

CORRELAÇÃO ENTRE COALESCÊNCIA DE MICROCAVIDADES E A PROPRIEDADE MECÂNICA DE UMA LIGA Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe MODIFICADA COM TEORES DE SILÍCIO¹

Isabella Cristina da Silva Jorge²
Valmor Capanema Oliveira Monteiro²
Amanda Thicyane de Miranda Duarte de Souza²
Everaldo Afonso Fernandes⁴
José Maria do Vale Quaresma⁵

Resumo

Com objetivo de desenvolver novos materiais destinados a Transmissão [Tx] e Distribuição [Dx] de energia elétrica, foram realizados estudos em uma liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe modificada com teores de Si objetivando traçar uma correlação entre as propriedades mecânicas da liga e a coalescência de Microcavidades. As amostras foram obtidas a partir de perfis solidificados em Molde Metálico Unidirecional Horizontal, usinados e deformados a frio para os diâmetros de [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7] mm. A caracterização estrutural foi realizada a partir de técnicas de Metalografia Quantitativa, na qual a metodologia de avaliação das dimensões das Microcavidades se utiliza da razão do comprimento [L] pela largura [W].

Palavras-chave: Limite de resistência à tração; Microcavidades; Coalescência.

CORRELATION BETWEEN COALESCENCE OF MICROWELLS AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY Al-0,05%wt Cu-[0.24 to 0.28]%wt Fe MODIFIED WITH SILICON CONTENTS

Abstract

Aiming to develop new materials for Transmission [Tx] and distribution [Dx] electricity, studies were performed in an alloy Al-0,05%wt Cu-[0.24 to 0.28]%wt Fe modified with Si contents aimed to draw a correlation between the mechanical properties of the alloy and the coalescence of microwells. Samples were obtained from profiles solidified in Mold Metal Horizontal Unidirectional, machining and cold-deformed to the diameters of [4.0, 3.8, 3.0 and 2.7] mm. Structural characterization was performed from quantitative metallography techniques, in which the evaluation methodology of microwells of dimensions is used the ratio of the length [L] by the width [W].

Key words: Limit of tensile strength; Microwells; Coalescence.

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

² Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil.

³ Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil.

⁴ Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil.

⁵ Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A distribuição da energia elétrica é um dos setores da indústria brasileira que requer mais estudos e atenção, principalmente no que se refere as linhas de transmissão e distribuição em longa distancia, quando se perde grande parte da energia elétrica produzida, como acontece no Brasil. E segundo Ambrosi e Gonzatto,⁽¹⁾ somas vultosas são gastas na implantação de novas linhas de transmissão e manutenção da rede já existente.

No Brasil, durante os últimos anos, testemunha-se um aumento constante de demanda de energia elétrica, industrial e doméstica. A satisfação desta demanda encontra grandes problemas, tais como: fabricar e construir novos cabos de alta tensão com novos materiais. E esta demanda não se verifica só em áreas urbanas altamente povoadas, mas no território nacional inteiro.

Programas governamentais como o “Luz Para Todos” ao elevar o consumo de energia elétrica naturalmente provocará a necessidades de mais energia e que naturalmente virá de fontes das mais variadas distâncias até os consumidores.

Estes fatores podem fortemente contribuir para o envelhecimento da estrutura da rede de transmissão e distribuição de energia existente na nação, com consequências alarmantes.

Os problemas tendem a se manifestar particularmente durante o período quente do verão, quando altas amperagens são exigidas para satisfazer o aumento da demanda, fatores que combinados podem ocasionar blecautes. Por outro lado, a combinação de elevada demanda e temperatura também conduz para aumentar a flecha dos condutores, causando redução de provisão da rede de operadores e em alguns casos causando blecautes quando a flecha permitida excede o limite do vão.

Assim, o grupo GPEMAT direciona seus estudos para novos materiais, novas combinações de materiais e as suas características macroestruturais, elétricas, mecânicas e microestruturais, como forma de contribuir para a eficiência das linhas de transmissão já existentes, com cabos feitos a partir destes novos materiais, nos quais se busca a otimização de efeitos tais como, a temperatura operacional, o efeito joule e o limite da flecha entre torres nas instalações. Destaca-se os trabalhos de Freitas,⁽²⁾ que visou buscar dentre os teores de Titânio estudados, qual aquele que apresentaria melhor desempenho quanto às propriedades elétricas e mecânicas sob as condições de deformação plástica e quando submetidas a teste de termoresistividade; Santos,⁽³⁾ o qual buscou analisar o efeito de diferentes teores [0,11; 0,26; 0,35 e 0,45] % de Zr, sobre uma liga base Al-EC-0,7% Si, para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica. Através do estudo das propriedades mecânicas e elétricas das ligas elaboradas; Machado,⁽⁴⁾ objetivou analisar os efeitos dos solutos 0,26 %p Zr e 0,26 %p Ti, sobre uma liga base Al - 0,05 %p Cu - [0,24 a 0,28] %p Fe - 0,7 %p Si, para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica. Através da caracterização estrutural, mecânicas e elétricas das ligas elaboradas.

