

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME BURATO FAVRETTO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPÓSITO Al - Fe₂Al₅
SINTERIZADO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

GUILHERME BURATO FAVRETTO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPÓSITO Al - Fe₂Al₅
SINTERIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Campus* Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPÓSITO AI – Fe₂Al₅ SINTERIZADO

Guilherme Burato Favretto

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 09/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Profa. Dra. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. MsC. Silvana Patricia Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram desta caminhada, principalmente à minha família e aos meus professores que me guiaram durante este processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que me apoiou em todos os momentos difíceis durante todo o curso. Que me acompanharam nesse crescimento pessoal e profissional. Meu muito obrigado a meu pai Leonir Favretto e minha mãe Loréte Maria Burato Favretto e aos meus primos Eliandro e Viviane.

Ao professor Dalmarino Setti que me coordenou durante este trabalho e mais outros projetos durante o curso.

Ao colega Jonathan Hipólito que fabricou o intermetálico usado e me auxiliou na fabricação dos corpos de prova. À central de análises da UTFPR pela realização da difratometria de raios-X utilizada neste trabalho.

Aos meus colegas que auxiliaram durante todo o curso, ajudando em estudos e trabalhos e crescendo junto comigo. Aqui principalmente aos grandes amigos Felipe Patron Cândido, Leonardo Yukio Mashima, Fabio Zanguettin Pereira e Gabriel Laureano de Souza.

E por último, mas não menos importante, à Laura Ferrazza Kirch, que além de estar sempre ao meu lado nas horas fáceis e difíceis, é um dos meus maiores exemplos de pessoa e de profissional. Muito obrigado por fazer parte da minha vida.

EPÍGRAFE

“Talent is cheaper than table salt. What separates the talented individual from the successful one is a lot of hard work.” – Stephen King

“Talento é mais barato que sal. O que separa um indivíduo talentoso de um bem-sucedido é muito trabalho duro. ”
– Stephen King

RESUMO

FAVRETTO, G. B. Caracterização Mecânica do Compósito Al – Fe₂Al₅ Sinterizado. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

A pesquisa por novos materiais é incessante, buscando sempre desenvolver materiais que supram as necessidades de propriedades mecânicas, custo ou disponibilidade para cada projeto. Este trabalho apresentou como objetivo caracterizar as fases, microestrutura e propriedades mecânicas do compósito de Al com o intermetálico Fe₂Al₅ obtido por sinterização. O intermetálico Fe₂Al₅ foi produzido de acordo com rota previamente estabelecida em outros trabalhos. A partir da mistura de Al com 20% de Fe₂Al₅ foram fabricados corpos de prova que foram sinterizados em atmosfera de N₂ (99,999% de pureza) na temperatura de 660 °C por um tempo de 60 minutos. Os ensaios de caracterização foram massa específica (método de Arquimedes), ensaio de tração para a medição de alongamento e tensão de ruptura, ensaio de microdureza, metalografia e difratometria de raios-x para definição das fases presentes no compósito. Foram obtidos então dados que mostram um aumento na densidade e dureza do material, e fragilização se comparados ao alumínio puro. O compósito apresentou uma microdureza de 46,73 HV, e uma densidade de 2,75 g/cm³, maiores que os 40,67 HV e 2,5 g/cm³ do alumínio puro. Houve também uma fragilização do material, que apresentou alongamento nulo e tensão de resistência a tração de aproximadamente 22,15 MPa, em comparação à um alongamento de 10,82% e tensão de resistência a tração de 64,16 MPa do metal base. Os corpos de prova também apresentaram uma fase de Fe₄Al₁₃ após a sinterização, que foi mostrada através do DRX.

Palavras-chave: Metalurgia do pó; Sinterização; Intermetálico; Ferro; Alumínio.

ABSTRACT

FAVRETTO, G. B. Caracterização Mecânica do Compósito Al – Fe₂Al₅ Sinterizado. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

The research for new materials is extremely important, looking forward development of material that can supply the needs of mechanical properties, cost and availability for each project. The objective of this research was to characterize the phases, the microstructure and the mechanical properties of the intermetallic composite Al – Fe₂Al₅ sintered. The test bodies were manufactured using as guide others research's in the field. Using a mix of 20% of Fe₂Al₅ powder, the test bodies were sintered in a controlled atmosphere of N₂ (99,999% pure) in a temperature of 660 °C for 60 minutes. Then, mechanical tests were performed; Arquimedes, traction, microhardnes, metallography and DRX tests. It was observed the characteristics of the material data, as well the formation of another aluminum and iron intermetallic. Data were then obtained showing an increase in density and hardness of the material, and embrittlement compared to pure aluminum. The composite had a microhardness of 46.73 HV and a density of 2.75 g / cm³, greater than 40.67 HV and 2.5 g / cm² of pure aluminum. There was also a weakening of the material, which showed null elongation and tensile strength of approximately 22.15 MPa, compared to a 10.82% elongation and tensile strength of 64.16 MPa of the base metal. The specimens also showed a Fe₄Al₁₃ phase after sintering, which was shown by DRX.

