

## CARACTERIZAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE DA LIGA AA7075 UTILIZADA NO PROCESSO DE TIXOCONFORMAÇÃO<sup>1</sup>

Luis Vanderlei Torres<sup>2</sup>  
Eugênio José Zoqui<sup>3</sup>

### Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização da liga AA7075 no processo de tixoconformação abrangendo a caracterização de seu comportamento viscoso. A liga foi submetida a ensaios de compressão a quente utilizando tempos de 0 s, 30 s, 90 s e 210 s, para duas condições de frações sólidas, 45% e 60% com o objetivo de se obter sua viscosidade aparente. Os melhores resultados de viscosidade foram alcançados para a liga submetida ao tempo de 210 s 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 à do vidro fundido e demonstram alta conformabilidade, mostrando que esta liga se torna viável ao processo de tixoconformação, conseqüentemente sendo muito atrativo para a indústria automobilística, principalmente na produção de partes *near-net-shape* (componentes próximos à forma final).

**Palavras-chave:** Semi-sólido; Tixoconformação; AA7075.

### CHARACTERIZATION OF THE APPARENT VISCOSITY OF AA7075 ALLOY USED IN THE PROCESS THIXOFORMING

### Abstract

The goal of this work was to evaluate the utilization of AA7075 alloy in the thixofforming process, including the characterization of the rheological behavior. The alloy were submitted to tests the compression re-heating for 0 s, 30 s, 90 s and 210 s in two conditions of solid fraction, 45% and 60% with the objective of getting apparent viscosity. The bests results of viscosity been reached for alloy treated during 210s and with low solid fraction. The 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).

**Key words:** Semi-solid; Thixofforming; AA7075.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Mestre e Doutorando em Engenharia Mecânica - Unicamp.

<sup>3</sup> Professor Doutor em Engenharia Mecânica - Unicamp.

## 1 INTRODUÇÃO

A conformação semi-sólida, ou tixoconformação, é o processamento de ligas metálicas no estado de coexistência de fase sólida e fase líquida. Estes materiais semi-sólidos apresentam características estruturais particulares. Diferente, portanto, dos processos convencionais de fundição e conformação, seja no aspecto de processamento como no aspecto morfológico.<sup>(1,2)</sup>

O processo de tixoconformação apresenta-se como alternativa aos processos convencionais como fundição e fundição sob pressão. Pode-se citar a economia de energia, a redução de etapas de produção, o aumento da produtividade e da qualidade em geral, pois o produto final apresenta alta homogeneidade estrutural, boas propriedades mecânicas, etc. Desta forma há aplicações na indústria militar, aeronáutica e maciçamente na indústria automobilística.<sup>(3-5)</sup>

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 AA7075 no que diz respeito ao seu comportamento viscoso no estado semi-sólido para diferentes condições de reaquecimento em termos de tempo e temperatura de tratamento.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi a liga comercial de alumínio AA7075, produzida por lingotamento contínuo convencional. Sua composição química é listada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química conforme fabricante.

Liga	Composição química (wt% peso)						
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Al
AA7075	6,2	2,0	1,7	0,5	0,4	0,1	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 a mesma foi aquecida até a temperatura relativa ao seu tratamento (480°C), mantida por 2 horas e depois resfriada em água.

### 2.2 Caracterização das Temperaturas de Trabalho

Após o tratamento de solubilização foi realizada a caracterização das temperaturas de trabalho via ensaios de DSC e *software* Thermo-Calc<sup>®</sup>. Determinando o intervalo de temperatura entre as linhas *solidus* e *liquidus*, zona onde a liga se apresenta em equilíbrio entre a fase sólida e líquida. 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. Nas simulações com o *software* Thermo-Calc<sup>®</sup>, foram utilizadas as composições ideais da liga, excluindo-se, portanto, quaisquer inclusões ou elementos residuais. Nestas simulações, o *software* empregou uma rotina de cálculos avaliando condições de solidificação dentro e fora do equilíbrio.

