



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS**



GABRIELLA CAMARGO DAROQUE

**CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO
COMPÓSITO METAL-METAL AL/CU PRODUZIDO VIA
METALURGIA DO PÓ.**

Limeira
2017



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS**



GABRIELLA CAMARGO DAROQUE

**CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO
COMPÓSITO METAL-METAL AL/CU PRODUZIDO VIA
METALURGIA DO PÓ.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Manufatura à
Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade
Estadual de Campinas.

Orientador(a): Professor Dr. Wislei Riuper Ramos Osório

Limeira
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
 Universidade Estadual de Campinas
 Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
 Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

D251c Daroque, Gabriella Camargo, 1993-
 Caracterização da microestrutura do compósito metal-metal Al/Cu produzido via metalurgia do pó / Gabriella Camargo Daroque. – Limeira, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Wislei Riuper Ramos Osório.
 Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Tecnologia. 2. Manufatura. 3. Metalurgia. 4. Metais. 5. Cobre. I. Osório, Wislei Riuper Ramos, 1974-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Microstructural characterization of metal-metal Al/Cu composite manufactured by powder metallurgy

Palavras-chave em inglês:

Technology
 Manufacturing
 Metallurgy
 Metal
 Copper

Titulação: Bacharel em Engenharia de Manufatura

Banca examinadora:

Wislei Riuper Ramos Osório [Orientador]
 Ausdinir Danilo Bortolozo

Data de entrega do trabalho definitivo: 27-11-2017

À minha família, amigos e a todos que me auxiliaram na caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais e minhas irmãs, os quais sempre moveram montanhas para me proporcionar tudo do bom e do melhor, me incentivaram não somente na pesquisa, mas em todos os momentos. Mostraram o melhor caminho e a ter pé no chão, me criaram, guiaram, brigaram, enfim, fizeram eu ser quem sou hoje.

Aos meus amigos mais próximos e que também são parte da minha família, Julia Thomasella, Marina Tomazela, Luisa Abrahão, Rebeca Alleoni, os quais fazem parte de grande parte da minha evolução como pessoa e profissional.

Por fim ao meu orientador na pesquisa, Wislei Riuper Osório, pela oportunidade, auxílio e suporte necessário durante todo o processo. Juntamente agradeço ao Rodrigo Bonatti, Diego Costa, Luiz A. Garcia e ao professor Ausdinir Bortolozo, pelo suporte e auxílio durante toda a pesquisa e experimentos realizados.

DAROQUE, Gabriella. Título: Caracterização da microestrutura do compósito metal-metal Al/Cu produzido via metalurgia do pó. Ano 2017.35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Manufatura) – Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2017.

RESUMO

A busca por novos materiais nas áreas automotivas, aeronáuticas e aeroespaciais é cada vez maior com intuito de melhorar a performance, mas sem perdas nas propriedades essenciais. Pensando nessa situação voltada para área automotiva e aeroespacial, foi feito um estudo inexistente na literatura voltado para a metalurgia do pó com liga metal-metal, de Al e Cu, com diferentes concentrações de cobre (2 e 4%). As ligas de alumínio e seus compósitos apresentam menor massa específica quando comparados a outros materiais metálicos e cerâmicos, e o cobre possui raio atômico próximo do Al, possibilita a formação de solução sólida substitucional. As amostras foram feitas na mesma carga de compactação de 7,5 toneladas (~240 MPa e ~625 MPa, dependendo do formato do c.p. utilizado) e com sinterizações a 560 °C, com 1 e 2 horas de forno, afim de se obter novos resultados, compará-los com outras ligas e/ou compósitos e rotas convencionais de manufatura. Foram feitas as análises de densificações à verde e sinterizada, observações por MEV e análise de fases por difração de raio X dessas amostras nas condições à verde e sinterizada.

Palavras-chave: Tecnologia, Manufatura, Metalurgia, Metais, Cobre.

DAROQUE, Gabriella. Title: Microstructural characterization of metal-metal Al/Cu composite manufactured by powder metallurgy. Ano 2017.35f. Undergraduate proposal investigation (Manufacturing Engineering undergraduate course) – School of Applied Science. University of Campinas, Limeira, Brazil, 2017.

ABSTRACT

In order to improve properties the searching for new materials in the automobile, aerospace and aeronautics has been increased. This study is focused on evaluation of metal-metal Al-based composed with two distinct Cu contents (*i.e.* 2 and 4 wt.%). When compared with other metallic and ceramic materials, Al alloys and its composites exhibit lower density than ones. Since Cu has atomic radii close to that of Al, a solid solution in crystal lattice substitutionally form can be constituted. The compaction pressure of about 7.5 ton using a cold compaction system was used. Depending of the shaped-die (c.p. specimen) used to compaction ~240 MPa and ~625 MPa were attained. Sintering temperature at 560 °C during with 1 and 2 hours was applied. Green and sintered densification levels were also determined. Both SEM and XRD patterns using the mentioned composite samples were also analyzed and discussed.

Keywords: Technology, Manufacturing, Metallurgy, Metal, Copper.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Pó de Alumínio.....	18
Figura 2	Pó de Cobre.....	18
Figura 3	Matriz e Punção.....	19
Figura 4	Prensa Manual.....	19
Figura 5	Amostras compactadas.....	19
Figura 6	Matriz dos corpos de prova.....	20
Figura 7	Corpos de provas.....	20
Figura 8	Difratogramas das amostras cilíndricas sinterizadas.....	23
Figura 9	Micrografias por MEV das amostras não-sinterizadas, (a) com 2% de Cu, e (b) 4% de Cu.....	24
Figura 10	Micrografias por MEV das amostras sinterizadas a 560 °C por 1 h, sendo (a) amostra com 2% de Cu, (b) com 4% Cu.....	24
Figura 11	Gráficos do ensaio de tração com 2% Cu.....	25
Figura 12	Gráficos do ensaio de tração com 4% Cu.....	26
Figura 13	Nível de densificação (D) com teor de adição de: (a) Cobre e (b) Silício (resultados ainda não publicados)	28
Figura 14	Gráficos do ensaio de tração de 2 horas de sinterização com 2%.....	31
Figura 15	Gráficos do ensaio de tração de 2 horas de sinterização com 4%.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela 1: Valores de concentração, compactação e sinterização das amostras preparadas	17
Tabela 2	Densificação das amostras verde e sinterizadas	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

c.p	Corpo de Prova
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
LRT	Limite de Resistência à Tração
ASTM	American Society for Testing and Material

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ ρ (massa específica, g cm⁻³)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
5	CONCLUSÃO.....	32

1 INTRODUÇÃO

Uma gama de mudanças no âmbito tecnológico vem acontecendo em função da necessidade de novos materiais a serem aplicados em projetos automotivos, aeroespacial e aeronáutico. Na área automotiva, por exemplo, o interesse em materiais cada vez mais leves com as necessidades requeridas é cada vez maior, uma vez que nessa situação há menor custo de material e menor gasto de combustível (LEWIS, 1978; EKVALL, 1982; LAGENBECK, 1987).

