

## EXTRUSÃO DAS LIGAS DE ALTA PERFORMANCE DA SÉRIE 6XXX <sup>1</sup>

*Douglas Morris Baker<sup>2</sup>*

### **Resumo**

As ligas 6060 e 6063 são as mais largamente utilizadas atualmente na indústria de Extrusão e representam cerca de 80% dos produtos extrudados, estas ligas são consideradas não estruturais e suas aplicações concentram-se na construção civil, bens de consumo e transportes. Recentemente ligas denominadas de alta performance vêm sendo introduzidas na indústria com excelentes resultados. Estas ligas se caracterizam pela elevada extrudabilidade no processo de Extrusão e pelo excelente acabamento superficial. Este trabalho tem como objetivo abordar o impacto das ligas de alta performance em alguns fatores chaves do processo de Extrusão como extrudabilidade, propriedades mecânicas e acabamento.

**Palavras chave:** Extrudabilidade; Propriedades mecânicas; Alumínio.

### EXTRUSION OF 6XXX SERIES HIGH PERFORMANCE ALLOYS

### **Abstract**

The 6060 and 6063 alloys are the most widely used for extruded profiles and represent 80% of all aluminum extruded products, These alloys are considered to be non structural and their usage is concentrated in the building industry, consumer durables and the transport industry. Recently alloys denominated “high performance” have been introduced to these consumers with excellent results. These alloys are characterized by their good extrudability, and by the excellent surface quality obtained. This paper aims to relate the impact of these high performance alloys on the key parameters of the extrusion process such as extrudability, mechanical properties and surface finish.

**Key words:** Extrudability; Mechanical properties; Aluminum.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Consultor de engenharia – Votorantim Metais CBA. Alumínio, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os inúmeros desafios de uma planta de Extrusão o aumento de produtividade pode ser considerado um dos mais importantes. A produtividade de uma prensa de extrusão pode ser determinada pela soma de diversos fatores como: complexidade da geometria do perfil, qualidade do ferramental, pressão específica da prensa e extrudabilidade do tarugo. Focando-se na extrudabilidade do tarugo podemos citar como fatores que tem impacto em extrudabilidade as práticas de homogeneização e quantidade de elementos de liga.

Na indústria de extrusão existe uma variedade de ligas disponíveis de acordo com a necessidade do cliente e aplicação do perfil, o que as diferencia são as quantidades dos elementos de liga adicionados durante a preparação do metal. Cada elemento de liga adicionado tem um papel e define um comportamento durante a extrusão e proporciona uma determinada produtividade na prensa, assim como as propriedades mecânicas e o acabamento do produto final.

No mercado de produtos extrudados existem duas ligas que são as mais largamente usadas, são elas a 6063 e a 6060, pois proporcionam uma ótima combinação entre propriedades mecânicas, acabamento superficial, anodização, boa extrudabilidade de perfis com geometrias complexas e espessuras mais finas além de boa produtividade na prensa de extrusão.

Diversas empresas vêm desenvolvendo pesquisas com o objetivo de aumentar a Extrudabilidade com foco na Composição química destas ligas. Nestes trabalhos é consenso que quanto maior a quantidade de elementos de liga como o Si e Mg menor a produtividade. Outros elementos como o Cu, Mn e Fe também têm efeito negativo na extrudabilidade da liga.

Nas ligas da série 6xxx os principais elementos de liga são o Si e Mg, estes constituintes se combinam formando o precipitado conhecido como  $Mg_2Si$ , e esta é a fase responsável pelo ganho de propriedades mecânicas durante o processo de envelhecimento através do mecanismo de endurecimento por precipitação.

