

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA AL-3NI EM PÓ CONSOLIDADA POR EXTRUSÃO¹

Mauricio Mhirdauí Peres²
Conrado Rodrigues M Afonso³
José Eduardo Spinelli³
Walter José Botta Filho³
Alberto Moreira Jorge Junior³

Resumo

Ligas de alumínio próxima ao eutético Al-6Ni (% em peso) têm sido extensivamente investigadas a fim de se obter uma estrutura com matriz de alumínio alfa e partículas sólidas de Al₃Ni. Entretanto, poucos estudos têm sido realizados sobre as ligas de Al-Ni hipoeutéticas. Este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito do tamanho do pó na microestrutura e nas propriedades mecânicas de lingotes obtidos por extrusão a quente da liga hipoeutética Al-3Ni (% em peso). A liga foi produzida por atomização à gás e peneirada sob duas faixas de tamanho de partículas (faixa menor que 45 µm e faixa entre 106 -180 µm), sendo cada produto consolidado por extrusão à 350 °C com velocidade de 5 mm.min⁻¹ e razão de extrusão de 10:1. A microestrutura foi analisada via difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e de transmissão e correlacionada com as propriedades mecânicas resultantes. A tensão de escoamento média (150,6 MPa) obtida é três vezes superior à de uma liga similar processada convencionalmente, conseqüente do alto refinamento estrutural e da presença de precipitados ultra-finos de Al₃Ni. Apesar dos lingotes produzidos a partir das duas faixas granulométricas de pó apresentarem comportamento mecânico muito próximo em relação à tensão de escoamento e à tensão de ruptura, os provenientes do tamanho de partícula menor que 45µm promoveram ductilidade média superior em relação aos obtidos a partir de partículas de pó mais grosseira, sendo 8,1% contra 6,5% respectivamente.

Palavras-chave: Al-Ni; Extrusão; Nanoestrutura; Propriedades mecânicas.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF CONSOLIDATED AL-3NI EXTRUDED POWDER ALLOY

Abstract

Aluminium alloys with composition similar to the eutectic Al-6Ni (wt%) have been extensively investigated in order to obtain an attractive structure comprising the ductile aluminum matrix and hard particles of the Al₃Ni phase. However, few studies have been conducted on the range of hypoeutectic Al-Ni alloys. The aim of this work was to analyze the effect of the powder size on the microstructure and on the mechanical properties of hot extruded hypoeutectic Al-3.5Ni (wt%) alloy. Powders of such hypoeutectic alloy were produced by gas atomization and then it was sieved and classified in two particle size ranges (particle size less than 45µm; and particle size less than 180µm and higher than 106 µm) and consolidated by hot extrusion at 350°C with ram speed of 5 mm.min⁻¹ and extrusion ratio of 10:1. The microstructure of the extruded component were analyzed by X-Ray Diffraction, Scanning Electron microscopy and Transmission Electron Microscopy and correlated with the resultant mechanical properties. The average yield stress obtained (150.6 MPa) is around 3 times higher than that found in a similar conventionally processed Al-Ni alloy, a result of the high structural refinement and the presence of ultra-fine Al₃Ni precipitates. Despite the ingots produced from the two different powder particle sizes presented mechanical behavior very close relative to the yield strength and to the tensile strength, the ingots originating from the powder particle size less than 45µm promoted higher ductility compared to the ingot processed from the coarser powder, being 8.1% versus 6.5% respectively.

Keywords: Al-Ni; Extrusion; Nanostructure; Mechanical properties.

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

² Dr. Professor. Depto. Eng. Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Campus Universitário Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. E-mail: mauricioperes@ct,ufrn.br.

³ Dr. Professor. Universidade Federal de São Carlos, Dpto. Engenharia de Materiais. São Carlos, SP., Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Ligas de alumínio-níquel com composição eutética (Al-6Ni, % em peso) têm sido extensivamente investigadas buscando-se a obtenção de uma estrutura constituída pela matriz dúctil de alumínio alfa (Al- α) associada à presença de partículas duras de Al₃Ni.⁽¹⁾ O desenvolvimento nessas ligas de microestruturas que possibilitem a otimização das propriedades mecânicas geralmente é dependente do processo de solidificação, mesmo quando processos subsequentes são realizados para a obtenção de um produto. Uma estratégia lógica para obter o aumento da resistência mecânica sem que ocorra perda de ductilidade (plasticidade) é a adição de metais de transição, tais como o zircônio e o escândio. Porém, nesse caso deverá ser levado em conta o custo adicional desses elementos, tanto para o zircônio como principalmente para o escândio.