## 2.3 Caracterização da Viscosidade Aparente

Para a avaliação da viscosidade aparente foram realizados ensaios de compressão a quente, fundamentado no trabalho de Laxmanan e Flemings.<sup>(6)</sup> 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 10.000 kgf), com um forno resistivo acoplado ao eixo da máquina, (temperatura máxima de trabalho de 1.200°C). As dimensões dos corpos de prova utilizados foram amostras com 15 mm de altura por 20 mm de diâmetro e com furo de 1,6 mm de diâmetro na metade de sua altura, aonde foi inserido um termopar *Kromel Alumel* para acompanhamento e aquisição de temperatura durante o ensaio, e submetidas a uma taxa de compressão constante de 10 mm/s e tempo de execução de ensaio de 1 s. Após o forno alcançar a temperatura requerida, as amostras foram inseridas e reaquecidas até as temperaturas relativas à fração sólida de 45% e 60% e mantidas por tempos de 0 s, 30 s, 90 s e 210 s e logo em seguida comprimidas.

Os dados de saída da máquina ensaios foram força, deslocamento e tempo para cada instante do ensaio, realizado com uma taxa de aquisição de mil pontos por segundo. De posse destes dados, foi possível construir as curvas de tensão *versus* deformação e, conseqüentemente, as curvas de viscosidade aparente *versus* taxa de cisalhamento para cada liga em cada condição estudada.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Caracterização das Temperaturas de Trabalho

Esta etapa do trabalho visa à caracterização das temperaturas de trabalho a serem empregadas 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 simulação via *software* Thermo-Calc<sup>®</sup>. A curva originária do ensaio de DSC para a liga AA7075 pode se vista na Figura 1.

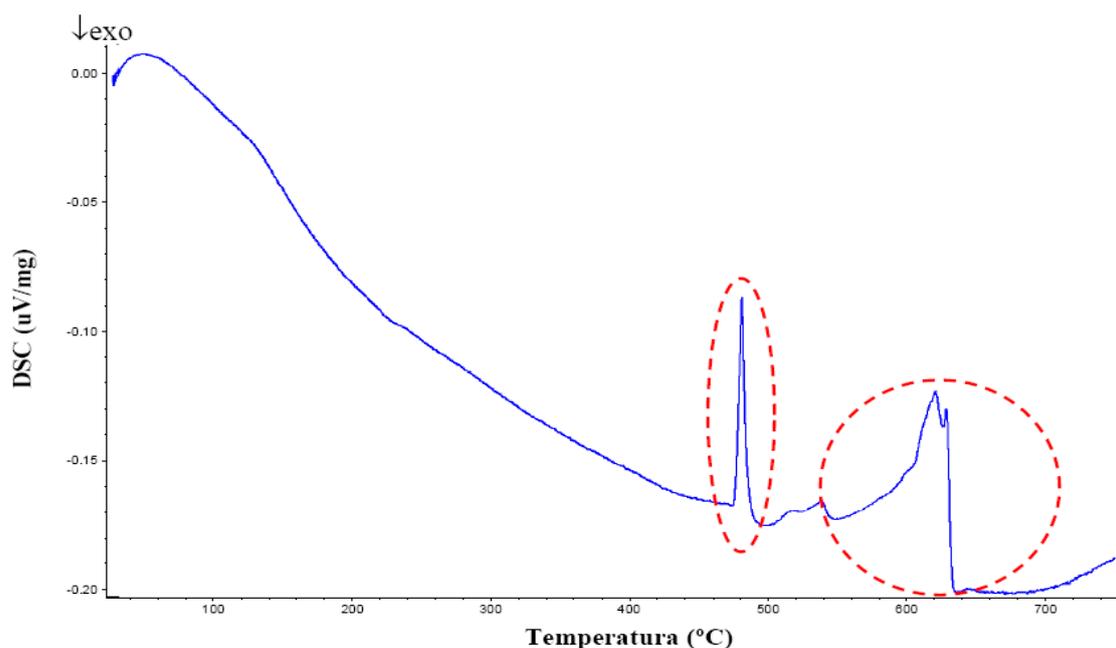
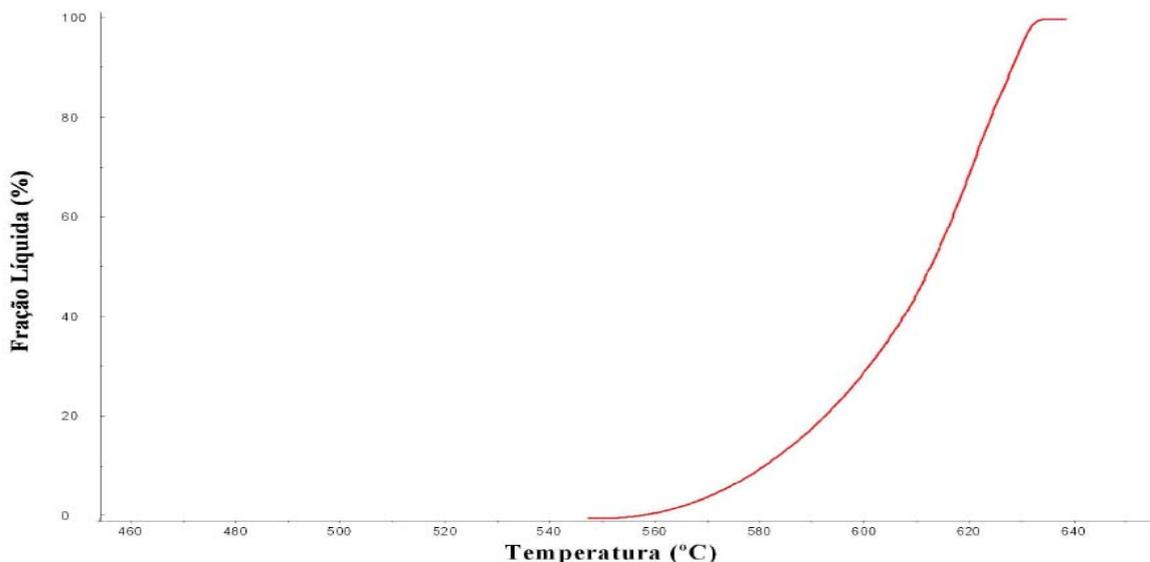