O presente estudo visa analisar um compósito metal/metal constituído de pós de Al e Cu, na proporção de 2 e 4%, em peso de Cu, produzido a partir do processo de Metalurgia do Pó. Além de ser um estudo novo que não se encontra em bibliografia, a escolha desse compósito se deu por conta que ligas de Alumínio apresentam menor massa específica (densidade) quando comparadas aos outros materiais metálicos e cerâmicos, sem contar o seu baixo custo relativo, o qual é um grande atrativo (EUROPEAN, 2015). A escolha do Cu se deu em função de possuir um tamanho de raio atômico muito próximo ao de Al, e possibilita uma solução sólida substitucional e não intersticial (CALLISTER, 2012), principalmente na solidificação e/ou em condições termodinâmicas adequadas para isso.

O processo de metalurgia do pó foi escolhido em função do seu baixo desperdício (refugo e rejeito) de material e baixa necessidade de acabamento mantendo as propriedades necessárias, o qual produz peças chamadas *near net shape*. Além disso, quando comparados microestruturalmente com outros processos como a fundição, possui grande versatilidade de resultados quando se trata de mistura de diferentes materiais metálicos e em diferentes concentrações (DHOKEY, 2013). Neste processo os pós são compactados e em seguida sinterizados abaixo da temperatura de fusão do elemento de maior ponto de fusão, sendo utilizados fornos com atmosfera controlada (AUTOR DESCONHECIDO, 2017).

A granulometria decorrente desse processo é bastante variada, sendo assim com diferentes concentrações, temperatura de sinterização e compactação são obtidas diferentes propriedades. O experimento foi realizado com duas diferentes concentrações de cobre (*i.e.* 2% e 4%, em peso), com as quais foram feitos dois (02) corpos de provas cilíndricos e doze (12) corpos de prova no formato padronizado para

ensaio de tração (ASTM E-8), compactados com pressão de compactação de ~625 MPa e ~240 MPa , respectivamente, ambos foram compactados com 7,5 toneladas. No entanto, como possuem diferentes áreas, possuem pressão de compactação diferentes, e mesma temperatura de sinterização, sendo de 560 (± 5) °C.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de metalurgia do pó utilizado na pesquisa consiste em basicamente 4 etapas: obtenção do pó, mistura, compactação e sinterização, no qual a geometria, a distribuição e o tamanho do pó são essenciais para se alcançar as propriedades desejadas. Na primeira etapa, após a obtenção do pó, há a seleção dos mesmos para que se obtenha os menores e mais próximos possíveis, para que se obtenha uma estrutura o mais uniforme possível. A etapa seguinte, de compactação, pode ser feita com o auxílio ou não de lubrificantes, os quais são utilizados para melhor manuseamento das ferramentas e em seguida a sinterização das amostras feitas nos fornos de atmosfera controlada, não devendo ultrapassar a temperatura de ponto de fusão do elemento de maior quantidade presente na amostra (DHOKEY, 2013).

Feita a última etapa, a amostra pode estar acabada ou semiacabada, no qual o acabamento depende da geometria da peça desejada, no entanto peças obtidas por esse processo tendem a ter acabamentos superficiais ótimos.

Esse processo é ecologicamente correto e pode possuir um custo-benefício alto dependendo do tipo do material e o dimensionamento das peças (BS METALURGICA, 2017). O mesmo vem tomando espaço em diversos setores e especialmente na indústria automobilística, com a produção de bielas do motor, discos de embreagem, por exemplo, possuindo precisão dimensional com baixíssimo desperdício de material em uma produção em escala, no qual as peças possuem o formato denominado *near net shape* (METALURGIA DO PÓ, 2017), ao contrário da usinagem que possui grande desperdício de material com a geração de cavacos.

A escolha do alumínio se dá em função de ser um material encontrado com facilidade e presente em muitos setores em grandes quantidades, na indústria aeronáutica e aeroespacial, por exemplo, representa cerca de 80% do peso das aeronaves. Além disso, o mesmo possui baixa massa específica se comparado a outros materiais metálicos e cerâmico, boa resistência à corrosão com um menor custo, satisfazendo padrões de qualidade rigorosos em setores como aeronáutica e aeroespacial. O cobre possui raio atômico próximo do alumínio favorecendo uma solução sólida substitucional, o que contribui para que as propriedades alcançadas (EUROPEAN, 2015; CALLISTER, 2013; CONTINENTAL, 2016; ABAL, 2007).

Cada vez mais os projetos atuais e futuros buscam os materiais mais leves e que possuam resistência igual ou superior, diminuindo custo e melhora na eficiência de carros, por exemplo, o qual com menor peso possui menor gasto de combustível (ALANEME, 2016).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram produzidos duas (02) amostras cilíndricas com composições diferentes (2 e 4% de Cu) e doze (12) corpos de prova no formato de ensaio de tração, sendo três de cada composição, todos feitos com a mesma pressão e mesma temperatura de sinterização.

As duas (02) mencionadas amostras cilíndricas foram manufaturadas com as seguintes dimensões: diâmetro de 10 (± 1) mm e altura de 8 (± 1) mm). Sendo uma com 2% e outra com 4% de teor Cu, e doze (12) corpos de prova no formato de ensaio de tração, sendo seis com 2% de Cu e seis com 4% de Cu, todos com a mesma pressão e com a mesma temperatura de sinterização, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de concentração, compactação e sinterização das amostras preparadas.

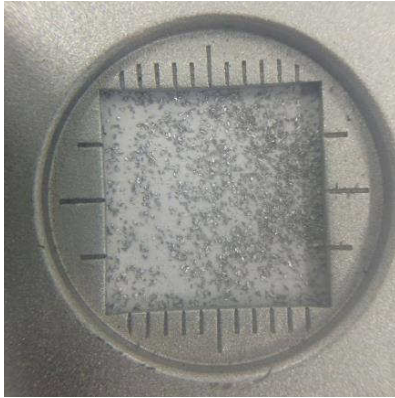
Amostras	Concentração de Cobre (% em massa)	Compactação em Toneladas	Temperatura de Sinterização (°C)
Cilíndrica	2% Cu	7,5	560
Cilíndrica	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	2% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560
Corpo de Prova	4% Cu	7,5	560

Fonte: Autor (2017)

Para se iniciar a produção das amostras foi necessário obter o pó de Al e Cu, os quais foram adquiridos limando o lingote de Al fornecido e o cubo de Cu. Feita essa primeira etapa, foi feita uma seleção do pó obtido, buscando a melhor

uniformidade possível, em termos de granulometria (média de 600 μ m), conforme demonstrado nas Figuras 1 e 2, a escala no eixo x tem subdivisões de 1 (± 0.1) mm.

Figura 1- Pó de Alumínio.



Fonte: Autor (2016).

Figura 2 - Pó de Cobre.



Fonte: Autor (2016).

Feita a obtenção do pó, foram medidas as massas com o auxílio de uma balança de precisão (erro de 0.0001 g) e em seguida foram medidas as densidades das amostras para posterior comparação com a densidade das amostras após a sinterização (princípio de Arquimedes).