As ligas Al-Ni hipoeutéticas obtidas no estado bruto de fusão apresentam estruturas compostas pela formação de uma matriz dendrítica rica em alumínio (fase Al- α) rodeada por uma estrutura eutética composta pela fase Al- α e pela fase intermetálica Al₃Ni. Nesse caso, a combinação de uma estrutura refinada com uma fração considerável de partículas de intermetálicos Al-Ni pode resultar em uma maior dureza, e, conseqüentemente, em uma maior resistência mecânica.⁽²⁾ Componentes automotivos, tais como biela, luva de cilindro, pistão, válvula de retenção, bem como partes de compressores tais como palhetas de compressor rotativo e sapata do disco, podem ser produzidos com ligas Al-Ni, justificando um enorme potencial para a realização de pesquisas visando o desenvolvimento de processos que otimizem as propriedades mecânicas dessas ligas.⁽³⁾

Materiais de uso comercial, apresentando baixa porosidade e resistência mecânica apreciavelmente alta podem ser produzidos numa primeira etapa por solidificação rápida seguida de uma etapa de consolidação por extrusão. Ligas de alumínio em pó podem ser facilmente consolidadas por extrusão à quente até que uma densificação completa seja atingida. uma das rotas indicadas para a obtenção de uma estrutural com partículas de intermetálicos altamente refinadas em ligas metálicas é o processo de conformação por spray. Esse processo se baseia pela solidificação rápida de finas partículas do metal líquido que é atomizada na forma de um spray através do impacto que recebe pela incidência de um fluxo de um gás inerte.^(4,5) As partículas de pó que não são incorporadas no depósito são coletadas e denominadas de *overspray* e geralmente abrangem cerca de 20% do peso total do material processado. O arranjo microestrutural desejado nessa etapa é principalmente afetada pela composição da liga e pelo tamanho das partículas de pó, onde a cinética de solidificação influencia significativamente na nucleação e crescimento de grão da estrutura resultante nas partículas de pó. Além disso, ligas de alumínio em pó atomizadas usualmente permitem a formação de solução sólida supersaturada devido à altíssima taxa de resfriamento intrínseco ao processo. Um estudo recente⁽⁶⁾ reportou uma liga de Al-Ni contendo teor de 1,5% atômico de Ni (~3,0% em peso) em solução sólida supersaturada na matriz Al- α devido à condição de uma têmpera rápida promovida durante a atomização da liga hipoeutética Al-5Ni (% em peso). A solubilidade sólida do níquel na fase Al- α é muito limitada na condição de equilíbrio termodinâmico, sendo de apenas 0,023% atômico de Ni (~0,05% em peso). Um subsequente recozimento pode iniciar a decomposição da solução sólida supersaturada com a precipitação de intermetálicos ricos em níquel.

A dependência entre o limite de resistência, a tensão de escoamento e a deformação com os espaçamentos dendríticos primário e secundário está bem

estabelecida para ligas de Al-Ni hipoeutéticas solidificadas direccionalmente.⁽⁷⁾ Tanto a magnitude da estrutura dendrítica como o teor de soluto afetam as propriedades de deformação plástica em ligas Al-Ni. Menores espaçamentos dendríticos permitem uma melhor distribuição das partículas do intermetálico Al₃Ni na região eutética interdendrítica, composta pelas partículas duras Al₃Ni e pela fase dúctil Al- α , de forma que promove uma melhor atuação como partículas de reforço nessa região, melhorando a resistência mecânica o material.

Muito pouco tem sido publicado a respeito de ligas binárias hipoeutéticas Al-Ni solidificadas rapidamente e suas propriedades mecânicas, ou seja, para faixas composicionais com teor de Ni inferior à composição eutética. Há também uma ausência de análises experimentais sobre o efeito do tamanho das partículas de pó de ligas Al-Ni atomizadas em estruturas consolidadas (tanto por conformação à frio como à quente), assim como as características microestruturais possíveis e suas propriedades mecânicas. Sivtsova, Neumerzhitskaya e Shepelevich⁽⁸⁾ compararam a estrutura e as propriedades de folhas de ligas Al-Ni e Al-Ni-Cr resfriadas rapidamente por têmpera. A superfície das folhas de uma liga Al-0,6Ni (% atômica) apresentou estrutura celular após ser submetida à taxa de resfriamento de aproximadamente 10⁶ °C/s pelo processo *Melt Spinning*. Essa liga apresentou redução da microdureza com o aumento da temperatura de recozimento. Isso foi também observado para temperatura de recozimento na faixa de 260 a 380°C, ocorrendo uma precipitação adicional de finas partículas de Al₃Ni a partir da solução sólida supersaturada. Wada, Meguro e Sakamoto⁽⁹⁾ analisaram a resistência mecânica de ligas de Al-Ni hipoeutéticas para supercondutores estabilizados com alumínio. A liga Al-2Ni (% em peso) apresentou tensão de escoamento de 120MPa após tratamento térmico de precipitação à 430°C.

