

# DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA PARA DETERMINAR LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO EM CHAPAS DE ALUMÍNIO LIGA 8011 <sup>1</sup>

Camila Amaral Rizzi <sup>2</sup>

## Resumo

A espectroscopia de força atômica é uma técnica oriunda da nanotecnologia. Ao contrário de outras espectroscopias, que informa quanto à composição química, neste trabalho esta técnica é utilizada para obtenção de informações sobre propriedades mecânicas. Encontrase uma estreita relação entre o ângulo da linha espectral e o limite de resistência à tração da liga de alumínio analisada. O alumínio é o terceiro elemento mais abundante é fácil entender que a humanidade tenha disponibilizado vários anos de trabalho procurando a melhor forma de aproveitá-lo. Normas foram criadas a fim de padronizar os métodos de realização de testes como o de resistência à tração. Este é utilizado há muitos anos para os diversos metais, porém seu princípio de funcionamento não sofreu grandes evoluções. As amostras são submetidas a carregamentos que levam a ruptura. As empresas despendem tempo, homem-hora e parte de sua produção na realização de testes como este. A Nanotecnologia vem surpreendendo com novas técnicas eficazes para desempenhar antigas tarefas. Este trabalho sugere o uso da espectroscopia de força atômica para transformar a forma pela qual propriedades mecânicas são obtidas. Amostras de alumínio, liga 8011, laminadas a frio e submetidas a distintos tratamentos térmicos tiveram suas microestruturas caracterizadas através de microscopia óptica, eletrônica de varredura e de força atômica. A composição química foi obtida através de espectroscopia de emissão. Espectros de força atômica foram obtidos e relacionados com propriedades mecânicas do alumínio.

**Palavras-chave:** Espectroscopia de força atômica; Alumínio; Propriedades mecânicas; Limite de resistência à tração

## TECHNOLOGY DEVELOPMENT TO FIND MECHANICAL PROPERTIES OF 8011 ALUMINUM ALLOY

### Abstract

Force atomic spectroscopy is a technique that is from nanotechnology, in opposite of other spectroscopes which are used to give information about chemical composition, in this work force atomic spectroscopy is used to give information about mechanical properties. It was possible to find a relation between the angle of spectra and tensile strength of aluminum alloy analyzed. The aluminum is the third most abundant element; it is easy to understand that humanity has looked for the best way to work with this metal for several years. Norms had to be created to standard mechanical test methods like tensile tests. That kind of test is used for along time but it hasn't changed its principal of work. The samples are submitted to load until rupture. The aluminum company spends time, man-hour and part of their productions to do test like that. The Nanotechnology is surprising with new techniques effective to old actives. This work suggests the use of force atomic spectroscopy to change the methods how mechanical properties are obtained. Samples of aluminum, 8011 alloy, cold-rolled, were submitted different heat treatments to promote different mechanical properties. They had their microstructure characterized by optic, scanning electron and atomic force microscopy. The composition was obtained by emission spectroscopy. Atomic force spectra were obtained; they were related to aluminum mechanical properties: Tensile strength, Yield strength and elongation.

**Key words:** Atomic force spectroscopy; Aluminum; Mechanical characterization; Tensile strength.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE*

<sup>2</sup> *Física, Alcoa Alumínio S.A.*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e Descrição do Problema

O alumínio é o metal mais jovem usado em escala industrial. Começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. O Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG).<sup>(1)</sup>

A principal razão do grande crescimento do uso do alumínio na indústria refere-se à combinação entre atrativas propriedades mecânicas, baixo peso específico e baixo custo.<sup>(2)</sup> No entanto, as propriedades do alumínio variam, dependendo da liga e do tratamento térmico utilizado, de forma que são exigidos certificados dessas propriedades. Assim como a indústria do alumínio as demais indústrias que trabalham com metais despendem, rotineiramente, amostras de seu produto, bem como, analistas, para ensaios mecânicos.<sup>(3)</sup>

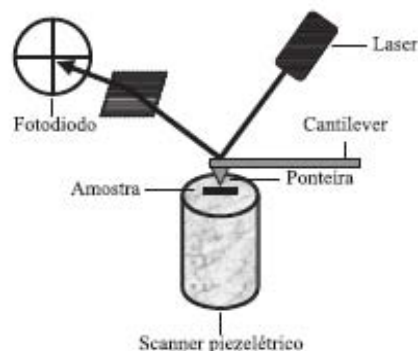
Os métodos para obtenção de propriedades mecânicas vêm se desenvolvendo no que se refere às máquinas e equipamentos utilizados, porém o princípio fundamental continua inalterado, consistindo em levar o corpo de prova a ruptura.