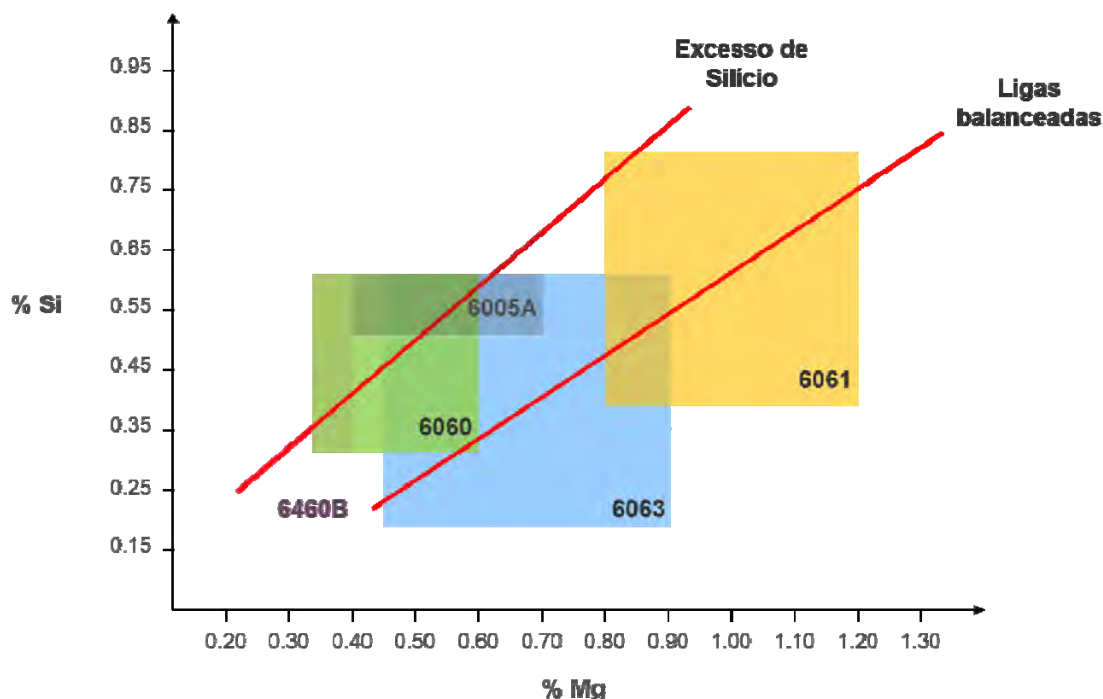
Durante algum tempo as ligas tradicionais eram desenhadas de duas formas: as ligas balanceadas (ex. 6063 e 6061) e as ligas com excesso de Si (ex. 6060 e 6005A). Nas ligas balanceadas o modelo tradicional para a formação da fase endurecedora  $Mg_2Si$  era a razão em peso de 1,73 entre o Mg e Si (equivalente a razão atômica 2:1), já nas ligas cuja razão em peso são menores do que 1,73 são consideradas com excesso de silício. Entretanto estudos recentes demonstram que na verdade a razão atômica 1:1, é a mais efetiva para a formação das fases endurecedoras  $Mg_2Si$ .

Na Figura 1 estão representadas as faixas para os elementos Si e Mg para as principais ligas da série 6xxx, onde podemos observar que as ligas tradicionais como a 6063 e 6061.

Recentemente ligas denominadas de alta performance vêm sendo introduzidas na indústria com excelentes resultados e se apresentam como uma opção para se produzir perfis de aplicações não estruturais para o mercado de construção civil, bens de consumo e transportes. Estas ligas se caracterizam pela elevada extrudabilidade no processo de Extrusão e pelo excelente acabamento superficial e com a vantagem de obter as mesmas propriedades mecânicas comparadas com as ligas mais conhecidas como a 6060 e 6063.

Neste trabalho avaliaremos a desempenho da liga 6460B, recém-registrada pela VM - CBA na Aluminum Association, comparando-a com a tradicional 6060,

abordando suas diferenças nos aspectos de produtividade, acabamento e propriedades mecânicas.



**Figura 1:** Diagrama ilustrando as faixas de composição química para os elementos Si e Mg para as principais ligas da série 6xxx.

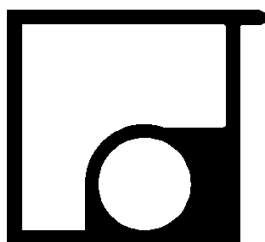
### 1.1 O Efeito dos Elementos Químicos nas Ligas da Série 6xxx