Uan, Chen e Lu⁽¹⁰⁾ promoveram a extrusão à quente (200-400°C) da liga eutética Al-6Ni solidificada rapidamente por fundição direccional, usando razão de extrusão de 36:1 e velocidade do punção de 40 cm.min⁻¹. Foram obtidos subgrãos aproximadamente equiaxiais com tamanho médio de 1,14 ± 0,23 μ m e de 1,56 ± 0,30 μ m para os lingotes extrudados à 200°C e à 400°C respectivamente. Os intermetálicos Al₃Ni apresentaram formato de bastonetes em ambas as condições de processamento, sendo distribuídos completamente de forma intergranular para o lingote consolidado à 200°C e distribuído parcialmente inter e intragranularmente no lingote consolidado à 400°C. Como resultado final, o lingote consolidado à 200°C apresentou tensão de escoamento superior em relação ao consolidado à 400°C, sendo 156MPa e 118MPa respectivamente.

O efeito do tamanho do pó no comportamento sob extrusão da liga Al_{88,7}Ni_{7,9}Mn_{3,4} preparada por atomização com nitrogênio gasoso seguido por compactação/desgaseificação e extrusão à quente, foi analisado por Hong e Chun.⁽¹¹⁾ A extrusão foi realizada à 400°C com redução de área de 25:1 e velocidade do punção de 5 mm.s⁻¹. Os valores de dureza variaram dependente da faixa de tamanho de partícula de pó usada, sendo que o uso de partículas de pó menores promoveu o aumento da dureza do material extrudado. Partículas de pó com tamanho abaixo de 26 μ m apresentaram a formação de grãos nanonocristalinos de Al- α juntamente com uma matriz amorfa.

Jorge Junior et al.⁽¹²⁾ analisaram o efeito dos parâmetros de processo na microestrutura e nas propriedades mecânicas de lingotes consolidados por extrusão provenientes de ligas nanoestruturadas em pó de Al-3Fe e de Al-4,5Cu. O uso apropriado dos parâmetros de processo, tais como a temperatura de extrusão e a taxa de deformação, associado com a presença de finos precipitados foi

determinantes para o controle do crescimento de grão da matriz de Al- α durante a consolidação a quente promovendo propriedades mecânicas superiores em relação à ligas similares processadas convencionalmente, obtendo-se tensão de compressão de aproximadamente de cerca de 400MPa.

O presente trabalho teve por objetivo analisar o efeito de duas faixas distintas de tamanho de partícula de pó em produtos consolidados por extrusão a quente da liga hipoeutética Al-3Ni (% em peso). Para isso, o processamento dos lingotes envolveu uma primeira etapa de geração de pó metálico por atomização com nitrogênio gasoso, seguida de peneiramento, compactação e consolidação final por extrusão à quente. Sendo selecionada uma faixa de tamanho de partícula de pó menor que 45 μ m e outra faixa de tamanho entre 106 a 180 μ m, enquanto que os parâmetros de processo de extrusão foram mantidos constantes, tais como a temperatura, a velocidade do punção e a razão de extrusão. Uma correlação entre as características microestruturais e as propriedades mecânicas resultantes por ensaio de tração (tensão de escoamento, limite de resistência e deformação) em cada lingote foi analisada.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Processo de Consolidação

Foi realizado o processo de solidificação rápida por atomização gasosa para a preparação da liga Al-3Ni (% em peso), onde o vazamento controlado do metal líquido passa por um fluxo de gás inerte, formando-se um spray com partículas de tamanhos diversos, que se solidificam com taxa de resfriamento entre 10³ e 10⁶ °C/s relativo ao diâmetro de cada partícula de pó. Uma carga contendo cerca de 2,0 (\pm 0,1) kg da liga hipoeutética Al-3Ni (% em peso) foi preparada através de lingotes de alumínio e de níquel de pureza comercial,⁽⁸⁻⁹⁾ utilizando-se Al (99,887% em peso) e Ni (99,896% em peso). O teor (% em peso) de impurezas da composição final Al-3Ni obtida foi: Fe (0,059%), Si (0,042%), Sn (0,0073%), Ni (0,0057%) and Pb (0,0027%). Sendo outros elementos com teores abaixo de 100 ppm.

A liga fundida foi vazada por um orifício com 6,0 mm de diâmetro com temperatura 10% acima da temperatura de fusão (cerca de 713 °C). Um fluxo de nitrogênio gasoso (N₂) gerado pela incidência do gás através de dois sistemas paralelos de pressão, 4,0 e 8,0 Bar (0,4 and 0,8 MPa) foi usado para a formação do spray. Todo o pó gerado foi coletado, peneirado e classificado em duas faixas de tamanho de partículas: tamanho de partícula menor que 45 μ m (faixa d1); e tamanho de partícula entre 106 μ m e 180 μ m (faixa d2).

Compactação à temperatura ambiente (25°C) foi efetuada aplicando-se tensão uniaxial de 600 (\pm 5) MPa produzindo pré-formas cilíndricas com diâmetro de 25,0 (\pm 0.2) mm e peso de 20,0 (\pm 0.2) gramas. Essa etapa foi realizada sem a necessidade de encapsulamento e sob atmosfera ambiente.