Palavras-chave: Powder Metallurgy; Sintering; Intermetallic; Iron, Aluminum

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Resistência específica por temperatura de materiais convencionais e compósitos

Figura 02 - Adaptado Modelo de corpo de prova para ensaio de tração segundo a norma ASTM B557M-10 para alumínio.

Figura 03 - Molde para fabricação dos corpos de prova

Figura 04 - Corpos de prova de alumínio puro e de intermetálico

Figura 05 – Metalografia do intermetálico Al-Fe₂Al₅

Figura 06 – Difratoograma de raio-X das amostras

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Quantidade dos materiais utilizados em cada batelada para fabricação dos corpos de prova

Tabela 02 – Parâmetro da difratometria de raio-X

Tabela 03 - Resultados dos ensaios de Arquimedes

Tabela 04 – Resultados dos ensaios de tração

Tabela 05 – Resultados dos ensaios de microdureza

Tabela 06 – Resultados da difratometria de raio-X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivos Gerais	13
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REFERENCIAL TEORICO	15
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	15
2.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA.....	15
2.3 REFORÇOS DESCONTÍNUOS PARA COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA	16
2.4 METALURGIA DO PÓ.....	17
2.5 O COMPÓSITO AL – Fe ₂ Al ₅	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 ENSAIO DE ARQUIMEDES.....	24
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	25
4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA	26
4.4 METALOGRAFIA	26
4.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	27
5 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, principalmente na engenharia mecânica, o material utilizado é de extrema importância no resultado de um projeto. Esta importância está diretamente ligada a alguns fatores, como custo e propriedade mecânicas e químicas destes materiais.

Com recentes avanços tecnológicos os materiais utilizados na engenharia passaram a ser outros além de metais, cerâmicas e polímeros, sendo os compósitos muito utilizados por sua versatilidade, agrupando propriedades inalcançáveis por materiais convencionais.

Assim, compósitos de matriz metálicas com reforços descontínuos são comumente utilizados, principalmente na indústria aeroespacial. Estas propriedades dos materiais avançadas são o resultado da interação entre a matriz metálica e o reforço (ASM Handbook Composites, 2001, p.130).

Um dos métodos para a obtenção destes compósitos é o da metalurgia do pó, onde os materiais são reduzidos ao estado de pó e depois são convenientemente misturados, compactados e aquecidos em condição controlada, o que confere a peça forma e propriedades desejadas (Chiaverini, 1992, p. 277).

Neste trabalho de conclusão de curso, o compósito de matriz metálica com reforço descontínuo Al – Fe₂Al₅ foi obtido por sinterização, e a partir dos corpos de prova, suas propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios mecânicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é caracterizar o compósito Al – Fe₂Al₅ obtido por meio de Metalurgia do Pó através de ensaios mecânicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho possui como objetivos específicos: (i) determinar os parâmetros pertinentes para a caracterização mecânica do compósito Al – Fe₂Al₅; (ii) realizar a mistura dos pós de Alumínio e Ferro para a obtenção do Fe₂Al₅ por sinterização; (iii) realizar a prensagem e sinterização do compósito Al-Fe₂Al₅; (iv) realizar ensaios mecânicos para avaliar as propriedades do compósito obtido;

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de novos materiais foi e sempre será uma preocupação, pois sua importância em qualquer área da engenharia é muito grande. Apesar de existirem inúmeros materiais de todos os grupos, a busca por propriedades mais específicas, a escassez ou limitações de obtenção e produção de matérias primas e fatores socioambientais sempre levam à pesquisa de novos materiais.

Compósitos de ferro e alumínio são amplamente utilizados na indústria, principalmente a aeroespacial, e entre eles, o Al-Fe₂Al₅ é o que apresenta menos estudos, por isso se é justificada a pesquisa sobre o mesmo.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais utilizados na engenharia podem ser divididos basicamente em metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Cada um desses grupos contém uma enorme gama de materiais diferentes entre si e diferentes entre grupos.

Um material compósito é combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos que tem uma interface reconhecível entre eles (ASM Handbook Composites, 2001, p.39). Estes materiais distintos podem ser de grupos distintos, como uma cerâmica e um metal, ou do mesmo grupo, como uma matriz metal-metal.

O objetivo de um compósito é a união de propriedades físico-químicas de seus constituintes. Compósitos modernos são normalmente otimizados para se obter um balanço de propriedades para um objetivo específico.

Segundo (Callister, 212, p.424), os materiais compósitos podem ser divididos comumente em três categorias, sendo elas os compósitos reforçados com partículas (ou com reforço descontínuo), compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais. Cada um destes grupos contém novas subdivisões, sendo tratados aqui neste trabalho os compósitos de matriz metálica com reforço descontínuo.