A medição das densidades (nível de densificação) foi feita medindo-se as massas secas e molhadas de cada uma das amostras escolhidas para estudo. Para a obtenção da massa molhada as amostras foram mergulhadas em água destilada por seis (06) horas, afim de garantir que as bolhas de ar fossem desprendidas, ou melhor, supondo-se que todo o ar aprisionado nos poros entre os pós de Al e Cu fosse retirado. Feito isso, foi utilizado o princípio de Arquimedes para calcular as densidades, demonstrado na equação 1:

$$\rho = \rho_{\text{água}} * \left[\frac{\text{massa seca}}{\text{massa seca} - \text{massa molhada}} \right] \quad (1)$$

Onde:

ρ = Densidade do sólido;

$\rho_{\text{água}}$ = Densidade da água;

Sequencialmente, foram compactadas as amostras cilíndricas com o auxílio de uma matriz, punção e prensa manual utilizando-se 7,5 toneladas, como demonstrados nas Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 - Matriz e Punção



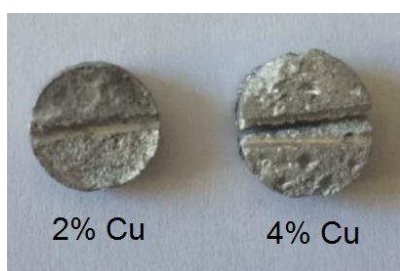
Fonte: Autor (2016).

Figura 4 - Prensa Manual



Fonte: Autor (2016).

Figura 5 - Amostras compactadas



Fonte: Autor (2016).

Com as amostras prontas, foi feito MEV das mesmas para comparações após sinterizadas, para melhor visualização em ambos as amostras foram cortadas ao meio. A seguir, as mesmas foram para a etapa de sinterização utilizando um forno que possui atmosfera controlada (gás argônio com fluxo na ordem de ~12 L.p.m), iniciando na temperatura ambiente (~25 °C), com taxa de aquecimento de 10 em 10 °C até alcançar a temperatura desejada de 560 °C e permanecendo 1 hora na mesma, seguindo de um resfriamento lento (dentro do forno) até a temperatura ambiente e então retiradas.

Após a sinterização, foi feito o mesmo processo de obtenção de densificação das amostras e feitos os ensaios de difração por raio x e caracterização microestrutural utilizando-se do MEV para obtenção das micrografias e tentativa de identificação de possível coalescência entre as partículas de Al com Al, Cu com Cu e Al e Cu.

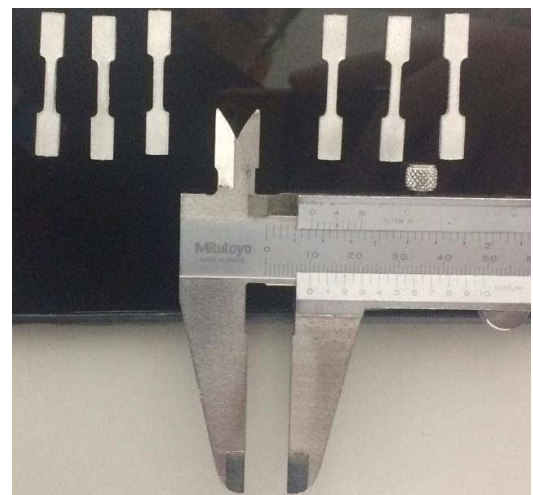
Feitas as amostras cilíndricas, foram produzidos os corpos de prova para ensaio de tração. O processo é o mesmo, alterando somente a matriz da amostra, demonstrada na Figura 6 e 7 a seguir:

Figura 6 - Matriz dos corpos de prova



Fonte: Autor (2017).

Figura 7 - Corpos de provas



Fonte: Autor (2017).

Em seguida, foram feitos novos corpos de provas, seguindo o mesmo processo já descrito, no entanto os mesmos foram deixados na temperatura desejada de 560 °C por 2 horas, e não mais 1 hora, afim de se analisar a diferença nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da densidade das amostras cilíndricas verdes (compactados à verde) e sinterizadas comparadas as densidades teóricas estão demonstrados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Densificação das amostras verde e sinterizadas.

Amostras (% Cu)	$\rho_{teórica}(g/cm^3)$	$\rho_{verde}(g/cm^3)$	% Densificação	$\rho_{sinterizado}(g/cm^3)$	%Densificação
Cu 2%	2,8252	2,5977	91,9474	2,7341	96,7755
Cu 4%	2,9504	2,6603	90,1674	2,9174	98,8815

Fonte: Autor (2017).

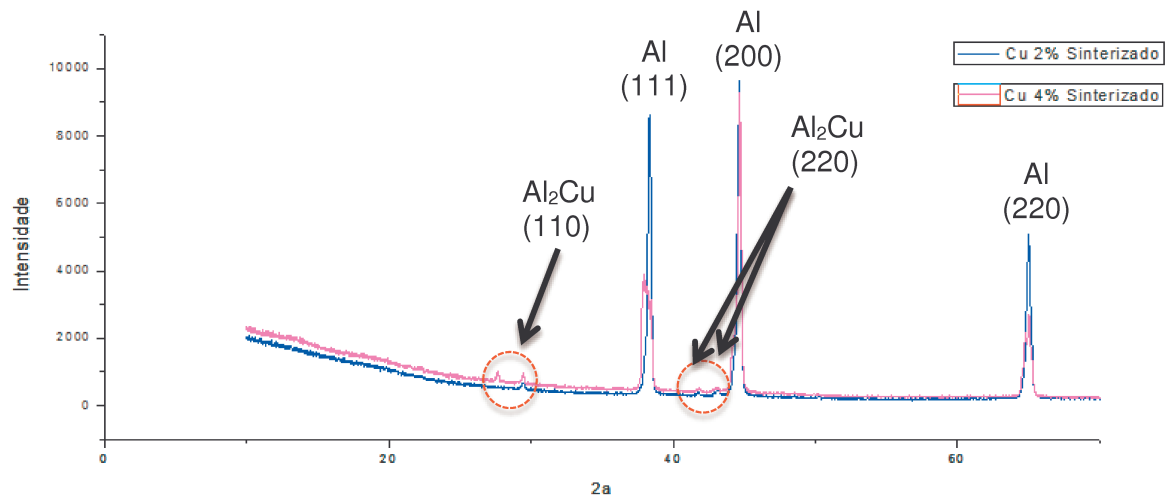
Como esperado, tanto a densidade do compactado à verde como do sinterizado possuem valores abaixo da densidade teórica, pois nas amostras compactadas existem poros que não são considerados na densificação teórica.

Observa-se que a porcentagem de densificação do verde para o sinterizado aumenta, uma vez que os átomos se coalescem por difusão atômica e há maior interação entre eles, aumentando a densificação, o que era esperado. Igualmente como a porcentagem de densificação, a densidade do sinterizado aumentou igualmente, uma vez que aumenta a interação entre os átomos e aumenta a massa, aumentando a densidade.

Observa-se também que a % de densificação à verde da amostra com 2% de Cu foi maior que da amostra com 4% de Cu. Observa-se ainda que isso se inverte após a sinterização, o que pode-se ser explicado pela recuperação dos pós deformados tanto os de Al, quanto os de Cu, que ocorre no processo sinterização, desde a rampa de aquecimento e o patamar de efetivação da sinterização. Isso por conta que na compactação ocorre uma alteração de energia tanto de volume como de superfície, ou melhor, diminuição da energia de volume e aumento de superfície, o que se inverte na sinterização e por consequência, a recuperação da densificação após sinterização, sendo mais proeminente no compósito contendo maior teor de Cu, conforme observado na Tabela 2.