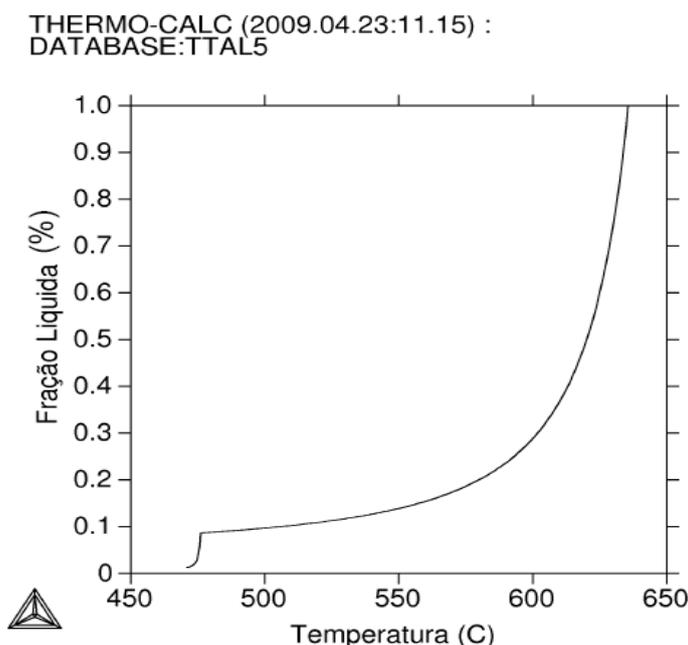
Figura 1. Curva originária do ensaio de DSC da liga AA7075.