Entretanto, nestes trabalhos ainda não foram avaliadas as microcavidades e seus efeitos sobre os desempenhos dos materiais estudados e, desta forma, tem-se que o objetivo deste trabalho é estudar o efeito da coalescência de microcavidades sobre o comportamento mecânico e estrutural da liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe modificada com teores de [0,5; 0,7; 0,9]% Si.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A liga foi obtida através de fusão/solidificação unidirecional em um forno tipo Mufla, após pesagem e corte do material. A composição química da liga foi realizada em um espectrômetro óptico. Após a retirada da amostra para análise química, é introduzido

um termopar no cadinho com o intuito de verificar a temperatura do metal, até que se atinja um valor de temperatura de vazamento entre 730°C a 735°C. Posteriormente o material é homogeneizado. E então faz-se a injeção de gás inerte na vazão de 0,2 l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10m³, com a intenção de remover gases e impurezas com baixa densidade. O metal líquido foi vazado em uma câmara de vazamento unidirecional horizontal que teve suas dimensões definidas em trabalhos de Quaresma.⁽⁵⁾ A montagem do dispositivo de solidificação unidirecional horizontal utilizou um molde com geometria de um paralelepípedo tendo as dimensões 60x60x110 mm, mostrada na Figura 1. Uma das paredes do molde é constituída por um bloco de aço SAE 1010, material que funciona como fonte de absorção de carga térmica liberada pelo material líquido. O bloco extrator de calor possui um furo posicionado a 3,0 mm da interface metal/molde com profundidade de 30 mm a partir da superfície do mesmo, que é utilizado para acoplar o termopar do molde. A Figura 1c ilustra o bloco já solidificado e seus planos demarcados para posterior corte em serra de fita, usinagem e deformação até serem obtidos os fios com os diâmetros (ϕ) desejados [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm, quando então, serão submetidos a testes de tração e, as microcavidades serão analisadas e medidas.

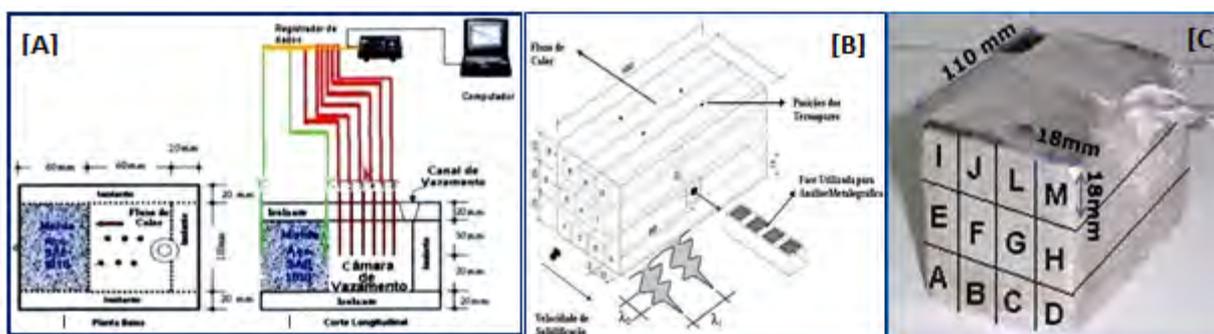


Figura 1. (a) Esquema ilustrativo do sistema Metal/Molde: vista superior e lateral da Câmara de Vazamento; (b) Desenho esquemático representando o sistema de aquisição de dados para construção dos perfis térmicos; e (c) lingote solidificado com os seus planos de deformação identificados.⁽⁵⁾

A câmara de vazamento possui as demais paredes compostas por um material isolante cerâmico à base de sílica. A tampa da câmara de vazamento possui seis orifícios circulares dispostos ao meio no intervalo de 7,5 mm até 45 mm a partir da interface metal/molde, para que sejam acoplados termopares com o objetivo de registrar a evolução térmica do material, e um orifício cônico localizado ao lado oposto da parede metálica. A atenta observação do sistema permite que se verifique que além de ser produzido fluxo de calor unidirecional no interior do metal líquido, tendo como referencial a Interface Metal/Molde, tem-se os termopares conectados por um cabo coaxial a um registrador de temperatura *data logger*, onde são gravados os históricos térmicos para posteriormente serem repassados para um computador.

2.1 Caracterização Estrutural das Ligas

A microestrutura das ligas é obtida em corpos de prova resultantes do ensaio de tração que foram preparados para caracterização estrutural realizada via Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, que envolve corte da região da fratura. A leitura do diâmetro dos dimples é realizada com auxílio do software Motic Plus 7.0, que permite medir os dimples fazendo a intersecção de duas linhas perpendiculares entre si que é uma adaptação da norma ASTM E112 que descreve métodos de medição de tamanho de grãos. Traçam-se duas linhas (L e W) perpendiculares entre si que tocam as bordas dos dimples. Sendo L a linha que representa o comprimento da microcavidade e W a

linha que representa a largura da microcavidade. A medida das microcavidades é realizada a partir da razão entre L e W.

Para cada imagem adquirida foram realizadas 15 medições e a partir destas é realizado o cálculo da média correspondente a cada diâmetro e posição. Segundo Ravindran, Manonmani e Narayanasamy⁽⁶⁾ em seus estudos sobre o crescimento e coalescência das cavidades com a liga alumínio 5052 em diferentes temperaturas de recozimento como uma função de vários parâmetros das cavidades dentre eles a razão L/W das mesmas, sugere que quanto mais próximo da unidade (1) for essa relação a microcavidade apresenta-se mais esférica. Podendo apresentar-se ainda de forma alongada ou achatada.

3 RESULTADOS

Este trabalho terá como prioridade a modificação da liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe com três diferentes teores de silício objetivando identificar qual teor contribuirá para melhorar as Características Estruturais e Mecânicas da liga base.

3.1 Avaliação da Liga Base Modificada com Teores de Si

As modificações com os teores de silício [0,5; 0,7 e 0,9]%Si sobre a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe geraram ligas que foram submetidas a Avaliações Químicas, a Solidificação Unidirecional Horizontal, a Usinagem para perfis cilíndricos com $\phi = 9,5$ mm a partir dos quais foram laminados até os diâmetros finais [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm para que pudessem ser avaliadas a amostra que permitiram a leitura da Microestrutura e a Resistência Mecânica.

3.1.1 Caracterização química das ligas com teores de Si

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise da Composição Química das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-[0,5; 0,7; 0,9]%Si. A leitura da Composição Química foi obtida através de análise em Espectrômetro Óptico de Massa e mostra que as ligas obtidas estão dentro das composições desejadas.

