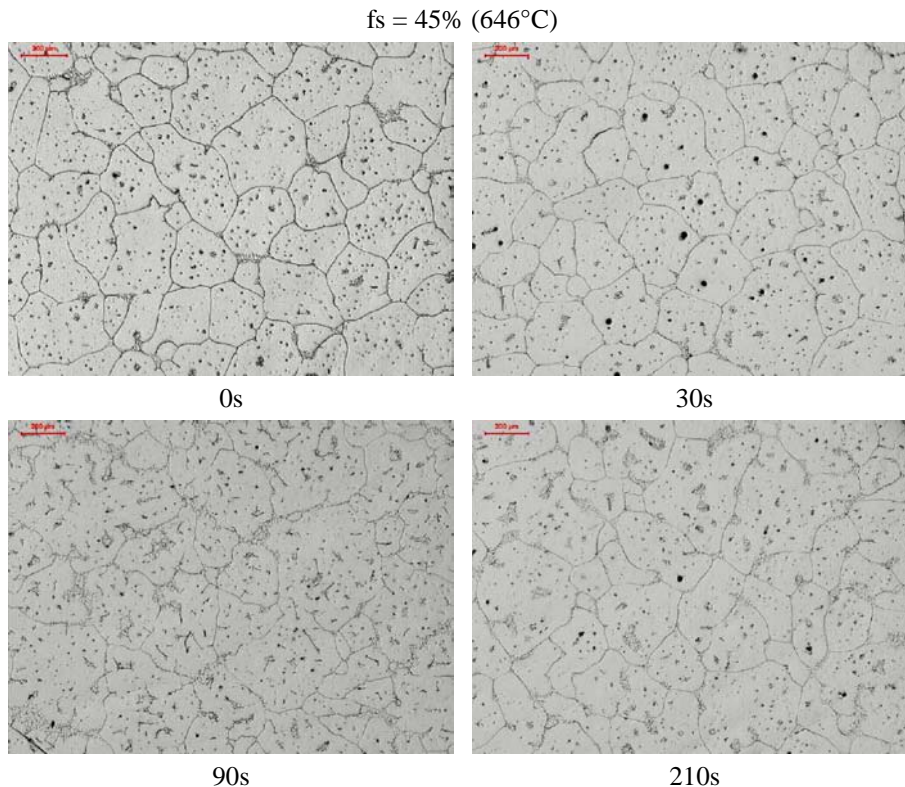


Figura 5. Micrografias da liga AA7004 tratada termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s e 210s. Aumento: 50x.

fs = 60% (641°C)