A seguir na Figura 8 está o difratograma das amostras cilíndricas sinterizadas:

Figura 8 – Difratomogramas das amostras cilíndricas sinterizadas.



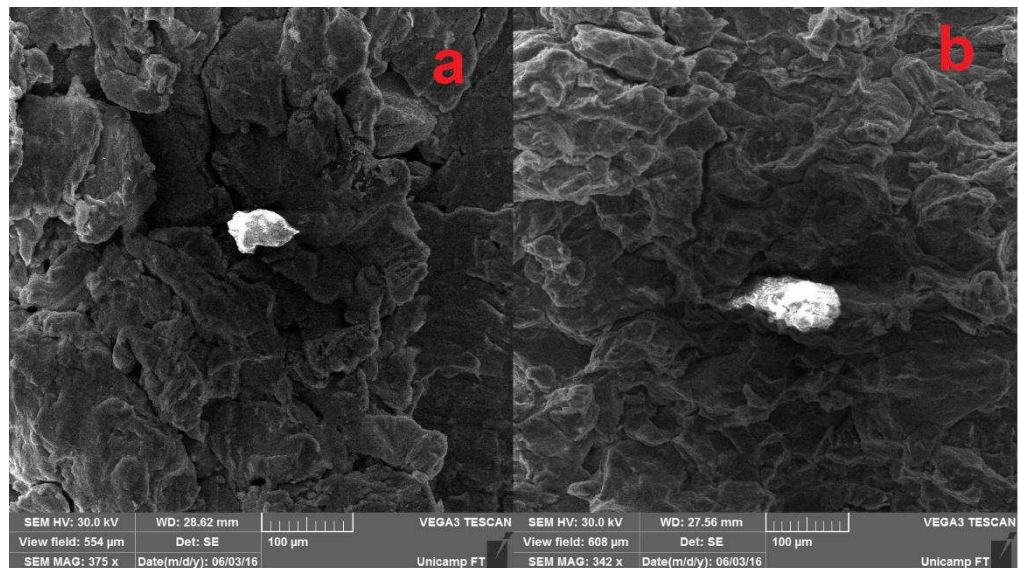
Fonte: Autor (2016).

Da análise da Figura 8 que exhibe os resultados para as amostras sinterizadas com teores de 2% e 4% de Cu foram obtidas as seguintes observações:

- ♦ Surgem novos picos entre 28 e 30 graus. Segundo literatura (ZLATICANIN, 2004; GAO, 2014; SUN, 2016; LIU, 2014; HUANG, 2016; LI, 2008; RUDIANTO, 2011), esse pico está relacionado ao composto intermetálico tetragonal Al_2Cu , ou também chamada de fase *theta* (∇), que tem teor de Cu na ordem de 32 e 33% (em peso), de acordo com diagrama de fases do sistema Al-Cu (MASSALKI, 1990; OSÓRIO, 2012). Vale ressaltar que a fase Al_2Cu foi identificada em literatura tanto em amostras fundidas como aquelas que sofreram tratamento térmico (*aging*) (MASSALKI, 1990).
- ♦ Na amostra de 4% sinterizada aparecem "picos seguidos", o qual significa a formação de uma nova fase Al_2Cu .

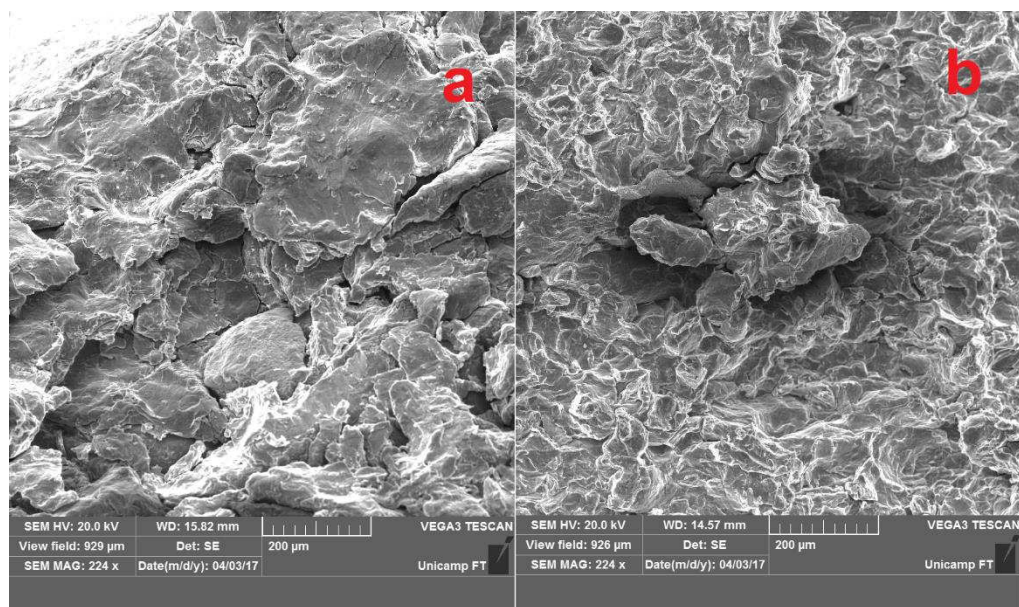
Através das análises micro estruturais por MEV buscava-se verificar o comportamento das amostras antes e após a sinterização e como a diferença de composição influenciam na microestrutura. A seguir estão demonstradas nas Figuras 9 e 10 obtidas por MEV das amostras cilíndricas verdes e sinterizadas.

Figura 9 – Micrografias por MEV das amostras não-sinterizadas, (a) com 2% de Cu, e (b) 4% de Cu.



Fonte: Autor (2017).

Figura 10 - Micrografias por MEV das amostras sinterizadas a 560 °C por 1 h, sendo (a) amostra com 2% de Cu, (b) com 4% Cu.