Tabela 1. Resultados das Análises Químicas das Ligas em estudo

LIGA	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	B	Zr	V	Al
0,5%Si	0,4861	0,0018	0,2815	0,0472	0,0017	0,0012	0,0015	0,0026	99,09
0,7%Si	0,7284	0,0015	0,2716	0,0564	0,0036	0,0026	0,0009	0,0022	98,82
0,9%Si	0,9138	0,0021	0,2849	0,0516	0,002	0,0019	0,0022	0,0019	98,69

3.1.2 Caracterização térmica das ligas com teores de Si

A caracterização térmica foi feita experimentalmente utilizando-se sete termopares do tipo "K", dos quais seis ficam localizados na parte interna da câmara de vazamento em posições previamente escolhidas, um no molde a 3 mm da Interface Metal/Molde como ilustrado na Figura 1.

3.1.2.1 Curvas de resfriamento

A Figura 2 representa as curvas de resfriamento/aquecimento das ligas (a) Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si e (b) Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si, obtidas experimentalmente de acordo com o perfil de temperaturas oriundo dos procedimentos de vazamentos e solidificação descritos. As leituras das curvas correspondem ao monitoramento das variações da temperatura em função do tempo, medido pelos termopares posicionados como na Figura 1 no decorrer da solidificação unidirecional.

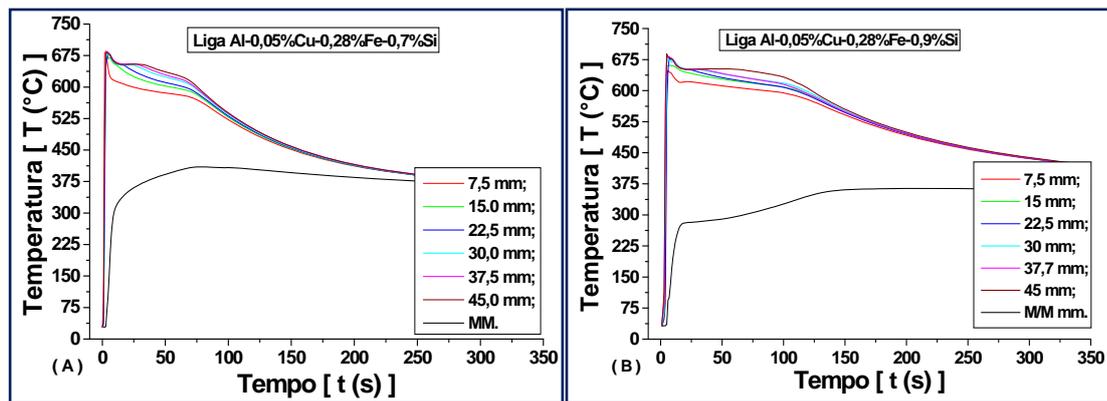


Figura 2. Perfis Térmicos para as Ligas Solidificadas Unidirecionalmente em Molde Metálico Horizontal para: (A) Al-0,28%Fe-0,05%Cu-0,7%Si e (B) Al-0,28%Fe-0,05%Cu-0,9%Si.

3.1.2.2 Perfis do tempo de passagem da interface sólido/líquido pelos termopares

As Velocidades Experimentais de Deslocamento da Isotherma *Liquidus* [$V_L = f(t)$] são definidas pelas derivadas das funções [$P = f(t)$]. Estas funções são obtidas experimentalmente a partir de conjuntos de pontos [T_L ; P ; t] para cada posição com o auxílio das curvas da Figura 3, sendo [T_L], a Temperatura *Liquidus*; [t], o Tempo de Passagem da Isotherma *Liquidus* na Posição [P] desejada.

A Tabela 2 apresenta os valores utilizados para a obtenção destes resultados.

Tabela 2. Valores obtidos para os Tempos da Passagem da Isotherma *Liquidus* para as Ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,5%Si; Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si

Posição (mm)	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5	45,0
0,5%Si – Tempo(s)	3,0	6,2	12,0	17,1	21,0	27,0
0,7%Si – Tempo(s)	0,7	4,4	9,3	13,0	17,7	23,4
0,9%Si – Tempo(s)	0,3	2,5	5,7	8,2	13,4	17,6

Os gráficos da Figura 3 apresentam os resultados da Tabela 2. A partir destes resultados, obtêm-se equações experimentais da posição em função do tempo $P = f(t)$. Estas equações podem ser derivadas em função do tempo e com isto, obtêm-se equações que expressam a Velocidade em função do tempo $P' = V = f'(t)$ e após breve manipulação logarítmica chega-se a funções do tipo $V = f'(P)$. Tais equações são expressas na Figura 4.

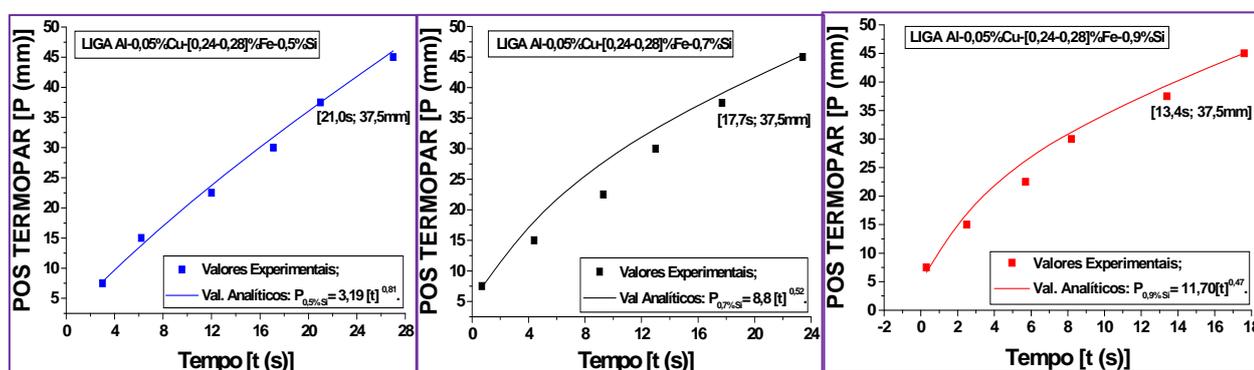


Figura 3. Posição x Tempo para as Ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,5%Si; Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si.