A problemática consiste em desenvolver um método mais rápido, econômico e seguro para tornar conhecidas as propriedades mecânicas do alumínio.

## 1.2 Revisão de Literatura

### 1.2.1 Funcionamento do microscópio de força atômica

Uma sonda (ponteira ou tip) constituída de algumas dezenas de átomos é montada sobre um suporte (cantilever) de 100 $\mu$ m a 200 $\mu$ m de comprimento. Aproxima-se o tip da amostra até a força de interação entre eles atingir o valor determinado, o tip passa, então, a varrer o material que se deseja estudar. Devido à topografia e para manter a força constante o cantilever sofre deflexões. Estas deflexões são causadas pelas forças que agem entre a sonda e a amostra. Na extremidade livre do cantilever e no lado oposto a sonda existe uma superfície refletora para a qual está apontado um laser. O feixe atinge o cantilever e é refletido para um fotodetector (Figura 1). Quando o cantilever sofre deflexões, estas são percebidas pelo detector, pois o laser passa a atingir o mesmo em posições diferentes. As sucessivas deflexões são utilizadas por um software para montar a imagem.<sup>(4-6)</sup>



**Figura 1:** Esquema de funcionamento do microscópio de força atômica.<sup>(6)</sup>

Nos últimos anos, o AFM tem trazido notáveis contribuições à ciência, em especial à biologia, física, ciência dos materiais e microeletrônica. Com aplicações topográficas e não topográficas.<sup>(6)</sup>

### 1.2.2 Força de interação

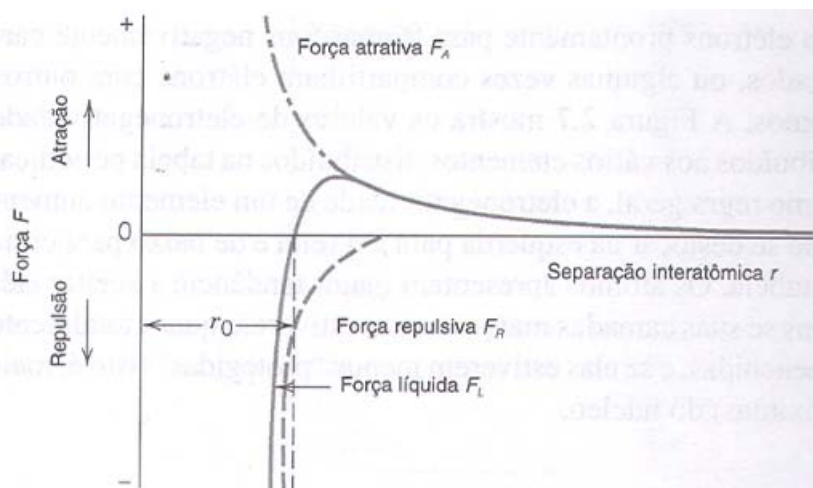
Nesta sessão, uma breve revisão das principais forças de interação que servirão como referência para melhor entendimento da relação que se estabelece entre a ponteira do microscópio de força atômica e a amostra, é apresentada.

Considerando a interação do último átomo livre do tip com o átomo mais externo da amostra, pode-se para simplificação considerar o esquema apresentado na Figura 2, como uma aproximação dos fenômenos que ocorrem quando o tip se aproxima da amostra. A grandes distâncias, as interações entre eles são desprezíveis, no entanto à medida que os átomos se aproximam, cada um exerce forças sobre o outro. Essas forças são de dois tipos, atrativa (FA) e repulsiva (FR), e a magnitude de cada uma delas é uma função da separação entre os átomos.

A força líquida (FL) entre os dois átomos é exatamente a soma das componentes de tração e repulsão; isto é,  $FL = FA + FR$ .

Quando FA e FR se anulam, isto é  $FA + FR = 0$ . Os centros dos dois átomos irão permanecer separados pela distância de equilíbrio  $r_0$ . Algumas propriedades mecânicas dos materiais são consequência da forma da curva força em função da separação interatômica. Por exemplo, a inclinação da curva na posição  $r = r_0$  é bastante íngreme para um material relativamente rígido; as inclinações são menos íngremes para materiais mais flexíveis.<sup>(7)</sup>

Embora este tratamento aborde uma situação ideal, que envolve apenas dois átomos, existe uma condição semelhante porém mais complexa, para materiais sólidos, onde devem ser consideradas as interações de força e de energia entre muitos átomos.



**Figura 2:** A dependência das forças repulsiva, atrativa e líquida em relação à separação interatômica para dois átomos isolados.<sup>(7)</sup>

Quando a ponteira aproxima-se muito da amostra, os átomos de ambas estão tão próximos que seus orbitais eletrônicos começam a se repelir. Esta repulsão eletrostática enfraquece a força atrativa. A força anula-se quando a distância entre os átomos é da ordem de alguns Angstroms.