Os elementos Si e Mg responsáveis pela formação da fase endurecedora  $Mg_2Si$ , também são responsáveis pela diminuição da extrudabilidade durante a extrusão. O motivo desta variação na extrudabilidade é atribuído a uma mudança na microestrutura do material à medida que se aumenta a concentração destes elementos, pois eles determinam a linha de temperatura *solidus*, e ao mesmo tempo também impacta na resistência à deformação de uma determinada liga e, portanto proporciona um incremento na geração de calor durante a extrusão, portanto a linha de temperatura *solidus* diminui e a resistência à deformação aumenta à medida que se aumenta a quantidade destes elementos. O elemento Si tem uma maior impacto na linha de temperatura *solidus* e o elemento Mg um maior impacto na resistência à deformação. Portanto o efeito destes dois elementos quando em solução sólida e na máxima velocidade de extrusão antes da geração de um defeito superficial são aproximadamente iguais.<sup>(1)</sup>

O elemento Cu é normalmente mantido em baixas concentrações nas ligas 6060 e 6003, porém é adicionado intencionalmente na liga 6463 para aumentar o brilho durante a anodização brilhante.<sup>(2)</sup> Porém o efeito da adição do elemento Cu vem sendo investigados por diversos autores sobre como este elemento participa no mecanismo de endurecimento. Nas ligas comerciais da série 6xxx em que são adicionadas diferentes quantidade de Cu, diversas outras fases coexistem com a fase  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ), uma delas é a fase quaternária Q e outra conhecida como  $\theta$  ( $CuAl_2$ ) contribuindo para o aumento do limite de resistência da liga.<sup>(3)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliarmos a performance da liga 6460B e compará-la a liga 6060, foram executados diversos testes em diferentes tipos de perfis e prensas. O perfil escolhido trata-se de um perfil bi tubular aplicado em estruturas de carrocerias automotivas cuja gramatura é de 0,550 kg/m (Figura 2). Este teste foi realizado em uma ferramenta com dois furos em uma prensa de 1250 t e tarugo de 6 polegadas.



**Figura 2:** Ilustração do perfil bi tubular utilizado durante o experimento.

O teste foi planejado para compararmos em uma mesma produção e na mesma ferramenta a velocidade de extrusão, desta forma o experimento teve o processo muito parecido para ambas às ligas. Além disto, as temperaturas do billet, container e ferramenta foram monitoradas e para evitar grandes oscilações durante o teste e manter a estabilidade térmica do processo.

No teste utilizamos quatro tarugos de aproximadamente 6 m de comprimento sendo dois na liga 6060 e dois na liga 6460B, os tarugos foram inseridos na prensa alternadamente, ou seja, iniciamos o teste na 6060, em seguida a 6460B foi introduzida, voltamos com a liga 6060 e finalizamos com a 6460B. Neste teste objetivamos a velocidade máxima permitida pela ferramenta nas duas ligas em questão, sempre observando as condições de acabamento do perfil extrudado através de defeitos típicos gerados durante o processo pelo excesso de velocidade (*pick ups* e arrancamentos).

## 3 RESULTADOS

O gráfico da Figura 3 representa a velocidade média (metros por minuto) das prensadas ao logo do teste. As primeiras prensadas de 1 à 3 foram descartadas por representarem o início do processo onde tivemos grande variação dos parâmetros devido a necessidade de ajustes iniciais. A partir da prensada n°4 até a n°15 e entre as prensadas n°31 a n°45 utilizamos a liga 6060. E entre as prensadas n°16 a 30 e entre a prensada n°46 a n°60 utilizamos a liga 6460B.

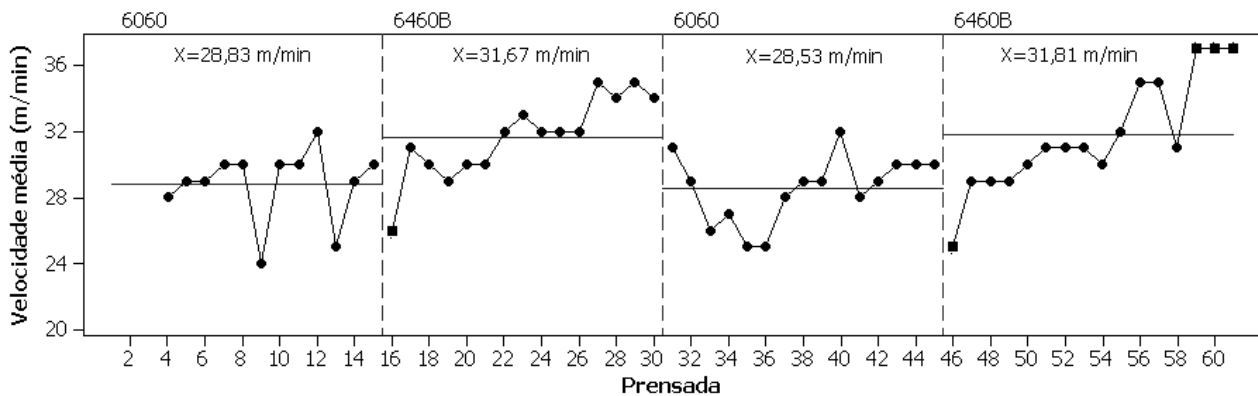


Figura 3: Velocidade média das prensadas durante o teste.