Os gráficos da Figura 3 permitem observar que a frente de solidificação para a liga Al-0,05%Cu-0,28%Fe-0,9%Si gasta menos tempo para passar nos termopares posicionados estrategicamente dentro da Câmara de Solidificação, como ilustrado para a posição 37,5mm. Pode-se relacionar este comportamento com os estudos de

Verram⁽⁷⁾ sobre Viscosidade e Fluidez. Estes estudos sugerem que Ligas de Alumínio com presença de Silício (Si) e Magnésio (Mg) apresentam maior Fluidez à medida que o teor destes elementos cresce na liga, dentro de certos limites, melhorando a afinidade entre o Metal e o Molde. Tal eficiência, observada na extração de calor deve conferir ao metal, ainda líquido, Pressão Metalostática mais significativa do que no caso das outras duas ligas produzindo Gaps de ar menores na Interface Metal/Molde. Isto pode ser constatado, no gráfico que relaciona a Velocidade da Interface Sólido/Líquido com o Tempo de Passagem da Interface Sólido/Líquido pelos termopares posicionados na Câmara de Solidificação, Figura 4a, pode ser observado que as leituras não iniciam concomitantes, e terminam em tempos diferentes, ilustrando o real comportamento da afinidade entre o Metal e o Molde bem como o nível de Fluidez em função da Composição Química da Liga. Por outro lado, o gráfico que relaciona a Velocidade da Interface Sólido/Líquido com a posição do termopar na Câmara de Solidificação, trata-se de simples manipulação numérica entre as equações $P = f(t)$ contidas nos gráficos da Figura 3 e $P' = V = f'(t)$ contidas nos gráficos da Figura 4a tornando possível a obtenção das funções $[V = f(p)]$ contidas nos gráficos da Figura 4b.

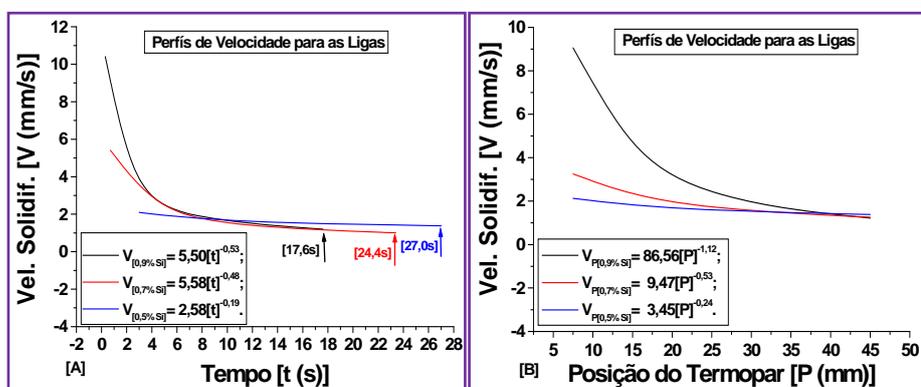


Figura 4. Perfis de Velocidade em função Tempo e da Posição do termopar para as ligas estudadas.

A Figura 5 ilustra a ideia da Pressão Metalostática brevemente comentada anteriormente.

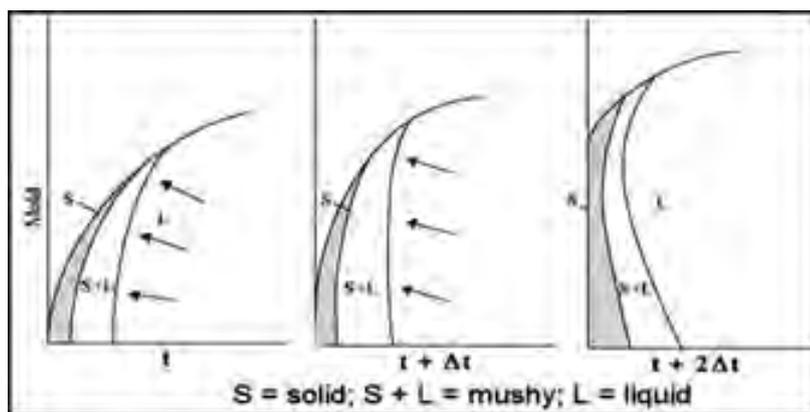


Figura 5. Ação da Pressão Metalostática durante a Solidificação de Ligas com Intervalo de Solidificação Longo ou Alta Fluidez [GARCIA et al, 2006].

Por apresentar maior Fluidez, a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si, apresenta maior Molhabilidade do Molde, isso implica em "Mushy= S+L" mais espesso e, em decorrência da maior Fluidez da Liga, o contato entre o Molde e o Metal fica mais eficiente e contribui para uma casca sólida mais delgada, que é menos resistente à Pressão Metalostática, resultando na compressão desta casca sólidas contra a parede

do molde. Este fato evita a Distorção Térmica contribuindo para maior atuação do Molde na extração de calor por produzir Gap's de ar entre o Metal e o Molde menores.

3.1.2.3 Determinação das taxas de resfriamento

A seguir tem-se a Equação Teórica/Analítica para a Taxa de Resfriamento para Metais Puro ou Ligas Eutécticas Garcia..⁽⁸⁾ Esta equação evidencia a relação existente entre a Taxa de Resfriamento (\dot{T}) e a Velocidade da Interface Sólido/Líquido (V).

$$\dot{T} = \frac{d_s \cdot L}{k_s} \cdot V^2 \leftrightarrow \dot{T} = 4,42 \cdot V^2$$

Onde:

- L, Calor Latente de Fusão = 385.000 J/Kg;
- d_s , Densidade = 2.550 Kg/m³;
- k_s , Condutividade Térmica = 222 W/m.K.⁽³⁾

A Figura 6, mostra arranjo esquemático correlacionando a Estrutura, a evolução dos Perfis de Velocidade da Interface Sólido/Líquido e das Taxas de Resfriamento em função da posição dos termopares para as ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,5%Si; Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si.