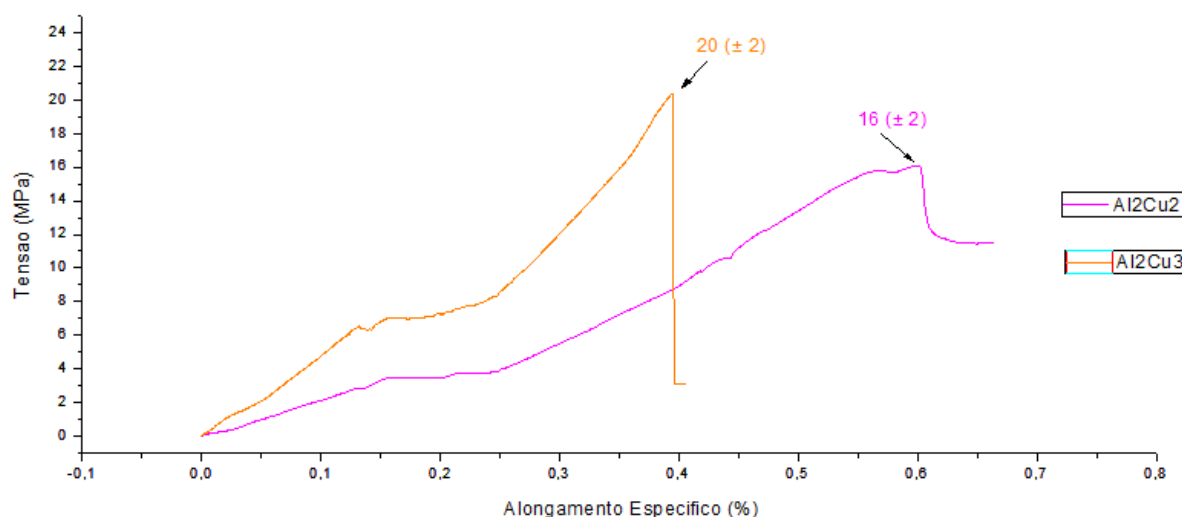


Fonte: Autor (2017).

Da observação das micrografias das Figura 9 e 10 pode-se dizer que são identificados “vales” (*dimples*) relacionados à natureza de ductilidade dos pós de Al. Isso é mais evidenciado nas imagens da Figura 10 por conta de ter ocorrido coalescência entre as partículas após a sinterização, o que se comprova com os valores de densificação apresentados na Tabela 3. Mesmo havendo baixo teor de Cu, foi possível identificar as partículas de Cu distribuídas entre os pós de Al (Figura 9) devido a diferença dos pesos atômicos entre Al e Cu, sendo o Cu a partícula mais brilhosa (mais clara) na Figura 9. Na Figura 10, não foi possível identificar com clareza o Cobre e Alumínio, mas observam-se os “vales” decorrentes da fratura feita nos corpos de prova para a observação da amostra. Na Figura 9 com as amostras não sinterizadas observa-se partículas soltas de um dos dois metais, os quais estavam simplesmente compactados um com o outro. Na Figura 10 observa-se uma interação entre eles, resultado da sinterização (coalescência de partículas).

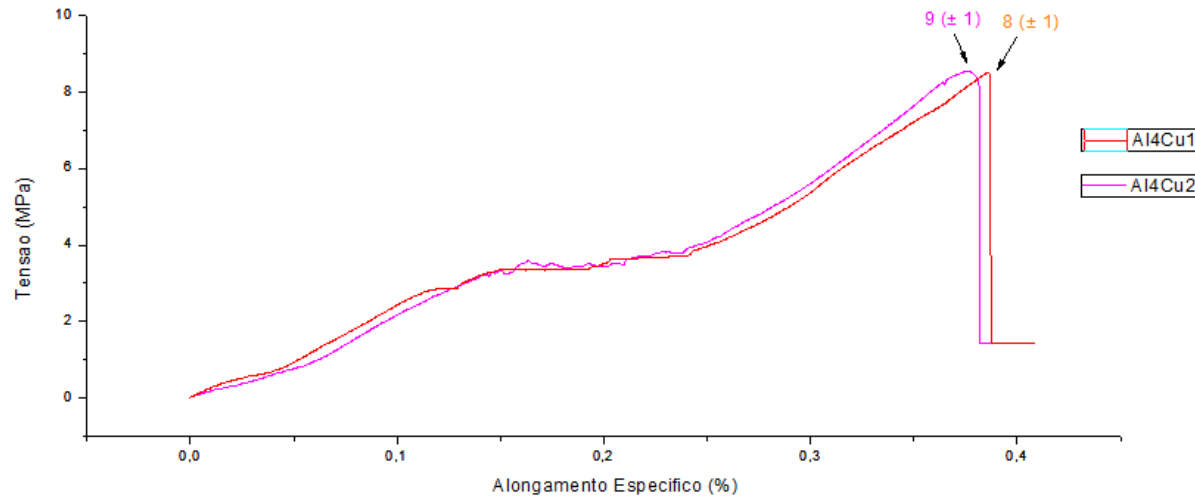
Na Figura 11 são apresentados os resultados dos ensaios de tração em formato tensão vs. deformação para as amostras com concentração de 2% de Cu.

Figura 11 - Gráficos do ensaio de tração com 2% Cu.



Fonte: Autor (2017).

Figura 12 - Gráficos do ensaio de tração com 4% Cu.



Fonte: Autor (2017).

Foram realizados três ensaios, no entanto o primeiro foi descartado pois mostrou-se muito distante dos valores dos outros dois. A partir dos ensaios 2 e 3 realizados, observa-se que uma tensão média entre eles seria de 18 MPa com uma margem de erro de ± 2 MPa, com deformações na ordem de 0,5%, em média. Na Figura 12 tem os resultados de ensaio de tração para as amostras com 4% de Cu.

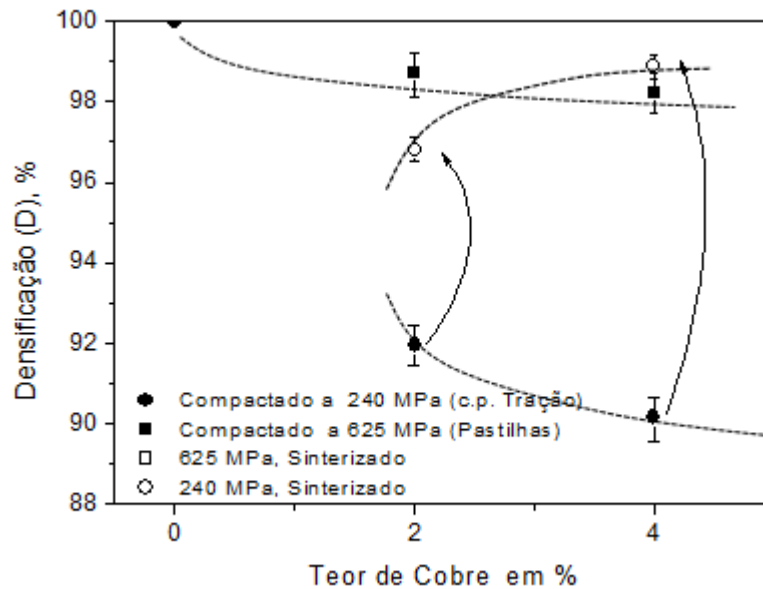
Como no ensaio com 2% de Cu, foram realizados igualmente 3 ensaios para as amostras com 4% de Cu, no entanto, um foi descartado por mostrar resultados em não conformidade com os outros.

Observa-se que os valores de tensão e deformação dos ensaios 1 e 2 são muito próximos e parecidos, 8 MPa com erro de ± 1 MPa. No entanto, os valores diminuíram em relação as concentrações de 2%, mostrando resultados contrários ao da fundição, no qual aumentando a concentração, aumenta a resistência à tração (OSÓRIO, 2011; QUARESMA, 2000). Adicionalmente vale ressaltar que o refino dendrítico de uma estrutura dendrítica de ligas Al-Cu fundidas também propicia o aumento da resistência mecânica, como reportado por (OSÓRIO, 2011) para ligas Al-5%Cu com diferentes taxas de resfriamento e por consequência, diferentes espaçamentos dendríticos.