### 1.2.3 Interpretação dos espectros de força atômica

A Figura 3 é um esquema idealizado de espectro de força atômica que servirá de discussão nessa sessão para amadurecimento e melhor compreensão dos resultados encontrados.

A distância tip-amostra é representada no eixo horizontal. A força de interação tip-amostra é dada em  $\mu\text{m}$ , pois se refere à deflexão do cantilever. Para obter a força em unidade do sistema internacional deve-se multiplicar a deflexão pela constante elástica do cantilever, dada pelo fabricante. Neste trabalho foi empregado um cantilever de constante cujo valor é  $0,20\text{N/m}$ . A construção do espectro ocorre quando se faz o tip e a amostra se aproximarem, as forças desenvolvidas são registradas em função da deflexão do cantilever em seguida eles voltam a se afastar até uma distância tal que as forças de interação entre os átomos do tip e da amostra não sejam mais percebidas.

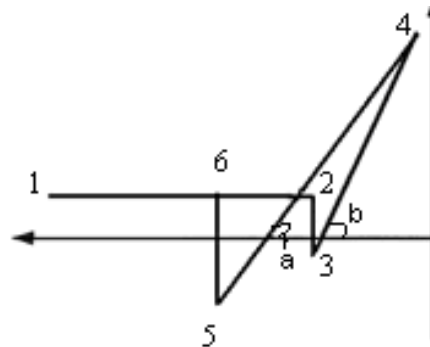


Figura 3: Esquema de um espectro de força atômica

Na parte paralela ao eixo horizontal, iniciada no ponto 1, existe um equilíbrio entre a força elástica do cantilever e as forças de atração.

No ponto 2, o gradiente da força atrativa supera a constante elástica do cantilever, o que leva a uma instabilidade que resulta em um pulo ao contato, no ponto 3.

A maior deflexão do cantilever na direção para frente no ponto 3, multiplicada pela constante de mola, é a máxima força atrativa ( $F_{at}$ ) existente no sistema. Se a amostra continua a ser movida na direção da ponteira, o cantilever sente as forças repulsivas do contato e se flexiona na direção contrária.

Se agora a direção do movimento da amostra é invertida (a partir do ponto 4), ou seja, a amostra se afasta da ponteira, chega um momento em que a direção do movimento do cantilever também muda. Nessa volta, no ponto 5, ocorre uma segunda instabilidade, pois o gradiente de força novamente iguala a constante efetiva de mola e a ponteira pula para fora do contato. O ponto 5, portanto, corresponde à posição de máxima força de adesão ( $F_{ad}$ ). Em geral, o módulo da máxima força adesiva no ponto 5 é maior que o módulo da máxima força atrativa no ponto 3. Os ângulos a e b destacados no esquema da figura 8 correspondem, respectivamente, ao ângulo  $F_{ad}$  ( $A_{fad}$ ) e ângulo  $F_{at}$  ( $A_{fat}$ ).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Amostragem

Seis chapas de 5 mm de espessura da liga 8011 tiveram suas espessuras reduzidas através do processo de laminação a frio até atingirem a espessura final de 0,24mm. Na espessura final, cada uma delas passou por tratamentos térmicos

distintos sob as seguintes condições: 230°C/1hora, 240°C/1hora, 250°C/1hora, 260°C/1hora, 270°C/1hora ou 280°C/1hora.

Todas as amostras sofreram redução de espessura através de laminação a frio em laboratório, utilizando um mini laminador (Mini Laminador F.Ili Cavallin).

## 2.2 Caracterização e Ensaio

As peças de alumínio foram caracterizadas através de:

### 2.2.1 Macrografia

As amostras sofreram tratamento químico com solução composta por água destilada, ácido clorídrico e ácido nítrico, 1:1:1 e foram observadas através de microscopia óptica (microscópio Naxos II, capacidade de até 400X);

### 2.2.2 Micrografia

As amostras foram lixadas em lixadeira manual de 4 pistas com as seguintes granulometrias 80, 100, 220 e 240 polidas em politriz de prato giratório com pasta de diamante e analisadas através de microscopia eletrônica de varredura (microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss, software: Leo440);

### 2.2.3 Ensaio mecânicos

Os Ensaio mecânicos foram realizados com a finalidade de se obter os limites de resistência à tração e de escoamento e o alongamento percentual (Máquina Universal de ensaio de tração, Losenhouse, capacidade de 10ton). Os ensaios de tração foram executados de acordo com a ASTM B 557<sup>(8)</sup> (Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum – and Magnesium Alloy Products) e ASTM E 8M<sup>(9)</sup> (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials).