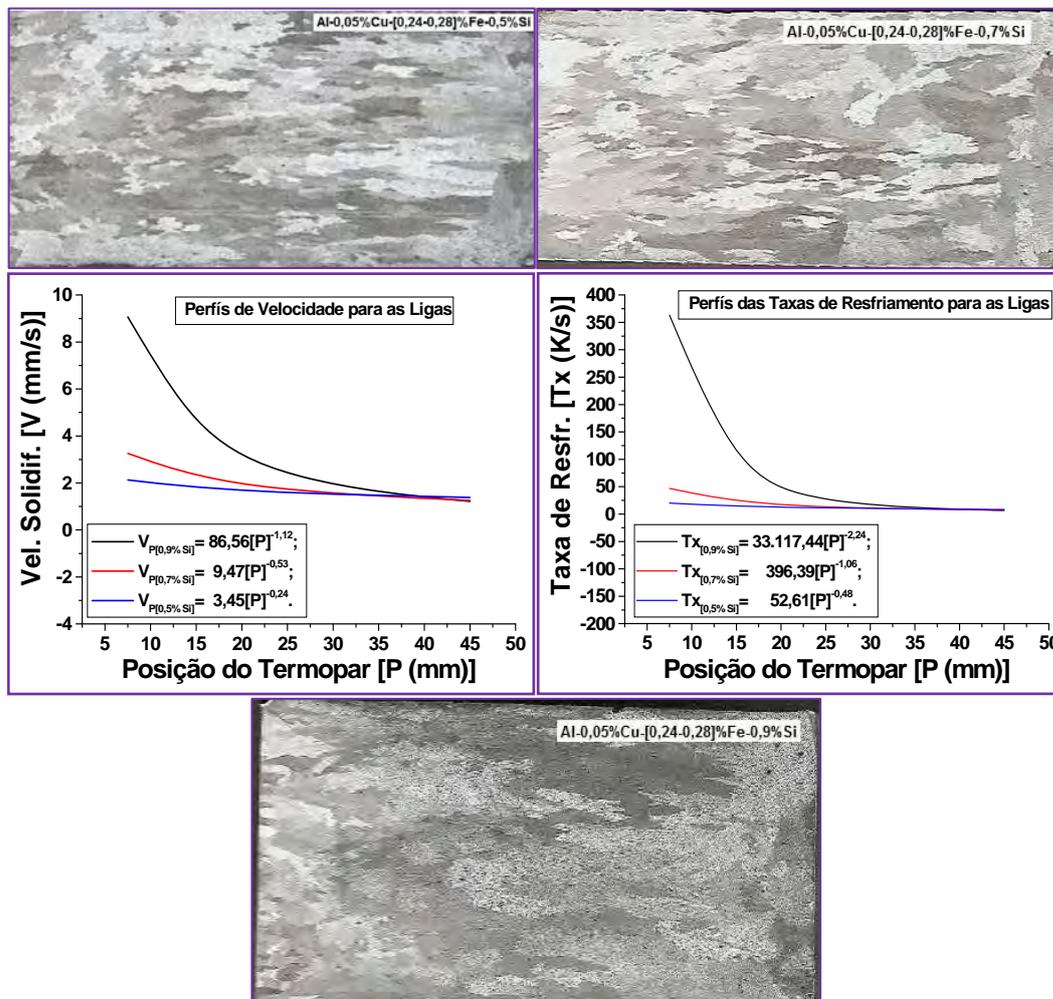


Figura 6. Arranjo esquemático correlacionando a Estrutura, a evolução dos Perfis de Velocidade da Interface Sólido/Líquido e das Taxas de Resfriamento em função da posição dos termopares para as ligas em estudo.

Nesta figura é possível observar que os valores tanto da Velocidade como da Taxa partem de valores elevados e tendem a diminuir à medida que a leitura é feita mais afastada da Interface Metal/Molde convergindo para os mesmos valores na posição

45mm em consequência do bloco extrator de calor perder a eficiência, concomitante ocorre mudança na forma da estrutura bruta de fusão, partindo gradualmente de grãos colunares alongados pequenos para maiores sem evidenciar linha de transição para as três ligas.⁽²⁾

Pode ser observado ainda que, inicialmente, com o aumento do teor de Silício na liga o perfil tanto da Velocidade como da Taxa de Resfriamento tende a ser mais elevado.

3.1.3 Caracterização estrutural das ligas modificadas com silício

Estão apresentados nas Tabelas 3 a 5 os dados para as Ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-[0,5; 0,7 e 0,9]%Si, associando os resultados obtidos para os valores das razões (L/W) entre o comprimento (L) e a largura (W) das cavidades (ϑ) medidos na região das fraturas, com os valores dos Alongamentos e LRT para os diâmetros [ϕ], [$\phi=3,0\text{mm}$ e $\phi=2,7\text{mm}$].

Tabela 3. Razão (L/W) das Cavidades (ϑ)

Liga: Al - 0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si "Along., LRT e L/W"						
POS [mm]	δ [2,7mm]	LRT[MPa]	ϑ [2,7mm]	δ [3,0mm]	LRT[MPa]	ϑ [3,0mm]
7,5	6,42	198,86	1,57	5,11	209,11	1,56
22,5	5,28	188,82	1,45	4,72	202,75	1,46
37,5	4,62	183,96	1,41	4,4	199,04	1,412
52,5	4,47	181,39	1,35	4,15	195,714	1,344

Tabela 4. Razão (L/W) das Cavidades (ϑ)