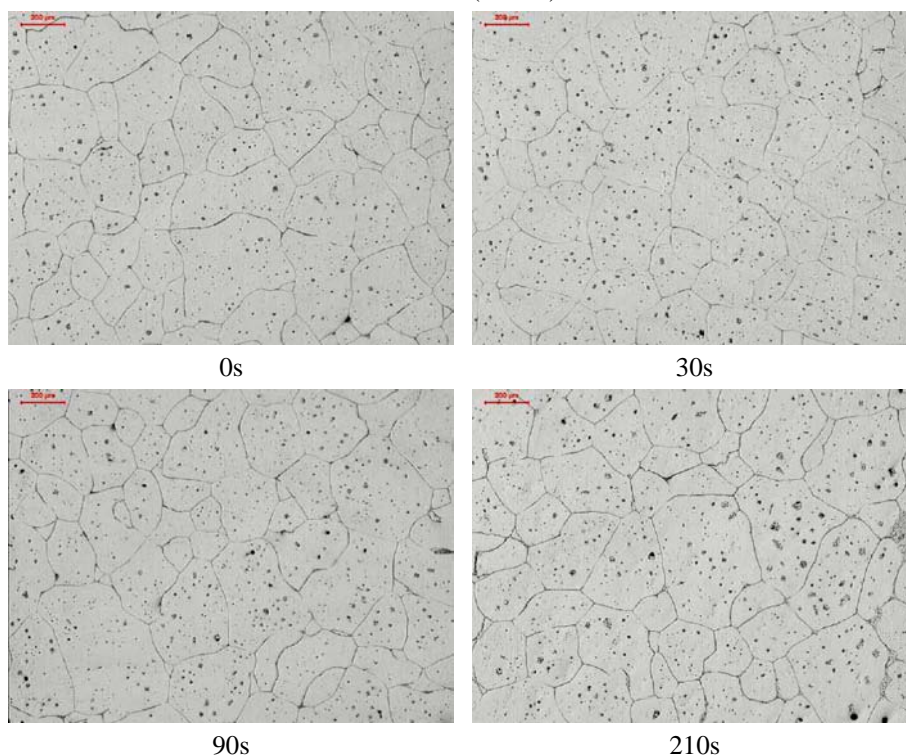


Figura 6. Micrografias da liga AA7004 tratada termicamente para 60% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s e 210s. Aumento: 50x.

A Tabela (3) apresenta o tamanho médio dos glóbulos primários para a liga, desde o tempo de tratamento de 0s até o tempo de 210s. A maior fração sólida, 60%, proporciona maiores tamanhos de glóbulos primários em relação à fração sólida de 45% devido aos fenômenos de coalescência, que são altamente favorecidos por maiores frações sólidas, uma vez que existe maior contato entre as partículas sólidas. Nota-se que não há alteração morfológica entre as amostras fundida e fundida-solubilizada, indicando que o tratamento de solubilização obteve bons resultados, não havendo mudança na estrutura do material. No que diz respeito ao fator de forma, também é evidenciado o aumento da circularidade quando possuem uma maior quantidade de fração sólida.

Tabela 3. Valores de tamanho médio de glóbulo primário, do tamanho de grão, do fator de forma e do RQI para cada condição de ensaio proposta.

Liga	Fração sólida (%)	Tempo de tratamento (s)	Tamanho de glóbulo primário (μm)	Tamanho de grão (μm)	Fator de forma (SF)	RQI
AA7004	Fundida		186 ± 22	279 ± 54	$0,12 \pm 0,06$	0,08
	Fundida-solubilizada		186 ± 22	280 ± 50	$0,14 \pm 0,06$	0,09
	45	0	167 ± 26	285 ± 59	$0,24 \pm 0,11$	0,14
		30	186 ± 27	291 ± 45	$0,28 \pm 0,13$	0,18
		90	187 ± 29	296 ± 63	$0,29 \pm 0,17$	0,18
		210	189 ± 18	307 ± 60	$0,29 \pm 0,19$	0,18
	60	0	172 ± 19	270 ± 55	$0,26 \pm 0,13$	0,17
		30	179 ± 22	283 ± 60	$0,32 \pm 0,14$	0,20
		90	203 ± 22	291 ± 50	$0,34 \pm 0,15$	0,24
		210	212 ± 19	293 ± 77	$0,34 \pm 0,16$	0,25

A partir da Tab. (3), observa-se que a liga com fração sólida de 60% obteve melhor desempenho em relação ao RQI, isto se deve ao fato de que a maior fração sólida proporciona maior interação entre os grãos em relação à fração sólida de 45%, favorecendo os fenômenos de coalescência. Outro fato observado, mostra que os tamanhos de grãos das condições de fundida (como recebida) e fundida-solubilizada da liga AA7004 permaneceram idênticos. A seguir são apresentadas as estruturas sob luz polarizada, meio mais eficiente para se determinar os tamanhos de grãos

(macrografia). De acordo com conceitos metalúrgicos, cada grão se difere de outro devido à diferentes orientações cristalográficas, assim, sob luz polarizada, grãos diferentes apresentam colorações diferentes. Este fenômeno facilita a diferenciação de grãos vizinhos que podem ser equivocadamente confundidos com entidades separadas na micrografia convencional.

A Figura (7) apresenta as macrografias da liga AA7004 fundida (como recebida) e fundida-solubilizada. Como observado para a microestrutura da condição fundida o que se nota é uma macroestrutura em forma de roseta grosseira. Após o tratamento térmico de solubilização, a liga AA7004 não sofreu modificação morfológica no que diz respeito ao seu formato, permanecendo com uma macroestrutura em forma de roseta grosseira.