Foram utilizados corpos de prova padrão com comprimento de 200 mm, largura de 12,75 mm e espessura igual a original da amostra, velocidade de ensaio de 30mm/min.

### 2.2.4 Espectroscopia de emissão óptica

A composição química foi identificada através de espectroscopia de emissão (espectrômetro de emissão ARL 3460, software WinOE);

### 2.2.5 Microscopia e espectroscopia de força atômica

Por fim, as amostras foram submetidas a análises de microscopia de força atômica (equipamento EasyScan, modo contato) com as quais além das imagens foram obtidas as curvas força x distância, ou espectros de força atômica.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de espectroscopia de emissão indicam que as amostras pertencem a liga 8011 (Tabela 1).<sup>(10)</sup>

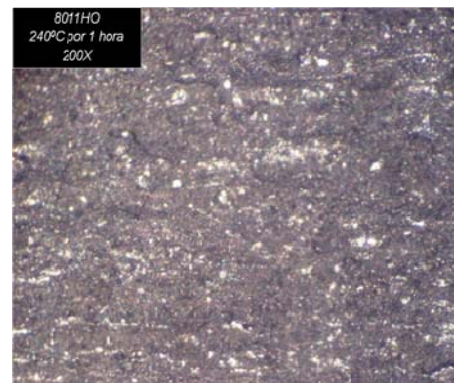
**Tabela 1:** Resultados composição Química Liga 8011

Elementos (%)	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	V	Outros
Liga 8011	0.91	0.54	0.0018	0.0088	0.0008	0.0009	0.0512	0.0123	<0.005

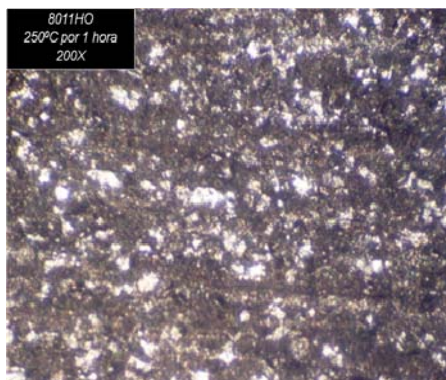
As análises de macrografia sugerem que o tratamento térmico aplicado resultou em recuperação da estrutura a partir da temperatura 250<sup>o</sup>C, podendo ser observados contornos de grão<sup>(2)</sup> (Figuras 4 a 9).



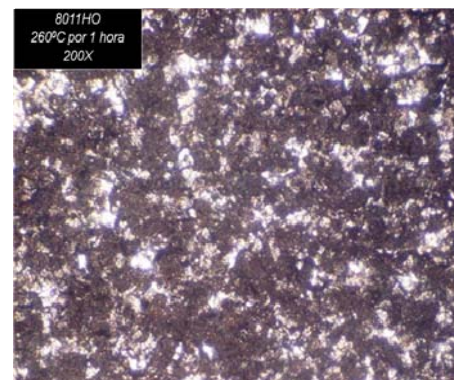
**Figura 4.** Liga 8011 T.T. 230oC/1hora  
Aumento 200X



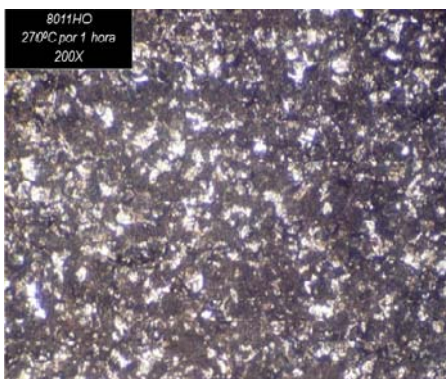
**Figura 5.** Liga 8011 T.T. 240oC/1hora  
Aumento 200X



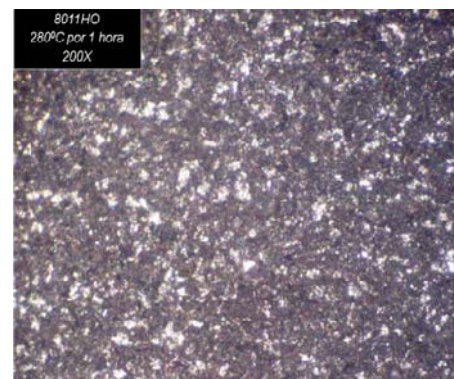
**Figura 6.** Liga 8011 T.T. 250oC/1hora  
Aumento 200X