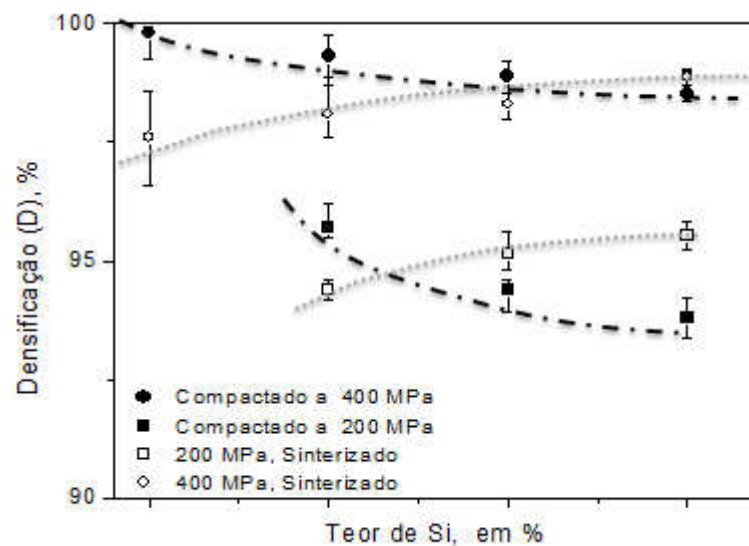
Correlacionado os resultados de limite de resistência à tração (LRT) dos compósitos Al/Cu compactados e sinterizados com seus respectivos níveis de densificação, conclui-se que a adição de Cobre tem um efeito fundamental na resposta mecânica dos compósitos produzidos.

Como dito anteriormente e mostrado na Tabela 2, na Figura 13 tem-se uma representação do nível de densificação (D) com o teor de Cu para as amostras como compactado à verde e sinterizadas. Ainda pode-se observar o efeito esperado da diferente pressão de compactação. Embora mesma carga tenha sido aplicada, devido a diferença entre as área reais dos c.p.'s de tração (pressão de 240 MPa) e das pastilhas (625 MPa), os níveis de compactação favorecem as amostras com maior pressão. Observa-se ainda que com o aumento do teor de Cu, nas condições de compactados à verde, o nível de compactação diminuir, *i.e.* com 2%Cu a D foi de ~92% e com 4% de Cu foi sutilmente diminuído para ~90%. Isso está correlacionado com as diferenças dos valores de resistência entre o Al e o Cu, sendo tomado em literatura o LRT do Al de ~60 MPa contra ~210 MPa até 344 MPa para o Cu dependendo da condição de processamento, recozido (annealed) e trabalhado à frio (cold worked), respectivamente (AUTOR DESCONHECIDO, 2017). Quando na compactação o movimento entre as partículas e deformações dos pós, o Cu limita o movimento das partículas diminuindo a deformação plástica, principalmente no Al, e parte da energia de deformação é despendida na tentativa de deformar os pós de Cu, mas devido seu maior nível de LRT consomem parte da energia, além de aumenta a força de atrito entre as partículas. Obviamente que o valor da tensão de compressão (compactação) aplicada seguramente deforma drástica e plasticamente os pós de Al.

Figura 13 – Nível de densificação (D) com teor de adição de: (a) Cobre e (b) Silício (resultados ainda não publicados).



(a)



(b)

Fonte: Autor (2017).

Decréscimo na densidade á verde também foi reportado por Tiwari e está relacionada com aumento da área superficial interna. Após a sinterização por 1 hora na temperatura de 560 oC, devido a recuperação na energia interna (nível drástico de

deformação), principalmente entre os pós de Al, as vacâncias diminuem e a densificação D passa a aumentar. Dos resultados obtidos, vale destacar que ambas as amostras apresentaram uma efeito de recuperação dos níveis de densificação, sendo que a amostras com 2% de Cu atingiu ~96% (antes era ~92) e amostra com 4% de Cu chegou ao valor de ~98 (antes era de ~90). Em literatura tem sido reportado que essa recuperação é mais efetiva com menores de compactação, o que pode ser entendido quando compósito Al/Si foi estudado, conforme mostrado na Figura 13 (b). (TIWARI, 2012; BOUVARD, 2000; OLMOS, 2009). Com isso, evidencia-se que embora uma maior pressão de compactação propicia uma maior D nos compactados à verde, no entanto, após a sinterização a recuperação da D passa a ser mais efetiva ou atinge maiores níveis, por vezes, suplantando aqueles anteriormente atingido na compactação a verde. Isso demonstra necessidade de estudo mais sistêmico e aprofundado para escolha no nível de compactação e tempo e temperatura de sinterização.

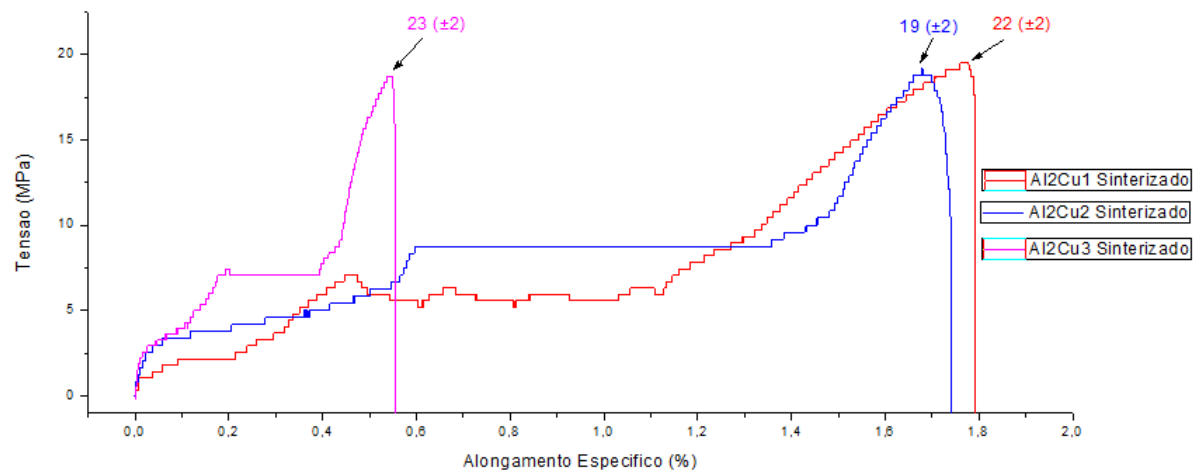
Contudo, tratando-se dos resultados experimentais obtidos para os compósitos Al/Cu tem-se evidentemente que os resultados máximos de LRT para os compósitos ficaram muito aquém quando comparados com aqueles reportados para ligas fundidas (e.g. liga Al-5%Cu) com teores similares de Cu (OSÓRIO, 2011), indistintamente se alta ou baixa taxa de resfriamento tenha sido aplicada. Quando uma liga fundida Al-5%Cu é considerada, a fase Al_2Cu (mistura eutética) (OSÓRIO, 2011; QUARESMA, 2000) fica localizada entre os espaçamentos dendríticos o que contribui para o reforço mecânico (OSÓRIO, 2011). Pode-se dizer que essa natureza de constituição microestrutural é bastante diferente nos compósitos metal/metal Al/Cu, onde as partículas de Cu ficam bastante dispersas (distantes) umas das outras, conforme mostrado nas Figuras 9 e 10. Quando o compósito de 2% é aumentado para 4%, as partículas de Cu tendem a diminuir as distancias entre si por conta do maior teor de Cu adicionado ao compósito. Mesmo assim, diante dos resultados de ensaios de tração, não se observou uma melhoria mecânica. Do contrário, com o aumento de 2 para 4% de Cu, evidenciou-se uma queda nos valores de LRT. A provável explicação para essa observação é devido ao fato de que após a sinterização, os c.p.'s foram resfriados ao forno. Durante o período da sinterização foi dada condição termodinâmica suficiente para difusão atômica entre átomos Al e Al com Cu e vice-versa, tanto é que nos resultados de difração por raio x, a fase Al_2Cu foi identificada.