Liga: Al - 0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,5%Si "Along., LRT e L/W" $\phi= [2,7; 3,0]\text{mm}$						
POS [mm]	δ [2,7mm]	LRT[MPa]	ϑ [2,7mm]	δ [3,0mm]	LRT[MPa]	ϑ [3,0mm]
7,5	4,27	191,66	1,518	10,62	201,70	1,634
22,5	4,33	182,05	1,569	6,35	195,29	1,591
37,5	5,17	175,87	1,655	5,74	192,58	1,569
52,5	11,8	170,80	1,816	4,72	189,38	1,518

Tabela 5. Razão (L/W) das Cavidades (ϑ)

Liga: Al - 0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,9%Si "Along., LRT e L/W"						
POS [mm]	δ [2,7mm]	LRT[MPa]	ϑ [2,7mm]	δ [3,0mm]	LRT[MPa]	ϑ [3,0mm]
7,5	4,14	200,91	1,508	6,28	216,43	1,623
22,5	4,81	197,32	1,55	5,40	208,78	1,571
37,5	5,17	195,26	1,679	5,07	202,20	1,531
52,5	5,95	193,21	1,87	4,73	197,79	1,432

Os valores dos Alongamentos (δ) e das Razões (L/W) das Cavidades (ϑ), listados nas Tabelas 3 a 5, encontram-se plotados nos gráficos das Figuras 7 e 8.

As comparações apresentadas nas Figuras 7 e 8 permitem constatar o que segue:

- o comportamento da evolução dos valores do Alongamento (δ) e da Razão (L/W) das Cavidades (ϑ) parece apresentar o mesmo comportamento, pois perfis decrescentes para os valores do Alongamento (δ) estão associados a perfis decrescentes para as razões (L/W), da mesma forma quando crescem;
- a Liga Al - 0,05%Cu - [0,24 - 0,28]%Fe - 0,7%Si, apresenta resultados congruentes e decrescentes tanto para a razão (L/W) das dimensões das Microcavidades (ϑ) como para o Alongamento, com maior ênfase para o diâmetro de 3,0mm, por apresentar menores valores;
- entre os diâmetros (ϕ) dos fios tomados para estudo, o ($\phi=3,0\text{mm}$) foi o único que sempre apresentou tendência queda para estes valores;
- a tendência de queda para a razão (ϑ) aponta para a esfericidade na forma das Microcavidades. Isto pode estar associado ao aspecto da Recuperação Dinâmica, hipótese que em estudos anteriores.^(2,3) foi levada em consideração;

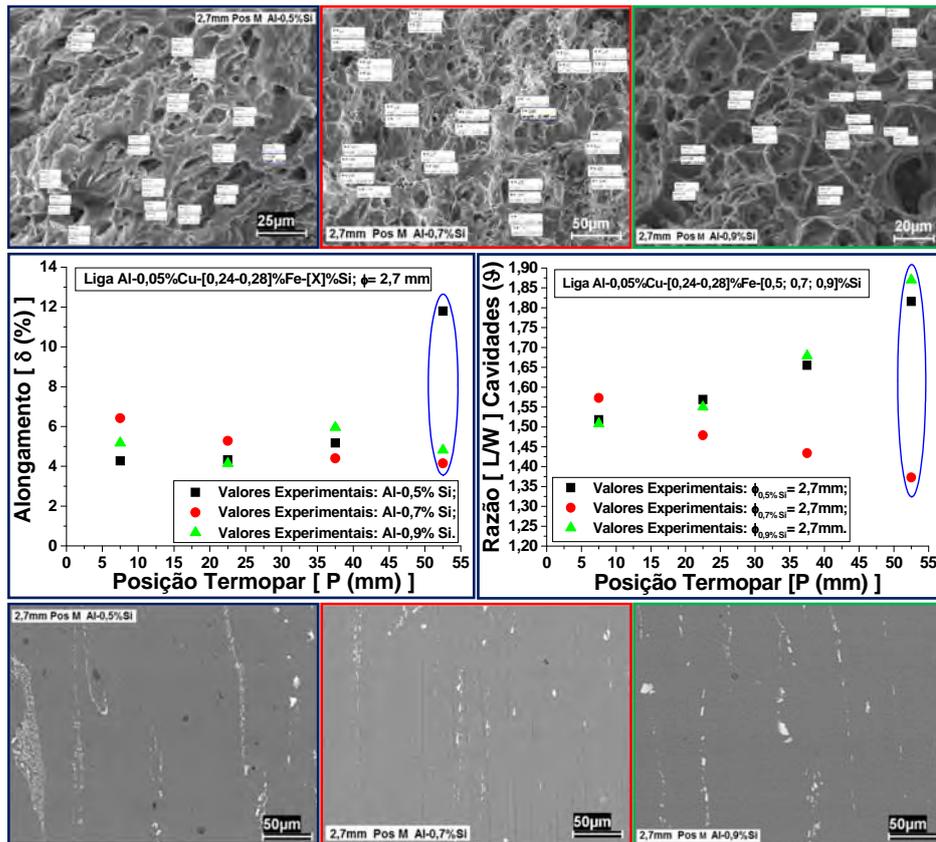


Figura 7. Correlação entre as microcavidades (a leitura de suas dimensões na região da fratura) e a distribuição das partículas de segunda fase na seção longitudinal próxima desta região. Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – [0,5; 0,7 e 0,9]%Si. Perfis com $\phi = 2,7$ mm.

- por outro lado, os resultados também orientam para o fato de que não só a forma das Cavidades, mas também a quantidade das Cavidades pode ser afetada pelas condições de laminação;
- da mesma forma que a orientação das Partículas de Segunda de Fase também podem influenciar na forma e na quantidade das Cavidades, como pode ser constatado nas Fotos Micrografias na parte inferior das Figuras 7 e 8;
- as fotos micrografias das Figuras 7 e 8 são referentes às posições indicadas pelo círculo azul, nos gráficos das Figuras. As cores das cercaduras de cada figura correspondem às cores dos spots no gráfico;
- aparentemente, a maior intensidade associada à orientação das partículas de segunda fase (fotos micrografias na parte inferior dos gráficos) tende a contribuir para a formação de microcavidades (fotos micrografias na parte superior dos gráficos) com maiores diâmetros [ϕ].