**Figura 7.** Liga 8011 T.T. 260oC/1hora  
Aumento 200X



**Figura 8.** Liga 8011 T.T. 270oC/1hora  
Aumento 200X



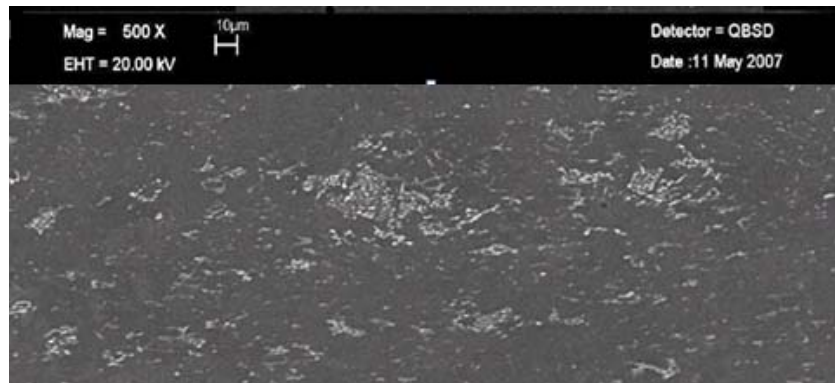
**Figura 9.** Liga 8011 T.T. 280oC/1hora  
Aumento 200X

As análises de propriedades mecânicas apresentaram os seguintes resultados, conforme Tabela 2. Verifica-se que o alongamento aumenta à medida que a estrutura torna-se mais organizada.

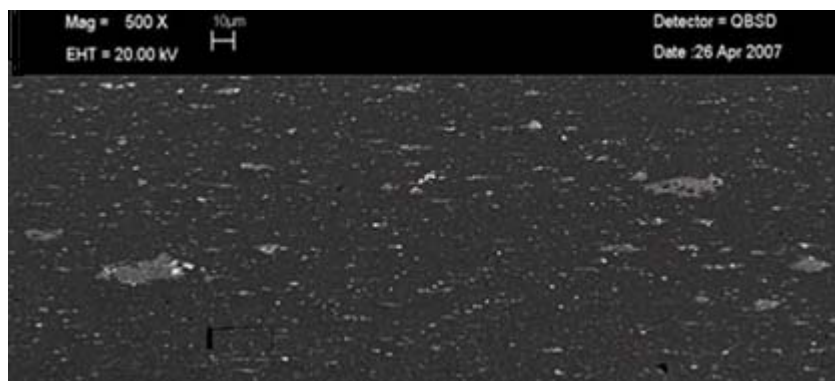
**Tabela 2.** Liga 8011 - Propriedades mecânicas

Temperatura (°C)	LRT (MPa)	LE (MPa)	A (%)
230	126,66	123,68	11,55
240	122,80	117,17	14,14
250	110,01	71,53	18,39
260	101,77	59,37	23,21
270	89,75	47,47	27,31
280	87,97	42,91	27,68

As micrografias que foram realizadas para as temperaturas inicial, intermediária (250°C) e final, revelam tratar-se de material bifásico. A matriz de alumínio apresenta, aproximadamente, 99% desse elemento. Os elementos de liga (ferro, silício) concentram-se em fases homogeneamente distribuídas na matriz. Em uma análise qualitativa pode-se observar que o aumento da temperatura resulta em uma microestrutura mais fina no que se refere aos tamanhos das fases (Figuras 10 a 12).