Com a finalidade de avaliar o desempenho sob o ponto de vista estatístico utilizamos o *software* Minitab para analisar os dados obtidos durante o experimento. A análise do gráfico da Figura 4 temos um *box plot* que nos proporciona uma análise visual onde podemos observar claramente a diferença entre as performances das ligas 6060 e 6460B. Além disto, utilizamos também a ferramenta estatística *Two sample T* para confirmar a diferença entre as performances.

O *p-value* obtido de 0,000, (abaixo de 0,05), indica que, com intervalo de confiança de 95%, as médias de velocidade entre as ligas utilizadas no teste são estatisticamente diferentes. Podemos observar também que a média da liga 6060 atingiu 28,52 m/min. enquanto que a liga 6460B atingiu 31,74 m/min. demonstrando um melhor desempenho.

Two-sample T para velocidade média entre as ligas durante os testes:

liga	N	Mean	StDev	SE Mean
6060	27	28,52	2,17	0,42
6460B	31	31,74	2,97	0,53

Difference = mu (6060) - mu (6460B)  
 Estimate for difference: -3,223  
 95% upper bound for difference: -2,066  
 T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -4,66 P-Value = 0,000 DF = 56

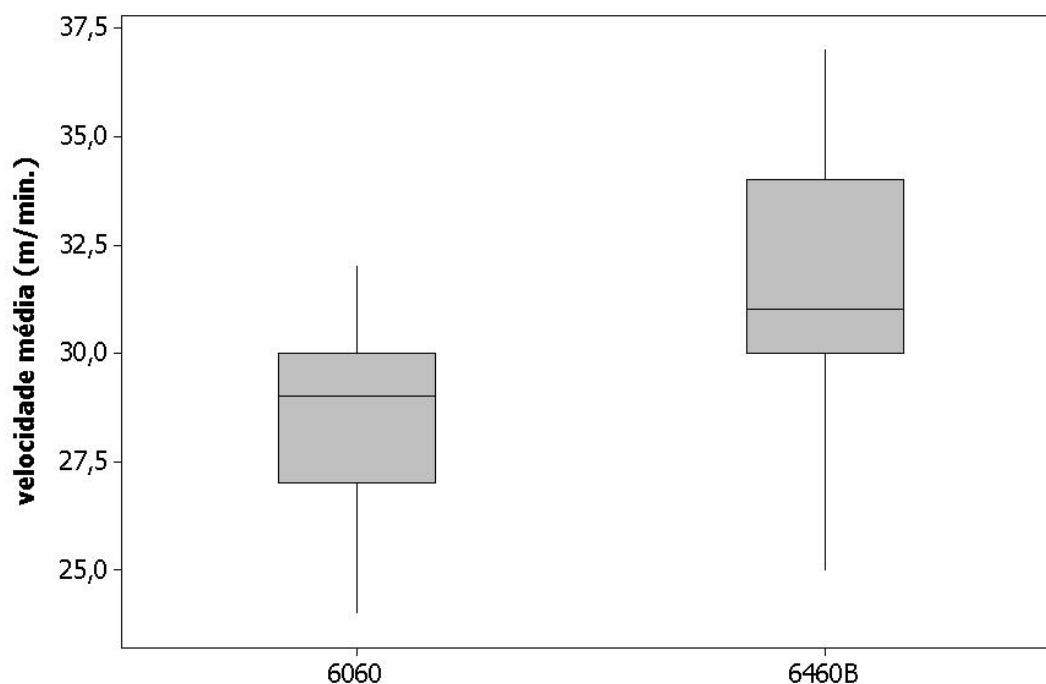


Figura 4: Box plot entre velocidades médias durante o teste.