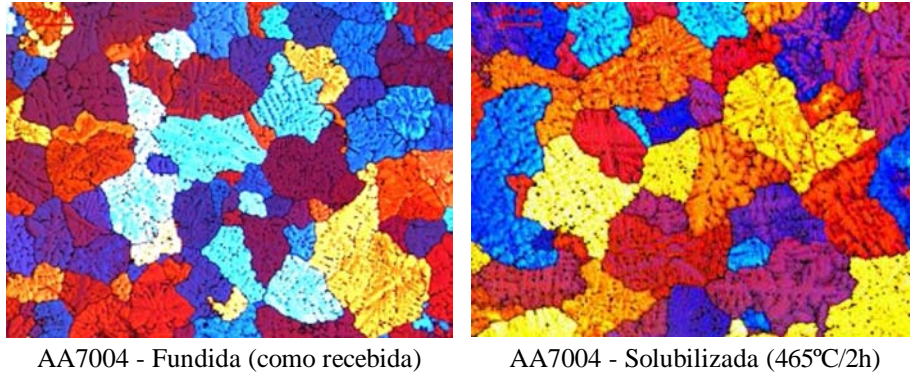


Figura 7: Macrografias da liga fundida (como recebida) e da correspondente solubilização. Aumento: 50x.

As Figuras (8) e (9) mostram a evolução morfológica da liga AA7004 durante o reaquecimento ao estado semi-sólido. Qualitativamente se apresenta com grãos esferiodizados, desde o tempo de tratamento térmico de 0s, ou seja, somente devido ao reaquecimento, há um ligeiro aumento no tamanho dos grãos durante a evolução morfológica até o tempo de 210s de tratamento. Lembrando sempre que para a análise da micro e macroestrutura é feita uma contagem média dos grãos em diversas imagens, podendo haver uma pequena diferença entre as frações, como ocorrido para a fração sólida de 45% com tempo de 30s em comparação com a fração sólida de 60% para o mesmo tempo. As macroestruturas apresentaram boa homogeneidade em relação aos grãos, não havendo grandes diferenças entre os resultados obtidos para a liga tratada a 45% e 60% de fração sólida e tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s, 210s. Neste caso a menor diferença de temperatura entre ambos os ensaios, apenas 5°C, pode explicar esta pequena variação.

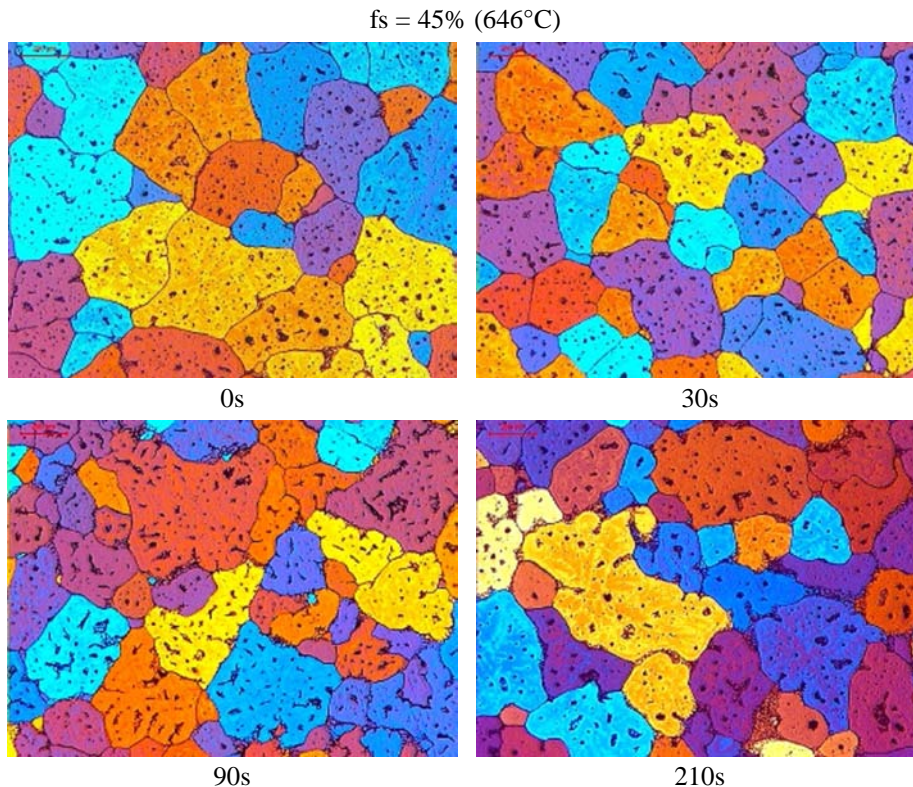


Figura 8. Macrografias da liga AA7004 tratada termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s e 210s. Aumento: 50x.