**Figura 10.** Imagem de microscopia eletrônica de varredura, 500X, Liga 8011, T.T. 230°C/1hora

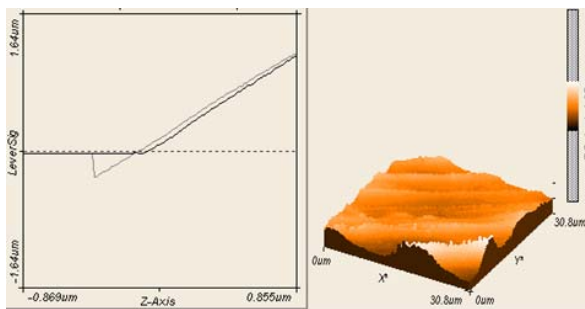


**Figura 11.** Imagem de microscopia eletrônica de varredura, 500X, Liga 8011, T.T. 250°C/1hora

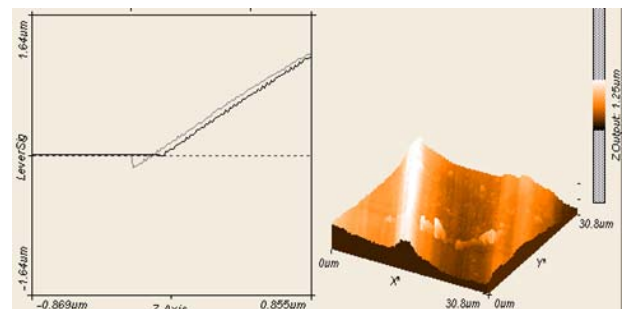


**Figura 12.** Imagem de microscopia eletrônica de varredura, 500X, Liga 8011, T.T. 280°C/1hora

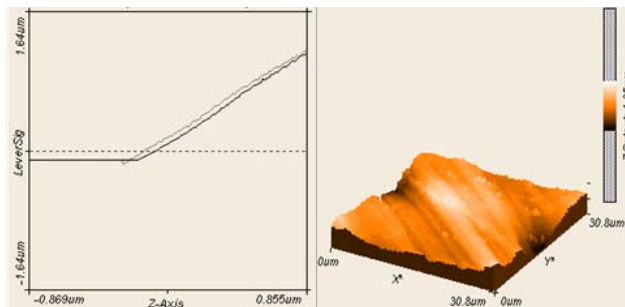
As análises realizadas com microscopia de força atômica forneceram imagens e espectros (Figuras 13 a 18). A partir dos gráficos a tabela 3 foi gerada. A força ( $F$ ) de interação entre a ponteira (tip) do microscópio e a amostra é dada em  $\mu\text{N}$  e a distância relativa à ponteira e a amostra ( $Z$ ), é dada em  $\mu\text{m}$ .



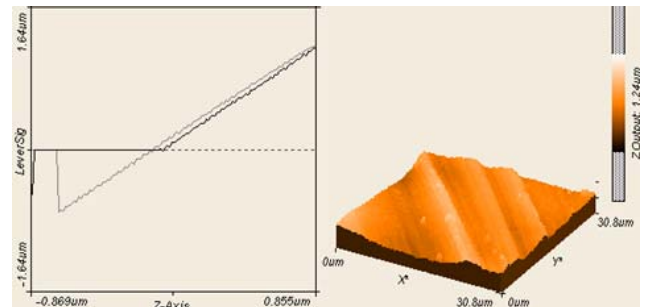
**Figura 13.** Espectroscopia de força e imagem, 8011-230°C/1hora