Da análise cuidadosa destes dois (02) conjuntos de associações pode ser constatado que a Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – 0,7 %Si é a que apresenta comportamento mais coerente, pois os dois perfis com os $\phi = 2,7$ mm e $\phi = 3,0$ mm obtidos com esta liga apresentam tendência de diminuição tanto nos valores dos Alongamentos (δ) como nos valores da razão (ϑ) comportamento que aproxima da Recuperação Dinâmica por um lado e da Esfericidade na forma de suas Microcavidades por outro. É possível também associar esta coerência ao aspecto macroestrutural apresentado na Figura 6 na qual pode ser observado a melhor orientação dos grãos colunares no sentido da extração de calor.

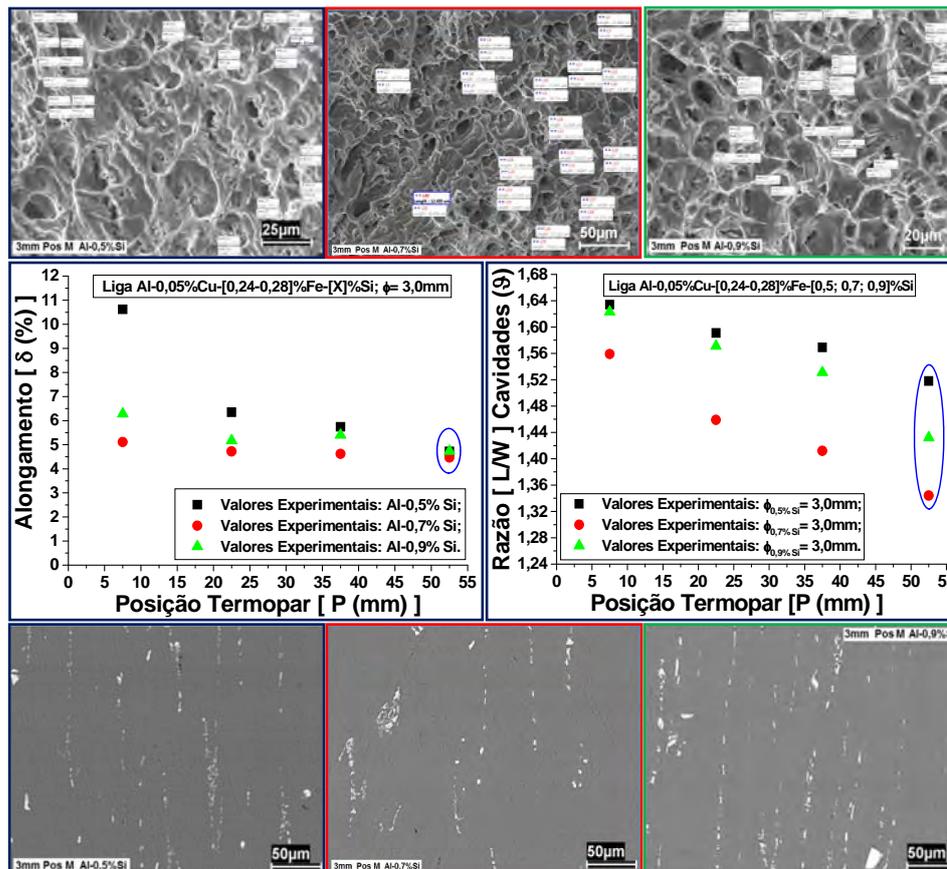


Figura 8. Correlação entre as microcavidades e a leitura de suas dimensões na região da fratura e a distribuição das partículas de segunda fase na seção longitudinal próxima desta região. Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – [0,5; 0,7 e 0,9]%Si. Perfis de $\phi = 3,0$ mm.

3.1.4 Caracterização mecânica das ligas modificadas com silício

Nesta seção, serão avaliadas as propriedades mecânicas das Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – [0,5; 0,7 e 0,9]%Si. As Tabelas 3 a 5 relacionam os valores dos resultados dos ensaios de tração. Ressalta-se que para cada posição ao longo do lingote foram ensaiadas três (03) amostras para cada teor de soluto em cada diâmetro. Com os resultados apresentados nas Tabelas 3 a 5 é possível, então, obter os gráficos da Figura 9, que expressam os LRT para as ligas em estudo. Os gráficos expressam em função das posições dos termopares o comportamento dos diâmetros $\phi = 2,7$ mm e $\phi = 3,0$ mm, para as ligas estudadas.

Os gráficos que compõem a Figura 9 permitem observar que a Liga Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – 0,7%Si apresenta, sempre o segundo melhor desempenho, tanto para o diâmetro $\phi = 2,7$ mm como para o diâmetro $\phi = 3,0$ mm. Entretanto, os valores para o diâmetro $\phi = 3,0$ mm se aproximam bastante dos valores obtidos para a Liga Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – 0,9%Si que apresenta maiores valores para os LRT, entende-se que este comportamento, pode estar associado aos menores valores para o conjunto Alongamento (δ)/Razão das Cavidades (ϑ) obtidos com este diâmetro e vistos nas Figuras 7 e 8, por serem provocadas por arranjos de precipitados que por sua vez são consequência do grau de deformação imposta ao perfil, além da interferência do teor de Si – o segundo maior em estudo.