Entretanto, o tempo de sinterização não foi efetivo para que toda partícula do pó de Cu fosse dissolvido na rede de Al. Assim, pode-se dizer que devido a difusão o pó de Cu foi envolvido por fina camada de Al e seu interior ainda contendo Cu passou a ter feito deletério nas propriedades mecânicas resultantes. Isso por conta que o Cu recozido tem menor nível de resistência mecânica que na condição de trabalho a frio, por exemplo. Adicionalmente a isso, pode também dizer que a fase Al_2Cu formado, embora em pequenas frações, também corroborou com o decréscimo da resistência mecânica por conta da natureza coerente (MEDRANO-PIETRO, 2016) que pode passar a ter devido ao resfriamento em forno. Uma fase Al_2Cu proveniente de tratamento de solubilização e precipitação apresenta-se incoerente coma matriz de Al tendo efeito positivo no aumento da resistência mecânica (TASH, 2007; TIBBALLS, 2001). Obviamente as zonas de GP's (Guinier-Preston) não são formadas na compactação e sinterização desses compósitos Al/Cu apresentados nesse estudo. Assim, o efeito da coerência (MEDRANO-PIETRO, 2016; TASH, 2007; TIBBALLS, 2001) da fase Al_2Cu e o efetivo do recozimento do interior dos pós de Cu contribuíram para o decréscimo da resistência do compósito com 4% de Cu, quando comparado àqueles obtidos para o compósito com 2% de teor de Cu.

Nas Figuras 14 e 15 apresentam-se os gráficos do ensaio de tração para corpos de prova que foram submetidos a 2 horas de sinterização para os compósitos com 2 e 4% de Cu, respectivamente. Os resultados são das amostras que foram preparadas utilizando as mesmas condições dos tratamentos anteriores. Isso foi proposto com intuito em se verificar possíveis e potenciais diferenças na resposta mecânicas dos propostos compósitos utilizando-se de maior tempo de sinterização.

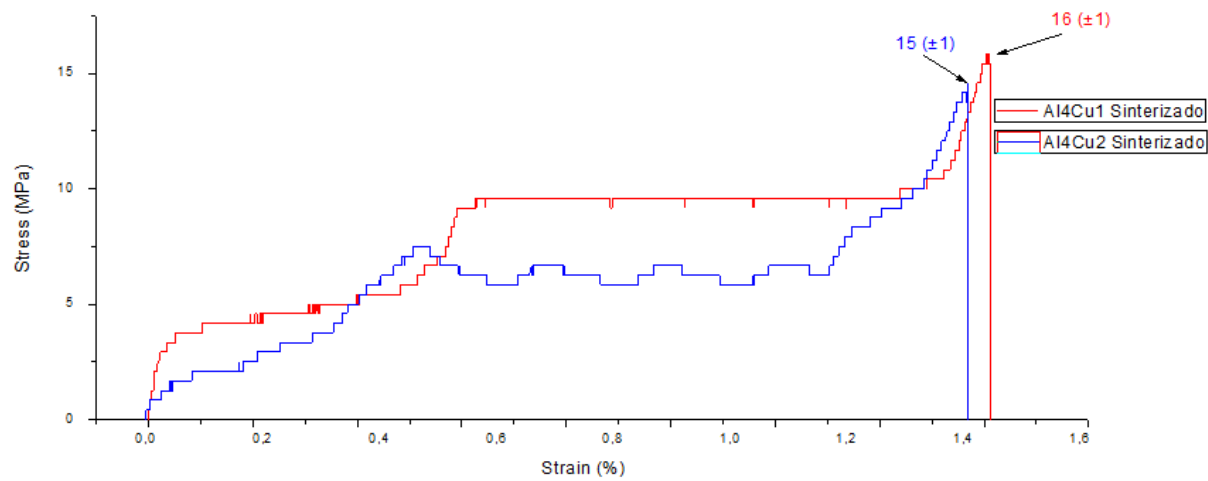
Comparados aos gráficos anteriores, nota-se que mesmo ficando uma hora a mais no forno, o limite de resistência à tração não sofreu alteração significativa, 2% de Cu com 21 MPa com erro de ± 2 MPa e 4% de Cu 15 MPa com erro de ± 1 MPa. Por outro lado, fica claro o deslocamento do alongamento específico para maiores valores, deixando subentendido que o possível coalescência entre as partículas, seja entre Al/Al, Cu/Cu e Al/Cu propiciou esse aumento no alongamento específico, o que sugere dizer que a ductilidade é mais susceptível a maiores tempos de sinterização que o LRT e limite de escoamento.

Figura 14 - Gráficos do ensaio de tração de 2 horas de sinterização com 2% Cu.



Fonte: Autor (2017).

Figura 15 - Gráficos do ensaio de tração com 2 horas de sinterização com 4% Cu.



Fonte: Autor (2017).

5 CONCLUSÃO

No trabalho buscou-se a análise microestrutural de dois compósitos metal/metal de alumínio-cobre com composições de 2% e 4% em massa, produzidas a partir da metalurgia do pó (M/P) e sinterizadas à mesma temperatura de 560 °C durante 1 e 2 h sob atmosfera inerte.

A partir de análises dos resultados de difratograma de raio x, microestruturas obtidas por MEV e ensaio de tração uniaxial foram obtidas as seguintes conclusões:

- ◆ As densidades em ambas as composições aumentaram quando sinterizadas, sendo a de 4% maior que a de 2% tanto na condição em verde, quanto sinterizadas. No entanto, ambas amostras inferiores à densidade teórica, o que era esperado.
- ◆ A % de densificação após a sinterização se inverte, no qual a % de 4% passa ser superior ao de 2%, em função da recuperação dos pós deformados de Al e Cu.
- ◆ Houve a formação de uma nova fase quando sinterizada, o que também era esperado, por conta da faixa de temperatura utilizada na sinterização, *i.e.* 560 °C, e a condição para forma essa fase segunda diagrama de equilíbrio de fases do sistema Al-Cu apresenta à temperatura de 557 °C.
- ◆ O comportamento no ensaio de tração uniaxial quando comparadas as composições de 4% e 2% foi contrário ao encontrado nas ligas fundidas com teores similares de Cu. Assim, observou que a adição de 4% de Cu, as tensões máximas foram menores que as de 2%. Isso foi atribuído ao efeito associado entre a coerência com a rede de Al do intermetálico Al_2Cu formado e o recozimento do interior dos pós de Cu.
- ◆ Os corpos de provas que foram sinterizados por 2 horas, quando comparados os gráficos do ensaio de tração, demonstraram somente um aumento do alongamento específico, mas não melhorias no limite de resistência à tração e escoamento, demonstrando ainda ao contrário do que se encontra nas ligas fundidas.