As pré-formas cilíndricas foram então consolidadas por extrusão à 350°C, com velocidade do punção de 5 mm.s⁻¹ e razão de extrusão de 10:1, resultando em lingotes cilíndricos compactos com diâmetro de 7,9 (\pm 0.2) mm.

2.2 Caracterização Microestrutural

Cada amostra cilíndrica foi polida e atacada quimicamente com solução de 0,5% de ácido fluorídrico solubilizado em água. A análise microestrutural foi

realizada através de: um Microscópio Eletrônico de Emissão de Campo (FEG) Philips modelo XL30-FEG; um Difratômetro de Raios-X (DRX) Siemens D5000 com radiação Cu-K α de comprimento de onda $\lambda = 0,15406$ nm e ângulo de varredura 2θ de 20° a 90°; um Microscópio Eletrônico de Transmissão FEI TECNAI G² F20 de 200kV acoplado com detector de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) modelo EDAX SUTW (janela super ultrafina) e um detector de campo escuro anular com alto ângulo (HAADF) modelo Fischione Model 3000.

2.3 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos lingotes consolidados provenientes de pós de ligas de Al-3Ni nanoestruturadas foram determinadas por ensaios de tração à temperatura ambiente (25°C) em um equipamento de ensaios universal Instron modelo 1k-16 com célula de carga de 25 toneladas de capacidade, sob uma velocidade de tração de 1,0 mm/minuto. Os corpos de prova foram usinados com seção transversal cilíndrica com diâmetro de 3,5mm e comprimento útil de 5,0 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Consolidação por Extrusão à Quente

O comportamento mecânico da liga Al-3Ni em pó durante cada consolidação à quente apresentou maior tensão de resistência à extrusão para a liga processada a partir da faixa de pó mais fina ($d_1 < 45\mu\text{m}$) em relação à mesma processada a partir do pó mais grosseiro ($106\mu\text{m} < d_2 < 180\mu\text{m}$), de aproximadamente 378 MPa contra 345 MPa respectivamente. Isso ocorre devido à tendência de partículas menores geradas por atomização resfriarem mais rapidamente, com isso induzirem à uma maior taxa de nucleação dos grãos cristalinos e por consequência apresentarem maior refinamento estrutural, ou seja, promovendo maior dureza dessas partículas e maior resistência à deformação quando submetidas ao processo de extrusão.

3.2 Caracterização Microestrutural

A Figura 1 mostra os difratogramas obtidos por Difração de Raios-X (DRX) da liga Al-3Ni em pó e dos lingotes consolidados por extrusão. Em todos os casos, além dos picos referentes à fase matriz Al- α (cúbica de face centrada), foi detectado também picos de difração do intermetálico Al₃Ni.