Analisando a curva gerada pelo ensaio de DSC para a liga AA7075, pode-se notar a ocorrência de dois picos endotérmicos, o primeiro pico que ocorre entre as temperaturas de 470°C e 500°C, onde há a dissolução dos compostos de cobre,  $\text{CuAl}_3$ , e o segundo pico é o pico endotérmico de fusão ocorrendo entre as temperaturas de 548°C a 636°C. Considera-se a temperatura de 548°C (início do pico endotérmico) como correspondente à temperatura *solidus* e a temperatura de 636°C (final do pico endotérmico) como correspondente à temperatura *liquidus*. A caracterização das frações sólidas ocorre nesse intervalo de temperatura, através da integração de área sob o pico e seu resultado pode ser visto na Figura 2.



**Figura 2.** Curva de fração líquida *versus* temperatura, obtida via ensaio de DSC da liga AA7075.

Nas simulações com o *software* Thermo-Calc<sup>®</sup>, com os dados gerados obtêm-se à curva de fração líquida *versus* temperatura, partindo-se das composições de cada liga (Figura 3).



**Figura 3.** Curva da fração líquida *versus* temperatura estimada pelo *software* Thermo-Calc<sup>®</sup>.

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 p/ fs=45%		Temperatura p/ fs=60%	
	DSC	Thermo-Calc®	DSC	Thermo-Calc®
AA7075	615	620	607	610

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 inferiores às encontradas para as simulações através do *software* Thermo-Calc®. Todas as temperaturas encontradas para todas as situações foram testadas com a intenção de se determinar quais seriam as melhores temperaturas; utilizando as temperaturas obtidas através das simulações do *software* Thermo-Calc® as amostras se fundiram, causando sua exclusão, mas utilizando as temperaturas obtidas através dos ensaios via DSC, as amostras mostraram-se coerentes durante os testes sendo então adotadas como temperaturas de trabalho para as condições de ensaio estipuladas neste trabalho. Diante disto conclui-se que para esta liga pertencente à série AA7XXX a princípio a caracterização via DSC parece ser a mais precisa.

### 3.2 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. Vale ressaltar que a velocidade de compressão utilizada foi de 10 mm/s, visando simular o comportamento mais próximo às situações práticas de tixoforjamento e tixo-injeção. O estudo das tensões médias e tensões máximas da liga são de fundamental importância, dentre alguns motivos, podemos citar para o dimensionamento de ferramental para conformação destas, assim como dados de entrada para estudos de simulação numérica. Os gráficos de tensão *versus* deformação dos ensaios de compressão a quente são baseados de acordo com as Equações 1 e 2. Para todos os casos, considera-se como ponto de partida uma amostra cilíndrica de altura inicial ( $H_0$ ) e diâmetro inicial ( $D_0$ ). A deformação de engenharia ( $e$ ) num dado tempo ( $t$ ) em compressão, com altura instantânea ( $H$ ), é dada por:

$$e = 1 - \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad \text{(Equação 1)}$$

Assumindo que o volume, ( $V$ ), é constante durante todo o ensaio de compressão e que a amostra seja comprimida entre duas placas cuja área de superfície é maior que a maior área ocupada pelo material deformado, a tensão ( $\sigma$ ) num determinado tempo ( $t$ ) de ensaio será dada por:

$$\sigma = \frac{FH_0}{V} (1 - e) = \frac{FH}{V} \quad \text{(Equação 2)}$$

Na Equação 3 é caracterizada a viscosidade aparente do material, onde  $\mu$  é a viscosidade aparente (Pa.s),  $F$  é a força (N) no tempo  $t$  (s),  $V$  é o volume do corpo de

prova ( $m^3$ ), qual é considerado constante,  $H$  é a altura instantânea (m) e  $H_0$  a altura inicial (m).