REFERÊNCIAS

- A.C. Vieira. Corrosion and tribocorrosion mechanisms in Al-Si-Cu-Mg alloys and in functionally graded Al-SiCp composites. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Portugal, 2012. <http://hdl.handle.net/1822/19741>. in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.001>
- ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, Fundamentos e Aplicações do Alumínio – Maio/2007.
- ALANEME, K. K. ;BODUNRIN, M. OI. ; AWE, A. A.. Microstructure, mechanical and fracture properties of groundnut shell ash and silicon carbide dispersion strengthened aluminium matrix composites. Journal of of King Saud University – Engineering Sciences (2016),
- BOUVARD, D.. Densification behaviour of mixtures of hard and soft powders under pressure. Powder Technol. 111 (2000) 231–239.
- BS METALURGICA, BS Ind. Com. Produtos Metalurgicos LTDA. Disponível em:<<http://www.bsmetalurgica.com.br/o-que-e>>. Acessado em: 18/10/2017.
- CALLISTER, William D., Ciência Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC, 2012
- CONTINENTAL. Continental Steel & Tube Company, Disonível em: <<http://continentalsteel.com>>. Acessado em 20/10/2017.
- Dhokey N. B., Athavale V. A., Narkhede N. and Kamble M. “Effect of processing conditions on transient liquid phase sintering of premixed aluminium alloy powders” Advanced Materials Letter, 2013, 4(3), 235-240, 2013.
- EKVALL J. C., Rhodes J. E., Wald G. G., Methodology for evaluating weight savings from basic material properties, ASTM STP 761 (Philadelphia, PA: Am. Soc. Testing Mater.) pp 328–341, 1982.
- EUROPEAN. Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys. Disponível em:<<http://www.alueurope.eu/talat/lectures/1501.pdf>>. Acessado em 18/10/2017
- GAO ,K., LI S., XU L., FU ,H. Effect of sample size on intermetallic Al₂Cu microstructure and orientation evolution during directional solidification. J Crystal Growth 394 (2014) 89-96.
- LAGENBECK S L, Sakata I. F., Ekvall J. C., Reinan R. A., Design considerations of new materials for aerospace vehicles. In Aluminium–lithium alloys: design, development and applications update, (eds) R.J. Kar, S. P. Agrawal, W. E. Quist (Metals Park, OH Am. Soc. Metals Int.) pp 293–314, 1987.
- LEWIS R. D., Webster D., Palmer I. G., Technical Report AFML-TR-78, DARPA Order No. 3417, Lockheed Missiles and Space Company, Palo Alto, CA, p. 102, 1978.
- LI, H.; HUANG, D. ; KANG,; W.; LIU, J.; Ou, Y. ; LI.; D.. Effect of different aging processes on the microstructure and mechanical properties of a novel Al-Cu-Li alloy. J. Mater. Sci. Technol. 32 (2016) 1049-1053.

- LI, J.F. ; LI, C.X.; PENG, Z.W.; CHEN, W.J.; ZHENG, Z.Q.. Corrosion mechanism associated with T1 and T2 precipitates of Al-Cu-Li alloys in NaCl solution. *J Alloys Compds* 460 (2008) 688-693.
- LIU, Y. M. LIU, L. LUO, J. WANG, C. LIU. The solidification behavior of AA2618 aluminum alloy and the influence of cooling rate. *Materials* 7 (2014) 7875-7890.
- MASSALSKI, T. B.; OKAMOTO, H.. ASM International. 1990. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM, Materials Park, Ohio.
- MATWEB, Material Property Data <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx>, acessado em Julho de 2017.
- MEDRANO-PRIETO, H.M. ; GARAY-REYES, C.G. ; GÓMEZ-ESPARZA, C.D. ; J.AGUILAR-SANTILLÁN, M.C.; MALDONADO-OROZCO, R. MARTÍNEZ-SÁNCHEZ. Evolution of Microstructure in Al-Si-Cu System Modified with a Transition Element Addition and its Effect on Hardness. *Materials Research*. 19 (2016) 59-66.
- METALURGIA DO PÓ. Metalurgia do Pó, Aplicações, Automobilísticas. Disponível em:<<http://www.metalurgiadopo.com.br/Paginas/detalhes.asp?iType=1&iPic=12>>. Acesso em 18/10/2017.
- OLMOS, L.; MARTIN, C. L. ; BOUVARD, D. Sintering of mixtures of powders: Experiments and modelling. *Powder Technol.* 190 (2009) 134–140.
- OSORIO, W.R.; FREIRE, C.M.; CARAM, R. ; GARCIA A.. The role of Cu-based intermetallics on the pitting corrosion behavior of Sn–Cu, Ti–Cu and Al–Cu alloys. *Electrochimica Acta* 77 (2012) 189-197.
- OSÓRIO, W.R.; SIQUEIRA, C. A.; SANTOS, C. A.; GARCIA, A.. The correlation between electrochemical corrosion resistance and mechanical strength of as-cast Al-Cu and Al-Si alloys. *Int. J. Electrochem. Sci.* 6 (2011) 6275 – 6289.
- QUARESMA, J.M.V.; SANTOS, C.A. ; GARCIA.A. Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings, and mechanical properties of Al-Cu alloys. *Metall. Mater. Trans.* 31A (2000) 3167-3178.
- RUDIANTO, H.; YANG, S.; NAM, K.W. ; KIM. Y.J.. Mechanical properties of AL-14Si-2.5Cu-0.5Mg Aluminum-Silicon P/M alloy. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 28 (2011) 145-149.
- SUN,Y.; MA, S.; WANG, H. ; CHEN, L. ; GAO, K. ; MA, Y. ; LIU B.. Effects of complex modification by Sr-Sb on the microstructures and mechanical properties of Al-18 wt%Mg2Si-4.5Cu alloys. *Materials* 157 (2016) 1-8.
- TASH, M.; SAMUEL, FH; MUCCIARDI, F; DOTY, HW. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng.* 443 (2007) 185-201.
- TIBBALLS, JE; HORST, JA; SIMENSEN, CJ. Precipitation of α -Al(Fe,Mn)Si from the melt. *J. Mater. Sci.* 36 (2001) 937-941.

TIWARI, S.; RAJPUT, P.; SRIVASTAVA, S.. Densification Behaviour in the Fabrication of Al-Fe Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy Route. International Scholarly Research Network ISRN Metallurgy, Volume 2012, Article ID 195654, 8 pages
doi:10.5402/2012/195654.

ZLATKANIN B., RADONJIC B., FILIPOVIC M. Characterization of structure and properties of as-cast AlCuMg alloys. Mater. Trans. 45 (2004) 440-446.