### 3.1 Propriedades Mecânicas

Outro aspecto muito importante a ser observado são as propriedades mecânicas obtidas pela liga 6460B após o tratamento térmico de envelhecimento, como se trata de uma de uma liga não estrutural para perfis aplicáveis à construção civil, bens de consumo e transportes é interessante que a liga 6460B atinja os mesmos valores mínimos de propriedades mecânicas das ligas 6060 e 6063. Com o objetivo de comparar o limite de resistência de ambas as ligas foram realizadas diversos ensaios de tração de amostras coletadas na linha de produção após os tratamentos T5 e T6. Na Tabela 2 temos os valores mínimos de limite de resistência para perfis, barras e vergalhões nas ligas 6060 e 6063 e suas têmperas.

Tabela 2: Valores conforme norma NBR 7000<sup>(4)</sup>

Liga/Têmpera	LRT (MPa) mínimo.
6060 T5	150
6060 T6	190
6063 T5	150
6063 T6	205

O gráfico da Figura 5, nos proporciona uma análise visual comparativa dos resultados de limite de resistência através de um *box plot*, onde podemos observar que os resultados obtidos pela liga 6460B atingem os valores mínimos solicitados pela NBR 7000<sup>(4)</sup> para as ligas 6060 e 6063.

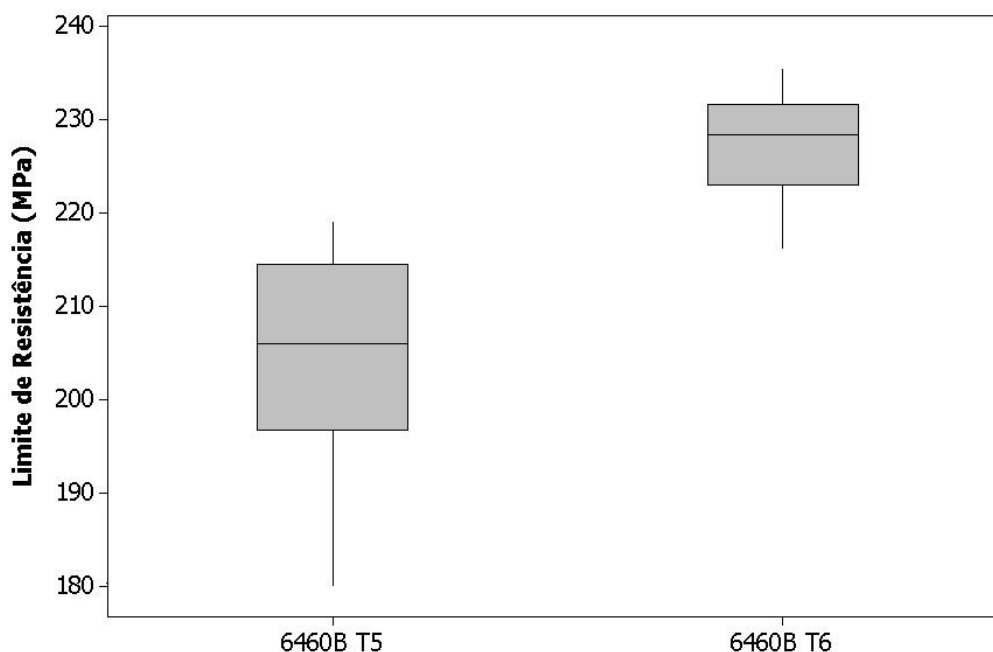


Figura 5: Box plot com resultados do ensaio de tração.

### 3.2 Acabamento Superficial

Ao longo dos diversos experimentos realizados durante a fase de testes da liga 6460B foram coletadas amostras de perfis após a extrusão para observar a rugosidade média obtida em cada liga, no gráfico da Figura 6 temos um *box plot* que nos proporciona uma análise visual da diferença entre as rugosidades médias, onde podemos observar que os resultados da liga 6460B se mostram menores, isto está diretamente relacionado a uma maior qualidade superficial do perfil extrudado. Além disto, observamos também ao longo dos experimentos que a liga 6460B permite uma maior quantidade de prensadas sem que haja uma piora no acabamento superficial do perfil. Isto se deve também à diferença da composição química de ambas às ligas.