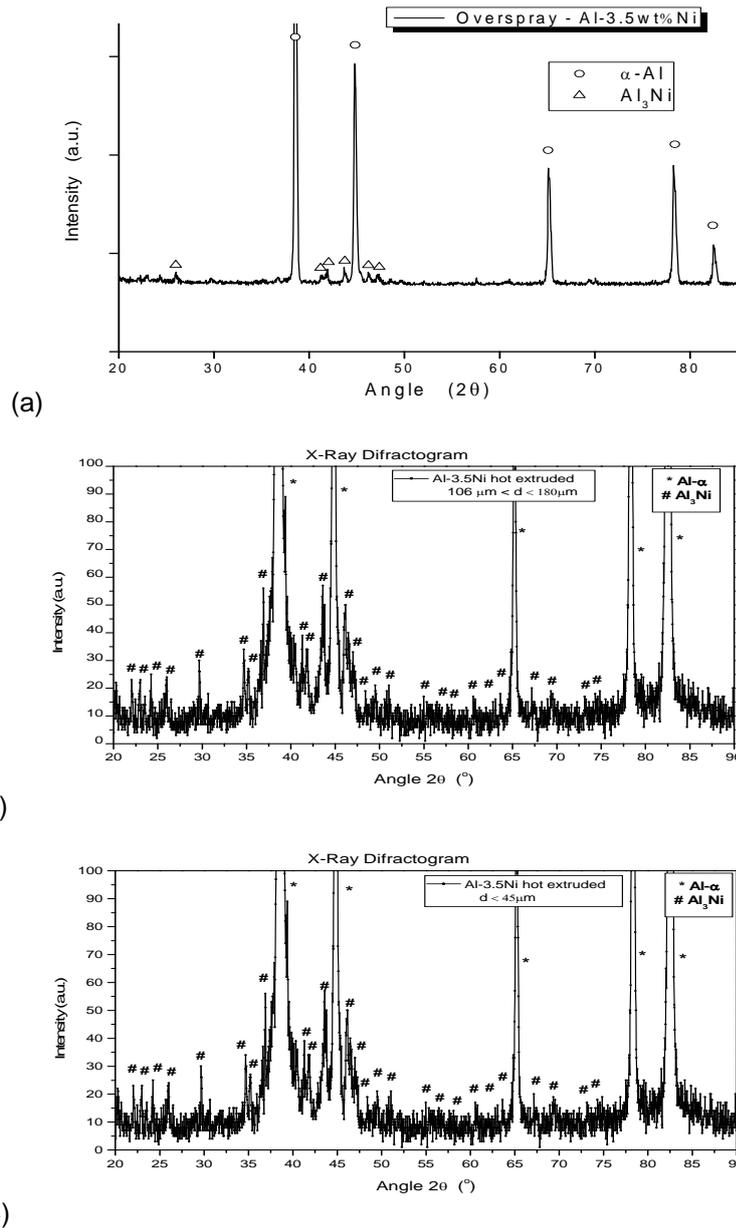


Figura 1. Difração de Raios-X (DRX) da liga Al-3Ni : (a) pó; (b) lingote extrudado proveniente de pó com tamanho de partícula entre 106 μ m e 180 μ m; (c) lingote extrudado proveniente de pó com tamanho de partícula menor de 45 μ m.

A Figura 2 mostra imagens de microscopia eletrônica de transmissão (MET) sob diferentes modos de detecção com o objetivo de apresentar em maiores detalhes os aspectos microestruturais da liga Al-3Ni consolidada por extrusão. A Figura 2.a mostra uma imagem obtida por MET em campo claro (BF) contendo precipitados do intermetálico Al₃Ni localizados em contornos de grão (BG) da fase Al- α , além do padrão de difração por área selecionada (SAD) do precipitado orientado no eixo zonal [1 1 2]_{Al₃Ni}. A Figura 2.b mostra uma micrografia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM) da região selecionada na Figura 2.a, destacando a presença de precipitados ultra finos do intermetálico Al₃Ni sob uma escala de ordem nanométrica da ordem de 3 nm, e, respectivamente, uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) indicando pontos de difração com d = 0.36 nm (0 2 0). A Figura 2.c mostra uma imagem de campo escuro anular de alto ângulo no modo de microscopia eletrônica de transmissão/varredura (HAADF-STEM) com

grãos micrométricos de Al- α e partículas nanométricas de precipitados Al₃Ni presentes tanto em contornos de grão como no interior dos grãos de Al- α , mostrando também o padrão SAD (pequena abertura de área selecionada) orientada no eixo zonal [1 1 1]_{Al- α} . Na sequência, a Figura 2.d mostra um mapeamento elementar por raios-X do Ni-K indicando alta concentração de Ni nos precipitados nanométricos de Al₃Ni presentes tanto nos contornos de grão como dentro dos grãos de Al- α .

3.3 Comportamento Mecânico e Análise Fractográfica

As Figuras 3.a e 3.b mostram o comportamento mecânico sob ensaio de tração dos lingotes obtidos por consolidação por extrusão à quente. Os valores médio obtidos para o lingote consolidado a partir da faixa de pó mais fina ($d_1 < 45\mu\text{m}$) indicaram tensão de escoamento de 150,6 MPa, limite de resistência de 188,2 MPa e deformação de 8,1%, valores discretamente superiores aos apresentados pelo lingote consolidado a partir da faixa de pó mais grosseira (d_2 entre $106\mu\text{m}$ e $180\mu\text{m}$), com tensão de escoamento de 150,5 MPa, limite de resistência de 185,7 MPa e deformação de 6,1%. Os valores obtidos mostram que a rota de processamento adotada para o processo de consolidação a quente para a consolidação do liga Al-3Ni nanoestruturada em pó foi muito efetiva para ambas as faixas de tamanho de pó escolhidas e promoveram tensão de escoamento aproximadamente três vezes superior em comparação com o apresentado nas ligas similares processadas convencionalmente, de acordo com um estudo conduzido por Cante et al.⁽⁷⁾

É importante destacar que os valores da tensão de escoamento e do limite de resistência obtidos para o lingote proveniente do pó mais fino e do pó mais grosseiro apresentam diferença quase que insignificante, de modo que pode-se afirmar que para os parâmetros de consolidação adotados, a diferença no tamanho médio do pó inicial não afetaram significativamente as propriedades mecânicas em termos de resistência e dureza do produto consolidado. Porém, um importantíssimo fator deve ser destacado em relação ao significativo ganho de ductilidade que o uso do pó mais fino ($d_1 < 45\mu\text{m}$) promoveu nas propriedades mecânicas resultantes do lingote consolidado, sendo sua deformação até a ruptura 33% superior em relação ao lingote consolidado a partir do pó mais grosseiro (deformação de 8,1% contra 6,1% respectivamente). Com isso, há um influência direta no ganho de tenacidade do material, ou seja, uma maior capacidade em absorver energia mecânica de deformação sem se romper, o potencializando para aplicações estruturais.