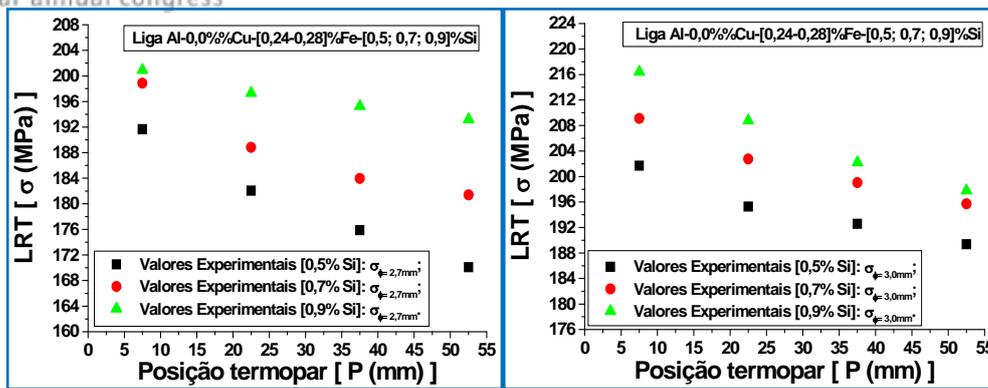


Figura 9. Caracterização Mecânica das Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – [0,5; 0,7 e 0,9]%Si, para os $\phi=2,7mm$ e $\phi=3,0mm$ obtidos em cada posição do termopar.

Os gráficos que compõem a Figura 10 apresentam de forma compacta e satisfatória a relação que existe entre os parâmetros avaliados. Verifica-se que a correspondência entre LRT, Alongamento e Razão (η) mais coerente e convergente com a teoria do modelo de Orowan,⁽⁹⁾ sobre movimentação de Discordâncias e o aspecto da Fratura Dúctil, é a apresentada pela liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si uma vez que demonstram que Alongamentos crescente estão relacionados Razões (η) crescentes e estas a LRT também crescente para os fios com os dois diâmetros escolhidos, como pode ser visto na Figura 10 para a referida liga.

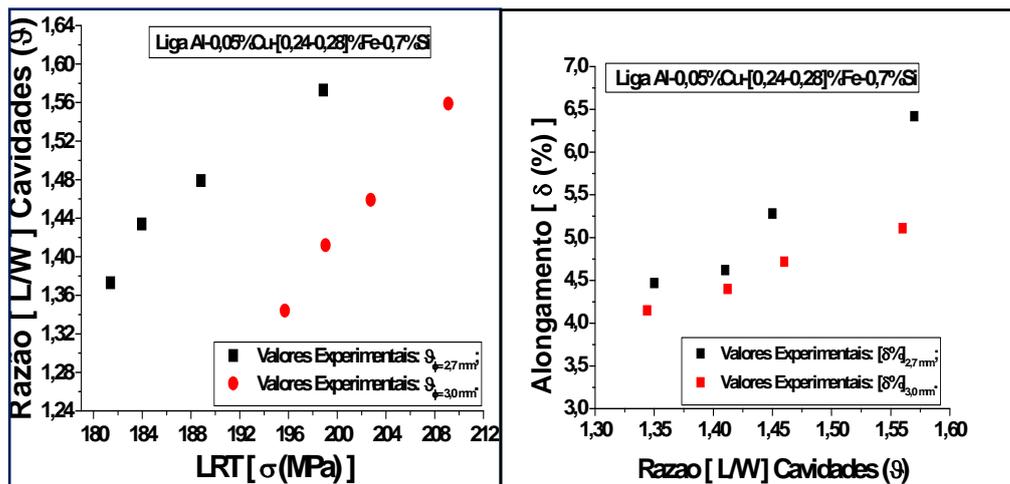


Figura 10. Comparação dos resultados para as Ligas Al – 0,05%Cu – [0,24 – 0,28]%Fe – [0,5; 0,7 e 0,9]%Si, para os $\phi=2,7mm$ e $\phi=3mm$.

4 CONCLUSÕES

- Dentre as três ligas em estudo a liga Al-0,05%-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si apresenta valores mais satisfatórios para Alongamento, Cavidades e LRT;
- a partir da análise da Figura 10 observa-se que para maiores valores de Cavidades ocorrem maiores valores de LRT e Alongamento;
- comparativamente o diâmetro 3,0mm apresenta resultados mais consistentes, pois para uma mesma razão L/W para as cavidades [η] tem-se menor alongamento que por sua vez está associada a maior LRT, como pode visto na Figura 10b e 10a respectivamente, sendo estediâmetro, portanto, o de melhor desempenho; e
- como síntese tem-se que para um valor de alongamento temos um valor proporcional de LRT, isso porque quanto maior for os valores de alongamento maior será o limite de resistência à tração.

REFERÊNCIAS

- 1 AMBROSI, I.; GONZATTO, V. **Situação Energética no Brasil e Alternativas Frente a Falta de Investimentos no Setor, Teor.** Evid. Econ., Passo Fundo, Ano 1, n.1, , março 1993, p.143-164.
- 2 FREITAS, E. S. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e zircônio.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2010.
- 3 SANTOS, W. L. R. **Efeitos de teores de Zr sobre as propriedades mecânicas e elétricas de ligas Al-EC-Si aplicadas na elaboração de ligas para Tx e Dx de energia elétrica.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2010.
- 4 MACHADO, P. C. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS SOLUTOS ZR E TI SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICA, ELÉTRICA E DE TERMORRESISTÊNCIA DE UMA LIGA AL-CU-FE-SI DESTINADA A TX E A DX DE ENERGIA ELÉTRICA.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2012.
- 5 QUARESMA, José Maria do Vale. **Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica.** Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- 6 R. RAVINDRAN; K. MANONMANI; R. NARAYANASAMY. **An analysis of void coalescence in AL 5052 alloy sheets annealed at different temperatures formed under different stress conditions.** Materials Science and Engineering A 507 (2009) 252–267.
- 7 VERRAN, O.G. **Método Alternativo para Medição do índice de Fluidez de Ligas de Al em Coquilhas, Fundição e Serviços.** n° 134, pp.70-79, Fevereiro, 2004.
- 8 GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** Campinas, SP: Ed. Unicamp, 2001.
- 9 Polmear, I. J. **Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals.** *Fourth edition;* Melbourne, Australia; ElsevierButterworth-Heinemannpublications; ISBN 0 7506 6371 5; 2006.
- 10 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas – **“Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”**, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810.