Utilizamos novamente a ferramenta estatística *Two sample T* para confirmar a diferença entre os dados coletados. O *p-value* obtido de 0,000, (abaixo de 0,05), indica que, com intervalo de confiança de 95%, as médias de rugosidade entre as ligas são estatisticamente diferentes. Podemos observar também que a média da liga 6060 atingiu 0,70  $\mu\text{m}$  enquanto que a liga 6460B atingiu 0,39  $\mu\text{m}$ , comprovando um acabamento superficial menos rugoso.

Two-sample T para rugosidade média entre as ligas:

	N	Mean	StDev	SE Mean
6460B	69	0,3912	0,0864	0,010
6060	45	0,7062	0,0473	0,0070

Difference = mu (6460B) - mu (6060)  
 Estimate for difference: -0,3151  
 95% CI for difference: (-0,3430; -0,2871)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -22,35 P-Value = 0,000 DF=112  
 Both use Pooled StDev = 0,0736



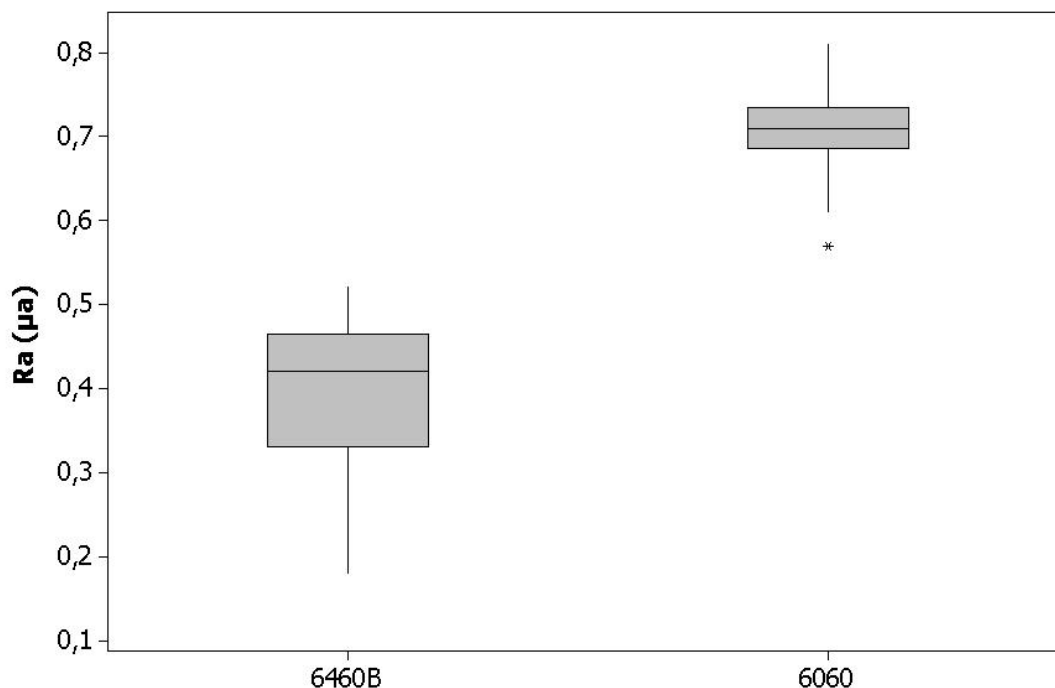


Figura 6: Resultados das rugosidades entre as ligas 6460B e 6060.

#### 4 CONCLUSÃO

As ligas de extrusão de alta performance como a 6460B apresentam ótimos resultados nos aspectos extrudabilidade, propriedades mecânicas e acabamento e podem em geral substituir ligas como a 6060 e 6063 para aplicações onde é exigido um acabamento superior.

#### Agradecimentos

À Votorantim Metais CBA, pelo apoio à realização deste trabalho. Aos colegas de trabalho (DEX) que colaboraram com os experimentos e ensaios.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Reiso O. Extrusion of AlMgSi Alloys. In: MATERIALS FORUM VOLUME 28. 2004. J.F. Nie, A. J. Morton and B.C. Muddle. P. 37.
- 2 Sheppard T. Extrusion of Aluminum Alloys. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- 3 Chakrabarti D. J. Laughlin D. E. Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions. In: Automotive Alloys II, 1998, TMS, USA.
- 4 ABNT. NBR 7000 – Alumínio e suas ligas – propriedades mecânicas de produtos extrudados. Rio de Janeiro.