**Figura 15.** Espectroscopia de força e imagem, 8011 250°C/1hora

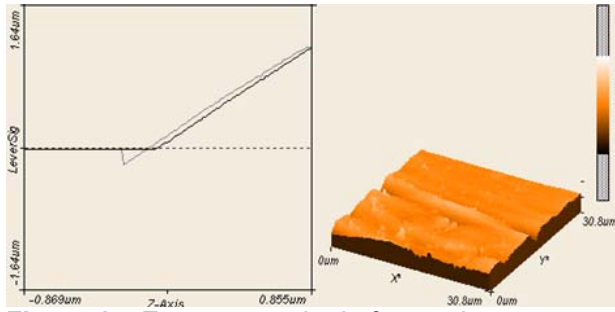


**Figura 14.** Espectroscopia de força e imagem, 8011 240°C/1hora

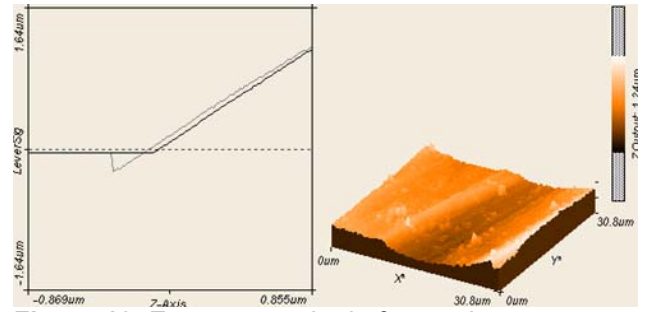


**Figura 16.** Espectroscopia de força e imagem, 8011 260°C/1hora





**Figura 17.** Espectroscopia de força e imagem, 8011 270°C/1hora

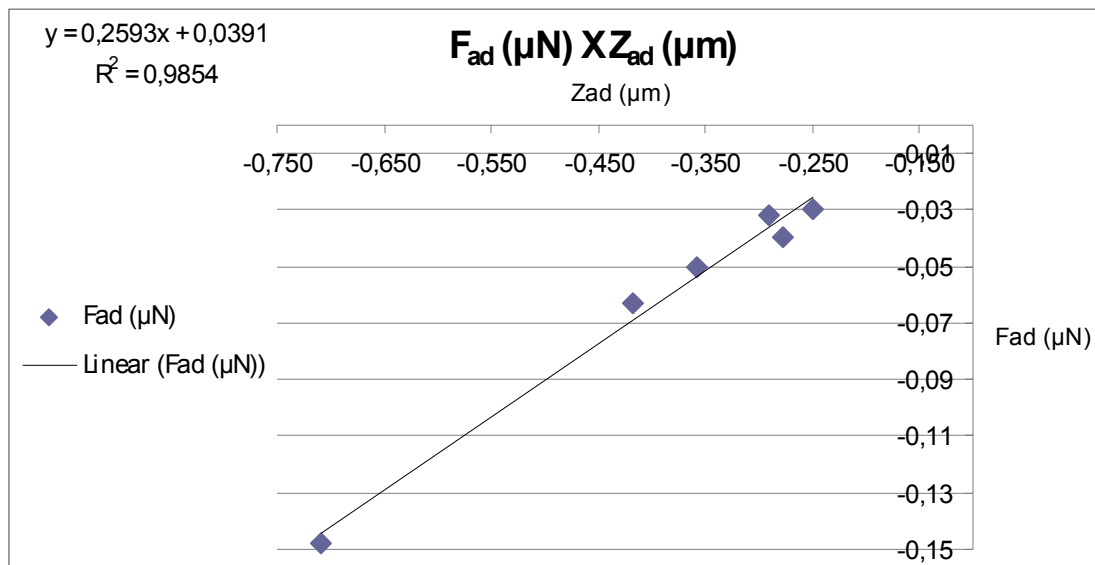


**Figura 18.** Espectroscopia de força e imagem, 8011 280°C/1hora

**Tabela 3:** Liga 8011 - Espectroscopia de força atômica

Temperatura (°C)	Z <sub>ad</sub> (μm)	F <sub>ad</sub> (μN)	Angulo <sub>fad</sub> (°)	Z <sub>at</sub> (μm)	F <sub>at</sub> (μN)	Angulo <sub>fat</sub> (°)
230	-0,418	-0,0629	47,87	-0,115	-0,0064	50,57
240	-0,290	-0,0321	51,57	-0,203	-0,0218	50,38
250	-0,250	-0,0295	58,75	-0,061	0,0013	49,92
260	-0,708	-0,1476	51,65	-0,075	-0,0013	49,77
270	-0,277	-0,0398	52,45	-0,082	-0,0013	49,12
280	-0,358	-0,0501	49,36	-0,115	-0,0090	49,04

A Figura 19 exibe a relação estreita entre a distância amostra-tip e a força de interação dada pela deflexão do cantilever no ponto de força considerada adesiva. O modelo matemático proposto na equação 1 possui R-quadrado de 0,985.



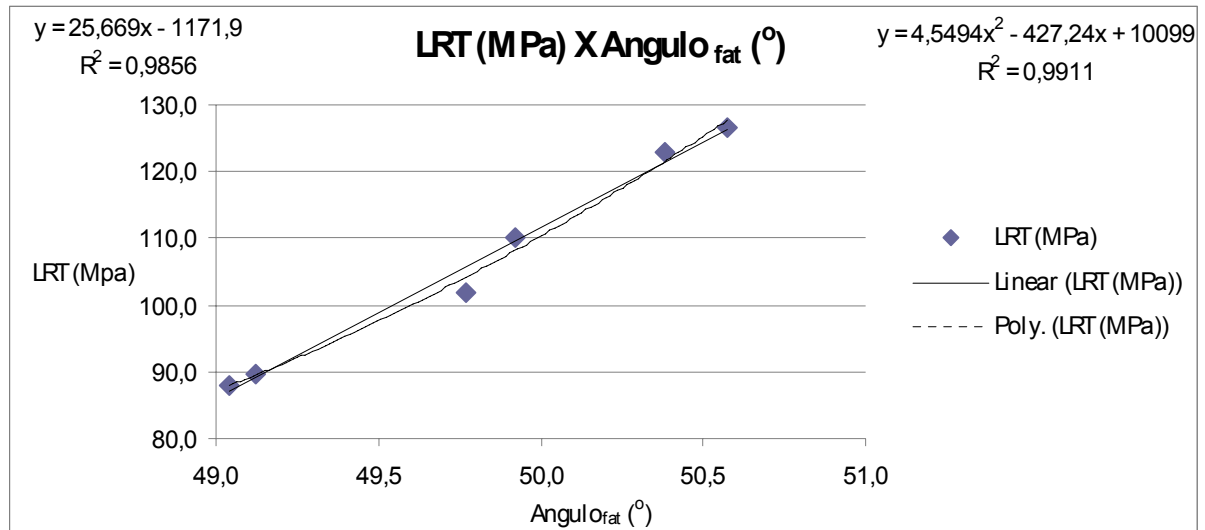
**Figura 19.** Liga 8011 Força<sub>Fad</sub> (μN) X Z<sub>Fad</sub> (μm)

$$F_{fad} = 0.259Z_{fad} + 0.0391 \quad (1)$$

Onde, F<sub>fad</sub> é a força em μN de interação entre o tip e a amostra no ponto de máxima força adesiva e Z<sub>fad</sub> é a distância relativa entre o tip e amostra, dado em μm, no ponto de máxima força adesiva.