fs = 60% (641°C)

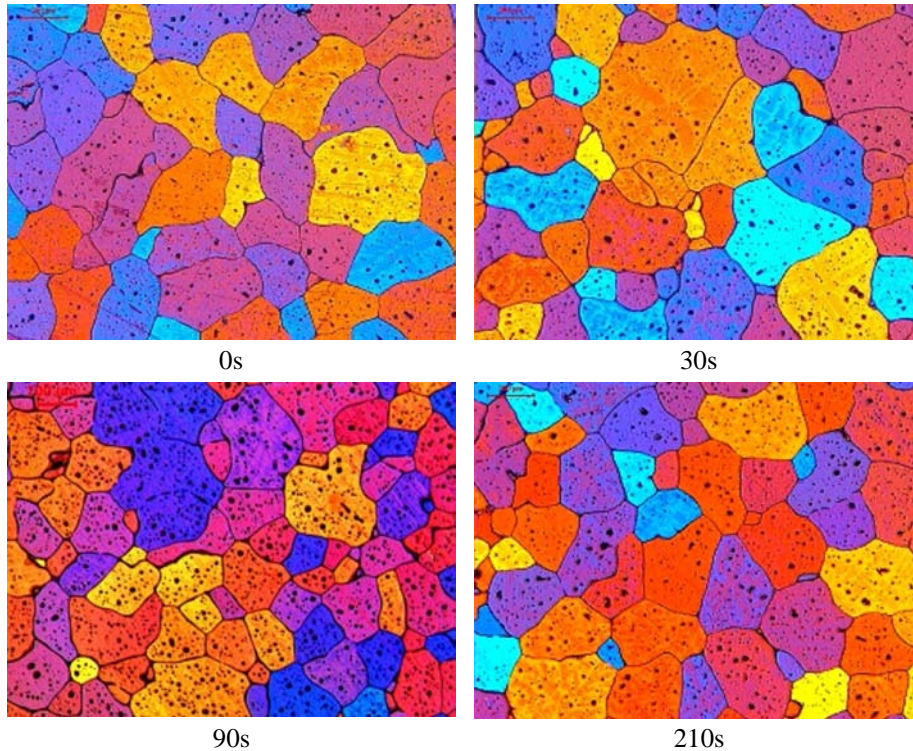


Figura 9. Macrografias da liga AA7004 tratada termicamente para 60% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s e 210s. Aumento: 50x.

Desta forma tem-se que para uma análise precisa da tixoconformabilidade de ligas metálicas, além da caracterização em termos de microestrutura, há a necessidade de uma caracterização macroestrutural das mesmas, tendo em vista que ambas as práticas expõem ópticas diferentes e complementares na direção de um melhor entendimento acerca destes processos.

Enfim, tem-se que a liga apresenta valores médios de *RQI* e morfologia propícias principalmente ao processo de tixoforjamento. Porém, esse fato não quer dizer que essas estruturas obtidas serão propícias para seu emprego como pasta semi-sólida. Para confirmar se realmente essas ligas poderão ser utilizadas como pastas semi-sólidas, realizou-se o ensaio de avaliação da viscosidade, cujos resultados serão apresentados e discutidos a seguir.