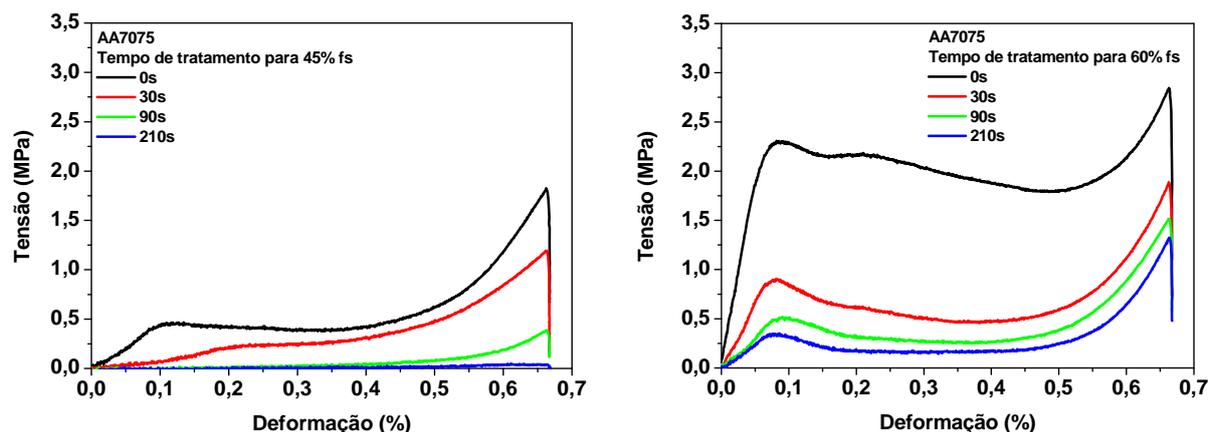
$$\mu = \left( \frac{8\pi F}{3V^2} \right) \left( \frac{1}{H^4} - \frac{1}{H_0^4} \right)^{-1} t \quad \text{(Equação 3)}$$

Além dos cálculos para a obtenção da viscosidade, Laxmanan e Flemings<sup>(6)</sup> propuseram uma maneira simplificada para se obter a taxa de cisalhamento média ( $\dot{\gamma}'_{AV}$ ), conforme indicada na Equação 4:

$$\dot{\gamma}'_{AV} = - \left( \sqrt{\frac{V}{\pi}} \right) \left( \frac{\delta H / \delta t}{2H^{2,5}} \right) \quad \text{(Equação 4)}$$

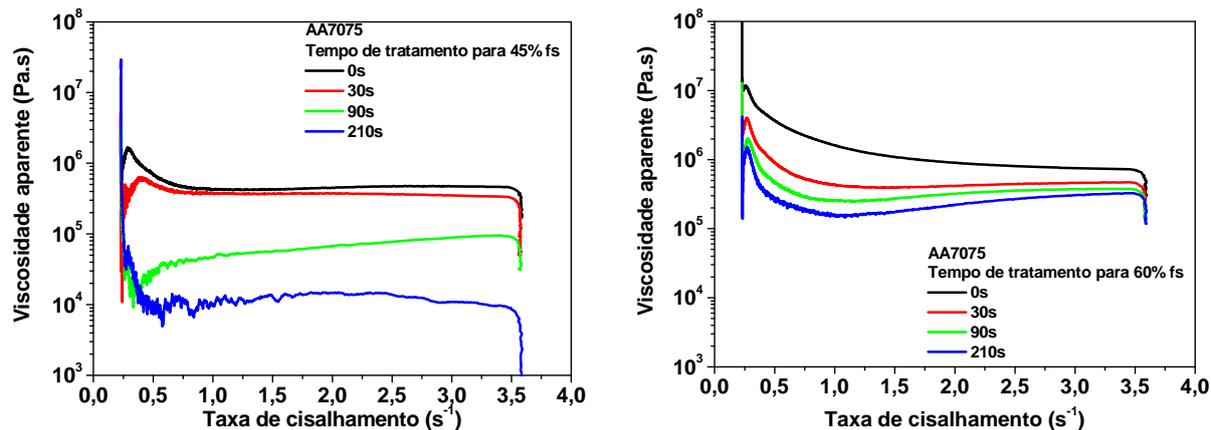
Com isso é possível obter a viscosidade em função do tempo, assim como a taxa média de cisalhamento. A caracterização de ambas visa estabelecer meios para analisar o comportamento não-newtoniano desta pasta, uma vez que o material semi-sólido não se comporta como um material newtoniano e sim como um fluido tixotrópico.

A Figura 4 apresenta as curvas de tensão *versus* deformação da liga reaquecida para as frações sólidas de 45% e 60% para os tempos de tratamento de 0 s, 30 s, 90 s e 210 s, respectivamente.