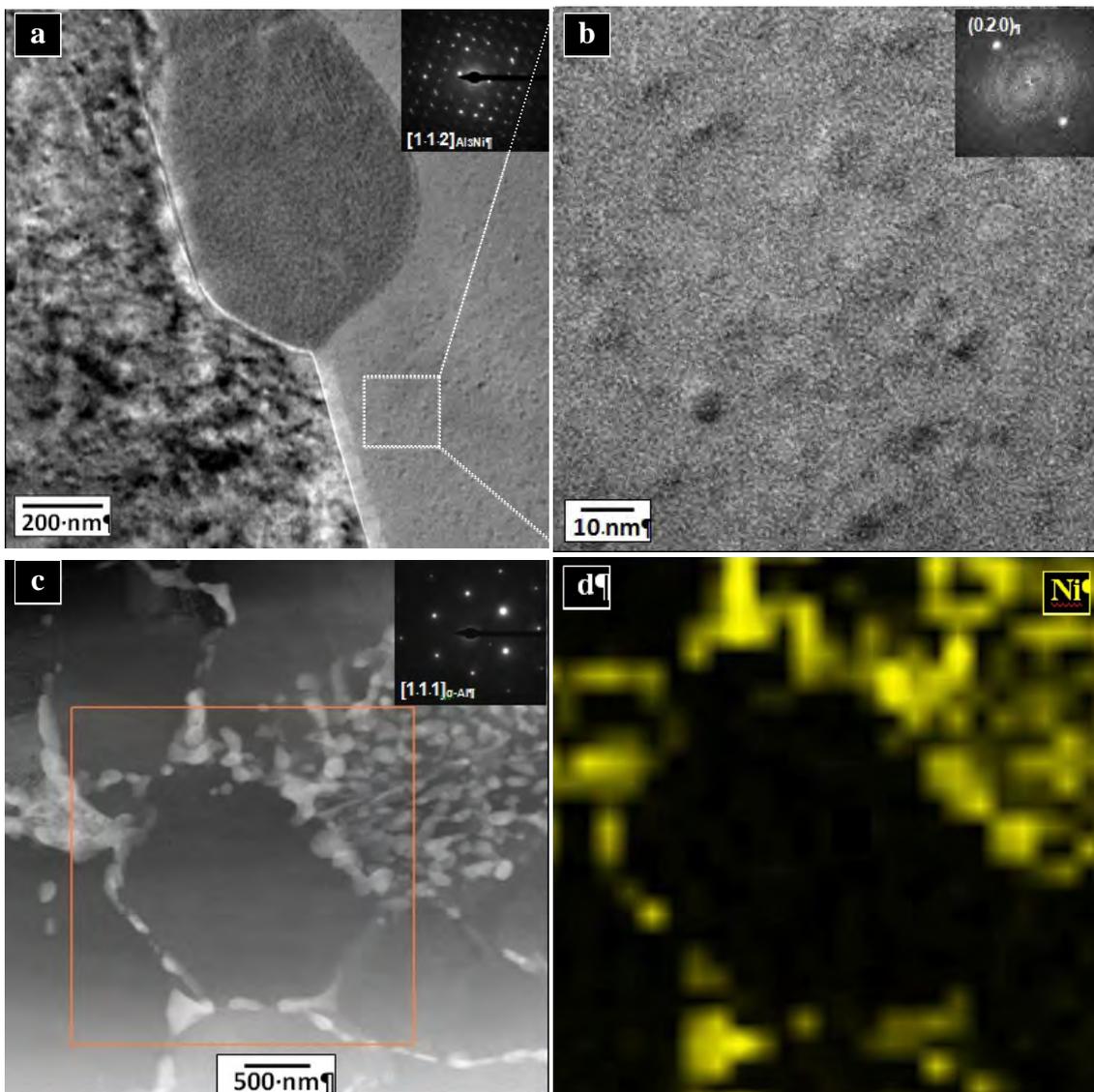


Figura 2. Imagens de MET dos lingotes extrudados: **(a)** campo claro (BF), precipitados do intermetálico Al_3Ni em contornos de grãos da matriz $\text{Al}-\alpha$; **(b)** imagem em alta resolução (HRTEM) destacando precipitados nanométricos ultrafinos de Al_3Ni ; **(c)** imagem de alto ângulo anular em campo escuro (HAADF-STEM) com grãos micrométricos de $\text{Al}-\alpha$ e grãos nanométricos de precipitados de Al_3Ni ; **(d)** Mapeamento por raios-X de Ni-K indicando maior concentração de níquel nos intermetálicos nanométricos de Al_3Ni tanto nos contornos de grão como no interior dos grãos de $\text{Al}-\alpha$.