Sugere-se reflexão sobre o resultado encontrado e exibido no gráfico 1 com as forças de interação discutidas na sessão 1.2.2. Em trabalhos posteriores, pretende-se explorar melhor tal resultado.

Por outro lado relacionando os resultados provenientes da espectroscopia de força atômica, coluna 7 da Tabela 3 (ângulo descrito entre o eixo x e a reta a partir da força máxima atrativa), com os resultados de LRT encontrados através dos ensaios de propriedades mecânicas (Tabela 2, coluna 2) a Figura 20 pode ser construída.



**Figura 20.** Liga 8011, LRT (Mpa) X Angulo<sub>fat</sub> (°)

$$\text{LRT} = 25,67 A_{\text{fat}} - 1171 \quad (2)$$

$$\text{LRT} = 4,549 (A_{\text{fat}})^2 - 427,2A_{\text{fat}} + 10099 \quad (3)$$

Onde, LRT é o Limite de Resistência a Tração, dado em MPa.  $A_{\text{fat}}$  é o ângulo definido entre o eixo horizontal e a reta a partir do ponto de máxima Força Atrativa, dado em graus (°).

Duas equações são propostas (2 e 3), sendo uma linear e outra polinomial. A equação 2 admite R-quadrado no valor do 0,985. Para a equação 3, o R-quadrado é de 0,991.

Vale ressaltar que a proposta deste trabalho é defender que existe uma relação entre esses parâmetros (LRT e Angulo<sub>fat</sub>) sem, contudo, ambicionar determinar um modelo matemático definitivo. Sobretudo, este trabalho sugere uma linha de estudo que almeja mudar a modo como propriedades mecânicas são determinadas.

#### 4 CONCLUSÃO

Os ensaios mecânicos, tais como limite de resistência atração, que procuram reproduzir os esforços que o material estará submetido são realizados pela humanidade desde os primeiros séculos depois de Cristo.<sup>(11)</sup> Até hoje tais testes, apesar de algumas modernizações, são realizados visando reproduzir a situação a qual estará exposto o material. Dessa forma, necessitam de altas cargas, bem como, são testes destrutivos, no sentido de que a amostra é consumida, tornando-se imprestável.

O presente trabalho defende uma linha de estudo, visando verdadeiras modificações nas formas pelas quais propriedades mecânicas são obtidas, baseando-se no conhecimento de metalurgia desenvolvido pela humanidade ao

longo de vários séculos em concomitância com as informações disponibilizadas através da nanociência e nanotecnologia.

Ficou claro pelos trabalhos desenvolvidos que relacionar a espectroscopia de força atômica com as propriedades mecânicas do alumínio é possível. Mesmo sendo necessário um estudo aprofundado e com maior quantidade de amostras, este trabalho estimula e indica que pesquisas avançadas neste sentido podem gerar bons resultados.

As expectativas para os próximos trabalhos vão desde repetir os experimentos, relacionando os resultados com outras propriedades mecânicas tais como: dureza e anisotropia até estender este estudo para outros materiais como: cerâmicas, polímeros e metais ferrosos.

## **Agradecimentos**

A Alcoa Alumínio S.A.

Em especial a Paulo Nakamichi e Eugênio Liborio.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Associação Brasileira do Alumínio, Disponível em <http://www.abal.org.br/aluminio>. Acesso em: 02 de Março de 2008.
- 2 SMITH, W., Extractive Metallurgy. Metals Engineering Institute. American Society for Metals, 1979.
- 3 TIMONSHEKO. Resistência dos Materiais. Livro técnico S.A., Vol 1, 1966.
- 4 Software Reference, By Nanosurf AG, Switzerland, Prod.: Bt00962, V2.3r2, January 2003.
- 5 Operating Instructions, By Nanosurf AG, Switzerland, Prod.: Bt00963, V2.3r1. January 2003.
- 6 FERREIRA, A. A. P. E YAMANAKA, H. Microscopia de Força Atômica Aplicada Em Imunoensaios. *Quim. Nova*, Vol. 29, No. 1, 137-142, 2006.
- 7 CALLISTER, W.D., Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.
- 8 ASTM B 557. Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum – and Magnesium Alloy Products, 2006.
- 9 ASTM E8M-01. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2002.
- 10 ABNT NBR 6834:2006 Alumínio e suas ligas – Classificação da Composição Química.
- 11 Latin American Antiquity, Vol 11, No 2, PP. 193-195, 2000.