3.3. Caracterização do Comportamento Reológico

A caracterização da viscosidade de materiais no estado semi-sólido é essencial para entender o seu comportamento reológico quando estes são submetidos a tensões de compressão, base de todos os processos de tixoconformação. Spencer (1972), a partir de ensaios de viscosidade, demonstrou excelentes vantagens de se trabalhar com o material neste estado. Vale ressaltar que a velocidade de compressão utilizada foi de 10mm/s, visando simular o comportamento mais próximo às situações práticas de tixoforjamento e tixo-injeção. Os dados de força e deslocamento gerados pelo *software* da máquina, nos possibilita obter a curva força (*F*) versus deformação (*H*), e, conseqüentemente determinar a curva viscosidade aparente (μ) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) utilizando as Eqs. (2) e (3) (Lashkari, 2007).

$$\mu = \left(\frac{8\pi F}{3V^2} \right) \left(\frac{1}{H^4} - \frac{1}{H_0^4} \right)^{-1} t \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = - \left(\sqrt{\frac{V}{\pi}} \right) \left(\frac{\delta H / \delta t}{2H^{2.5}} \right) \quad (3)$$

Onde μ é a viscosidade aparente (Pa.s), *F* é a força (N) no tempo *t* (s), *V* é o volume do corpo de prova (m³), o qual é considerado constante, *H* é a altura instantânea (m) e *H*₀ a altura inicial (m).

A Figura (10) apresenta as curvas de viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento da liga tratada termicamente para as frações sólidas de 45% e 60% para os tempos de tratamento de 0s, 30s, 90s e 210s, respectivamente.

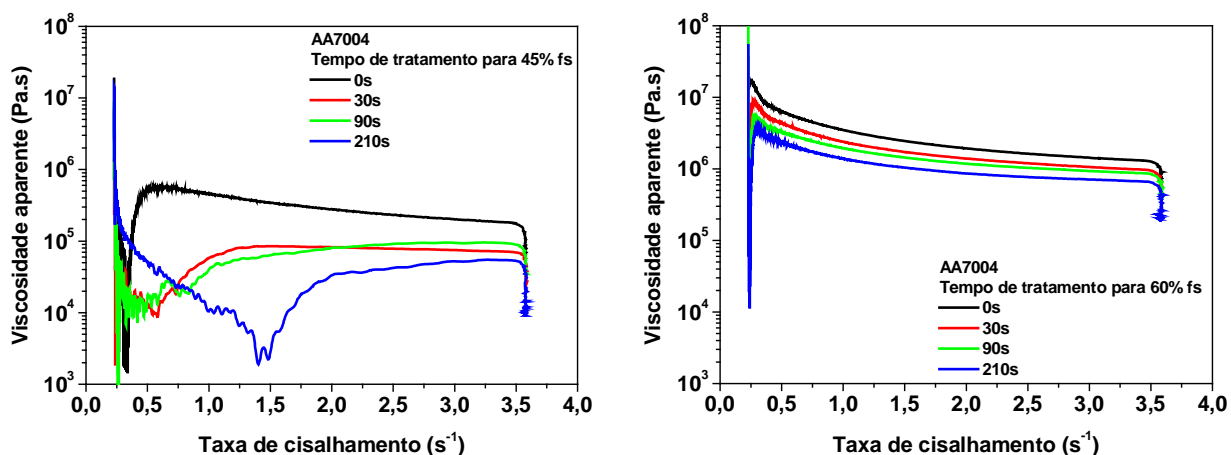


Figura 10. Curvas da viscosidade aparente *versus* taxa de cisalhamento da liga tratada termicamente para 45% e 60% fração sólida nos tempos de 0s, 30s, 90s e 210s.

Nota-se, que os tempos de tratamento térmico parecem ser determinantes para a avaliação do comportamento sob compressão destas ligas, de forma que há uma queda nos valores de tensão conforme se pronuncia a evolução morfológica, diminuindo gradativamente desde o tempo de 0s até o tempo de 210s. Tal fato acontece devido, aos maiores tempos de tratamento térmico que implicam em estruturas com maior caráter globular, o que se traduz em um melhor escoamento.

A liga com 60% de fração sólida apresenta valores de viscosidade superiores à liga com fração sólida de 45%, isso se explica pela maior presença de fase sólida na estrutura das ligas e, conseqüentemente, maior resistência ao escoamento, já que a deformação da fase sólida demanda maior energia. A existência dos picos iniciais, presente em todas as curvas, todos ocorrendo logo no início da compressão indicam o comportamento tixotrópico do material, trata-se de uma resistência inicial que o material apresenta devido a uma rede tridimensional de partículas sólidas globulares que se constrói por todo o material, a partir da qual o semi-sólido suporta seu próprio peso e pode ser manuseado com um sólido (Atkinson, 2005).