Na Figura 4a pode ser observado a superfície de fratura após ruptura sob tração do lingote consolidado a partir do pó mais fino ($d_1 < 45\mu\text{m}$), enquanto na Figura 4b observa-se a superfície de fratura do lingote consolidado a partir do pó mais grosseiro (d_2 entre 106 e $180\mu\text{m}$). Em ambos os casos há uma clara indicação da ocorrência de fratura dúctil com a presença marcante de depressões denominadas por *Dimples*, promovida por mecanismo de deformação plástica através dos grãos da matriz $\text{Al}-\alpha$. Outro fator relevante é a presença de partículas de pó que se mantiveram intactas na superfície de fratura, sendo um indicativo de que a consolidação das partículas de pó não foi efetivada completamente. Comparando-se os dois materiais consolidados, o lingote proveniente do pó mais grosseiro apresentou *Dimples* maiores em relação ao lingote proveniente do pó mais fino. Isso se justifica pela presença do tamanho médio de partículas de pó ser maior para o

primeiro caso, ocasionando maior deficiência de coesão e adesão entre as interfaces de cada partícula e promovendo menor efetividade do processo de consolidação à quente do pó. Essa característica pode ter contribuído de forma mais evasiva na formação de defeitos microestruturais que tenham prejudicado as propriedades mecânicas do lingote consolidado a partir do pó mais grosseiro em relação ao consolidado do pó mais fino.

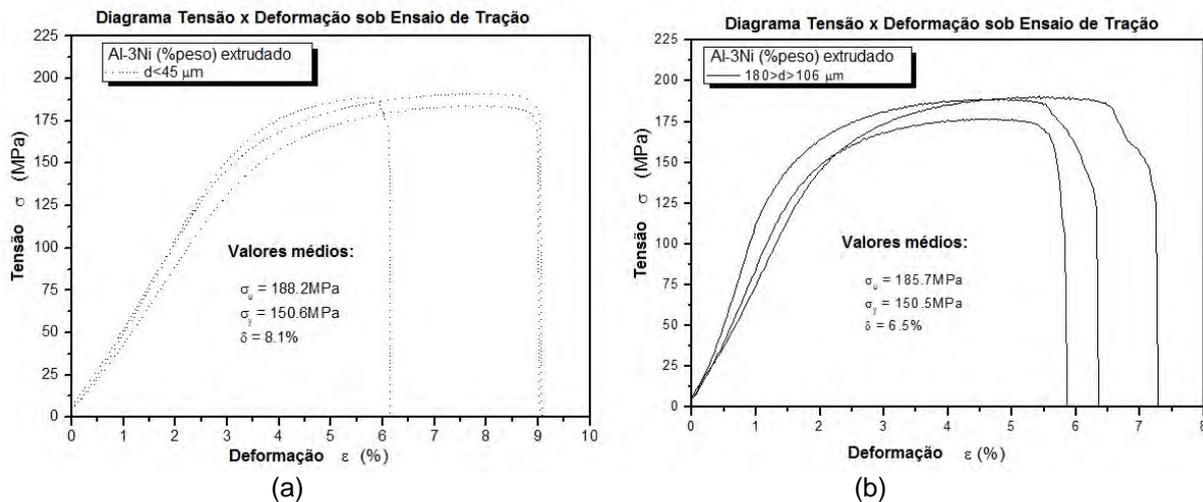


Figura 3. Diagramas tensão x deformação mostrando o comportamento sob tração dos lingotes extrudados provenientes da liga Al-3Ni em pó nas faixas de tamanho (a) entre 106-180 μm; e (b) menor que 45 μm.

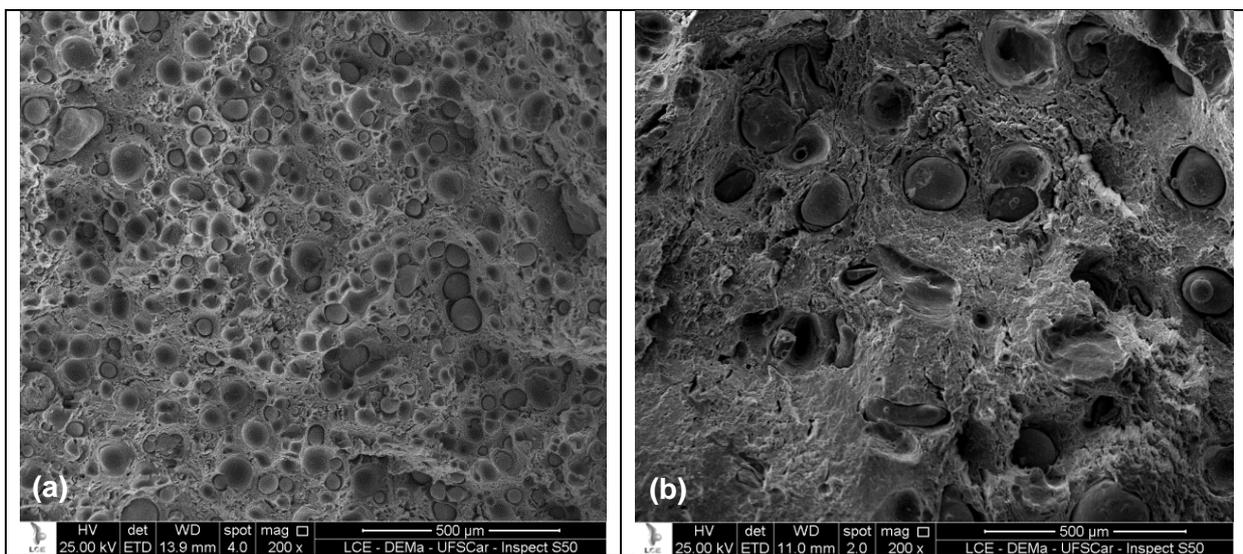


Figura 4. Imagens de MEV mostrando a superfície de fratura dos lingotes extrudados de Al-3Ni após ruptura sob ensaio de tração: (a) lingote proveniente do pó com tamanho menor que 45 μm; (b) lingote proveniente do pó com tamanho entre 106 μm e 180 μm.