**Figura 4.** Curvas da tensão *versus* deformação da liga tratada termicamente para 45% e 60% fração sólida nos tempos de 0 s, 30 s, 90 s e 210 s.

Já a Figura 5 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 0 s, 30 s, 90 s e 210 s, respectivamente.



**Figura 5.** Curvas da viscosidade aparente *versus* taxa de cisalhamento da liga tratada termicamente para 45% e 60% fração sólida nos tempos de 0 s, 30 s, 90 s e 210 s.

Nota-se que os tempos de tratamento térmico parecem ser determinantes para a avaliação do comportamento sob compressão desta liga, de forma que há uma queda nos valores tanto da tensão como da viscosidade aparente conforme se pronuncia a evolução morfológica, diminuindo gradativamente desde o tempo de 0s até o tempo de 210 s. 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 tanto de tensão como 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.<sup>(5)</sup>

Nota-se ainda, a presença de um patamar, em que o material apresenta uma deformação continuada com pouca ou nenhuma variação. Nessa fase o líquido atua como se fosse um lubrificante facilitando a movimentação dos glóbulos da fase primária, propiciando a deformação sem que haja aumento no valor da carga aplicada.

A Tabela 3 apresenta os valores da viscosidade média ( $\mu$ ) medidos a  $2,0s^{-1}$  da taxa de cisalhamento. Visualizando os resultados que foram obtidos verifica-se que na maior parte desses resultados, os valores da viscosidade se estabeleceram entre a  $10^4$  a  $10^6$  (Pa.s). Segundo Flemings:<sup>(7)</sup> “materiais que se encontram nesta faixa de viscosidade possuem o comportamento similar à do vidro fundido e demonstram alta conformabilidade”.

**Tabela 3.** Valores da viscosidade aparente média para cada condição de ensaio proposta

Liga	Fração sólida (%)	Tempo de tratamento (s)	Viscosidade aparente média (Pa.s)	Tensão média (MPa)	Tensão máxima (MPa)
AA7075	45	0	$4,3 \times 10^5$	0,48	1,93
		30	$3,8 \times 10^5$	0,06	0,40
		90	$4,7 \times 10^4$	0,006	0,21
		210	$1,0 \times 10^4$	0,0013	0,08
	60	0	$1,6 \times 10^6$	0,67	2,32
		30	$4,3 \times 10^5$	0,50	1,87
		90	$2,6 \times 10^5$	0,20	1,45
		210	$1,6 \times 10^5$	0,10	1,36

## 4 CONCLUSÕES

Com relação aos resultados obtidos, conclui-se que a liga AA7075 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, sendo muito atrativo para a indústria automobilística, principalmente na produção de partes *near-net-shape* (componentes próximos à forma final).

## 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 (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e a empresa ALCOA Ltda que gentilmente cedeu a liga para este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 SPENCER, D. B., MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallization Range. *Metallurgical Transactions*, v. 3, p. 1925-1932, 1972.
- 2 FLEMINGS, M.C., RIEK, R.G., YOUNG, K.P. Rheocasting Processes. *AFS International Cast Metals Journal*, v. I, p. 11-22, 1976.
- 3 GARAT, M., MAENNER, L., SZTUR, C.H. State of the Art of Thixocasting. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites*. Turin, Italy, 2000, p. 187-194.
- 4 YOUNG, K., EISEN, P. SSM (Semi-solid metal) Technological Alternatives for Different Applications. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites*. Turin, Italy, 2000, p. 97-102.
- 5 ATKINSON, H.V. Modeling the Semi-solid Processing of Metallic Alloys. *Progress in Materials Science*, v. 50, p. 341-412, 2005.
- 6 LAXMANAN, V., FLEMINGS, M.C. Deformation of Semi-solid Sn-15%Pb Alloy. *Metallurgical Transactions A*, v. 11A, p. 1927-1937, 1980.
- 7 FLEMINGS, M.C. Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State. *Metallurgical Transactions A*, v. 22A, p. 957-981, 1991.