A Tabela (4) apresenta os valores da viscosidade média (μ) medidos a $2,0s^{-1}$ da taxa de cisalhamento. Verifica-se, que a maior parte dos valores da viscosidade aparente se estabeleceram entre a 10^4 a 10^6 (Pa.s) e segundo Flemings (1991), materiais que se encontram nesta faixa de viscosidade possuem o comportamento similar ao do vidro fundido e demonstram alta conformabilidade.

Tabela 4. Valores da viscosidade aparente média para cada condição de ensaio proposta.

Liga	Fração sólida (%)	Tempo de tratamento (s)	Viscosidade aparente média (Pa.s)
AA7004	45	0	$4,6 \times 10^5$
		30	$5,8 \times 10^4$
		90	$4,0 \times 10^4$
		210	$1,1 \times 10^4$
	60	0	$3,5 \times 10^6$
		30	$2,4 \times 10^6$
		90	$1,9 \times 10^6$
		210	$1,4 \times 10^6$

4. CONCLUSÕES

Com relação aos resultados obtidos, sejam eles referentes, à micro e macroestrutura ou ao ensaio de compressão, conclui-se que a liga AA7004 pode ser indicada para o processo de tixoconformação, devido aos baixos valores de viscosidade aparente média, principalmente para a condição de 45% de fração sólida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao auxílio das agências patrocinadoras FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Projetos 2008/03946-4 e 2009/08478-1), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Projeto 470081/2006-6) e CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e a empresa ALCOA Ltda que gentilmente cedeu a liga para este trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM., 1996, American Society for Testing and Materials, "E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", West Conshohocken, 26p.
- Atkinson, H.V., 2005, "Modeling the Semi-solid Processing of Metallic Alloys", Progress in Materials Science, Vol. 50, pp. 341-412.
- Figueredo, A., 2001, "Science and Technology of Semi-solid Metal Processing", Worcester Polytechnic Institute Worcester, MA, USA.
- Flemings, M.C., Riek, R.G., Young, K.P., 1976, "Rheocasting Processes", AFS International Cast Metals Journal, Vol. 1, pp. 11-22.
- Flemings, M.C., 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State", Metallurgical Transactions A, Vol. 22A, pp. 957-981.
- Garat, M., Maenner, L., Sztur, C.H., 2000, "State of the Art of Thixocasting", Proceedings of the 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Turin, Italy, pp. 187-194.
- Laxmanan, V., Flemings, M.C., 1980, "Deformation of Semi-solid Sn-15%Pb Alloy", Metallurgical Transactions A, Vol. 11A, pp. 1927-1937.
- Spencer, D. B., Mehrabian, R., Flemings, M.C., 1972, "Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallization Range", Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp. 1925-1932.
- Young, K., Eisen, P., 2000, "SSM (Semi-solid metal) Technological Alternatives for Different Applications", Proceedings of the 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Turin, Italy, pp. 97-102.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY THE UTILIZATION OF AA7004 ALLOY IN THE PROCESS THIXOFORMING

Torres, Luis Vanderlei, torres@fem.unicamp.br¹
Zoqui, Eugênio José, zoqui@fem.unicamp.br¹

¹Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, UNICAMP, PO Box: 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brazil

Abstract: *The goal of this work was to evaluate the utilization of AA7004 alloy in the thixofforming process, including the characterization in terms of micro and macrostructures and characterization of the rheological behavior. The alloys were submitted to re-heating treatment for 0s, 30s, 90s and 210s in two conditions of solid fraction, 45% and 60%; had been realized tests of viscosity under the same conditions. Re-heating treatment times promote the solid phase particles globularization, from that the best results of viscosity been reached for alloys treated during 210s and with low solid fraction. AA7004 alloy presented resulted of apparent viscosity of 10^4 a 10^6 (Pa.s). Literature according to materials that if find in this index of viscosity possess the similar behavior the casting glass and demonstrate high conformability, showing that this alloy if becomes viable the process thixofforming, consequently being very attractive for the automobile industry, mainly in the production of parts near-net-shape (component next to the final form).*

Keywords: *thixofforming, semi-solid, AA7004.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.