4 CONCLUSÕES

- Em termos gerais, os parâmetros de processo usados para a consolidação da liga Al-3Ni em pó foram efetivos em promover lingotes com tensão de escoamento de 150,6 MPa, cerca de três vezes superior que o obtido por uma liga Al-Ni similar processada convencionalmente ⁽⁷⁾, comportamento esse relacionado ao alto refinamento estrutural dos grãos da matriz da fase

alumínio alfa associado com a presença de precipitados ultra finos do intermetálico Al₃Ni.

- Apesar dos lingotes extrudados da liga Al-3Ni processados a partir de duas faixas diferentes de tamanho de partículas de pó (faixa menor que 45µm e faixa entre 106 e 180µm) terem apresentado valores muito próximos de tensão de escoamento e de limite de resistência sob tração, houve uma melhora significativa da ductilidade para o lingote proveniente do pó mais fino em relação ao originário do pó mais grosso, com deformação sob tração de 8,1% e 6,5% respectivamente, promovido pelo maior refinamento de grão e dos precipitados intermetálicos de Al₃Ni no primeiro caso.

Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq, a Capes e a Fapesp (Fundação de Pesquisa Científica do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

- 1 BELOV, N.A.; ALABIN, A.N.; ESKIN, D.G. Improving the properties of cold-rolled Al-6%Ni sheets by alloying and heat treatment, *Scripta Materialia* 50 (2004) 89–94
- 2 SILVA, B.; ARAUJO, I.; SILVA, W.; GOULART, P.; GARCIA, A.; SPINELLI, J. E. Correlation between dendrite arm spacing and microhardness during unsteady-state directional solidification of Al-Ni alloys. *Philosophical Magazine Letters* 91 (2011) 337-343.
- 3 HUNT JR., W.H. J. New directions in aluminum : Based P/M materials for automotive application. *Powder Metall.* 2000; 36 (6): 51–60.
- 4 CATTO, F.L.; YONAMINE, T.; KIMINAMI, C.S.; AFONSO, C.R.M.; BOTTA. W.J.; BOLFARINI, C. Amorphous phase formation by spray forming of alloys [(Fe0.6Co0.4)0.75B0.2Si0.05]96Nb4 and Fe66B30Nb4 modified with Ti. *J Alloys Compd* 2011; 509: S148-S154.
- 5 LAVERNIA, E.J.; BARAM, J.; GUTIERREZ, E. Precipitation and excess solid solubility in magnesium-aluminum-zirconium and magnesium-zinc-zirconium processed by spray atomization and deposition. *Materials Science Engineering. A* 1991; 132: 119-133.
- 6 Submetido ao *Materials Research*.
- 7 CANTE, M. V.; SPINELLI, J. E.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. The Correlation Between Dendritic Microstructure and Mechanical Properties of Directionally Solidified Hypoeutectic Al-Ni Alloys. *Metals and Materials International*, 16, p. 39-49, 2010.
- 8 SIVTSOVA, P. A.; NEUMERZHITSKAYA, E. YU.; SHEPELEVICH, V. G. Comparison of the Structures and Properties of Binary and Ternary Melt-Quenched Al-Ni-Cr Alloys, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, No. 4, pp. 327–330
- 9 WADA, K.; MEGURO, S.; SAKAMOTO, H. High-strength and high-RRR Al-Ni alloy for aluminium-stabilized superconductor, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 10 (2000) 1012-1015.
- 10 UAN, J.Y.; CHEN, L. H.; LUI, T. S. On the extrusion microstructural evolution of Al-Al₃Ni in situ composite, *Acta Materialia* 49 (2001) 313-320.
- 11 HONG, S.J.; CHUN, B.S. Extrusion behavior of gas atomized nanostructured Al_{88.7}Ni_{7.9}Mn_{3.4} alloy powders, *Materials Science and Engineering A* 348 (2003) 262-270
- 12 JORGE JR, A.M.; PERES, M.M.; FOGAGNOLO, J.B.; KIMINAMI, C.S.; BOLFARINI, C.; BOTTA, W.J. Hot Extrusion of Nanostructured Al-Powder Alloys: Grain Growth Control and Process Parameters Effect on Their Microstructure and Mechanical Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 40A (2009) 3314-3321.