2.2COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Como sugere o nome, os compósitos de matriz metálica (*MMC – Metal-Matrix Composites*), são aqueles que apresentam uma matriz (ou base) metálica com um reforçante em forma de descontínuo ou fibra, metálica ou não.

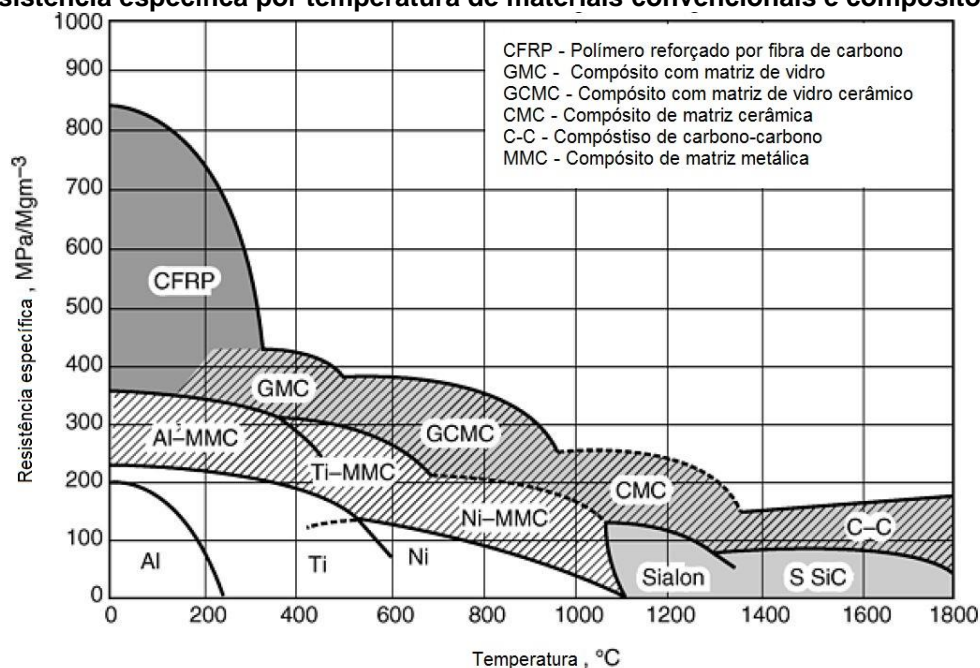
As superligas, assim como as ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre são empregadas como materiais de matriz (CALLISTER, p.442), pois possuem relativa ductilidade, o que favorece a produção de compósitos.

Tantos compósitos de matriz metálica com reforço contínuo quanto descontínuo são utilizados em aplicações estruturais, pois a incorporação de reforços

aumenta sua rigidez e resistência da matriz (ASM Handbook Composites, 2001, p.1946). Este aumento na rigidez causa uma diminuição na ductilidade, por isso é importante que o material da matriz seja dúctil, para que ocorra um balanço nas propriedades finais do compósito.

A figura 1 mostra um comparativo da resistência específica de alguns materiais convencionais de engenharia e compósitos de matriz metálica.

Figura 1–Resistência específica por temperatura de materiais convencionais e compósitos



Fonte: Adaptado de ASM Handbook Vol. 21

2.3 REFORÇOS DESCONTÍNUOS PARA COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Segundo ASM Handbook Composites, 2001, p.1947, compósitos de matriz metálica com reforço descontínuo são mais baratos para fabricação do que os com reforço contínuo e apresentam aumento considerável de propriedades desejadas.

Ainda segundo ASM, as propriedades destes compósitos são praticamente isotrópicas enquanto as propriedades de compósitos com reforço contínuo são anisotrópicas.

Assim, reforços descontínuos em matrizes de alumínio são amplamente utilizados comercialmente. Estes compósitos podem ser fabricados tanto por fundição quanto por outros métodos de metalurgia, como a sinterização.

2.4 METALURGIA DO PÓ

A definição de metalurgia do pó, segundo (Chiaverini, 1992), é a técnica de produzir peças metálicas a partir da compactação e aquecimento de metais previamente pulverizados, podendo ser utilizados pós de um ou mais metais ou ligas.

O processo é dado pela mistura homogênea do pó de um ou mais materiais seguidos de uma prensagem em um molde que dá a forma final à peça. Após a prensagem no formato requerido, as peças são submetidas a um forno a temperatura controlada e mantidas por um tempo determinado.

É utilizada principalmente para peças que demandem bom acabamento e tenham complexidade dimensional. Também é utilizado para processamento de materiais com alto ponto de fusão, visto que o processo não atinge tal ponto para a formação da peça.

2.5 O COMPÓSITO Fe_2Al_5

Dentre os intermetálicos formados entre ferro e alumínio, o mais comum e mais utilizado é o Fe_4Al_{13} , que se forma mais facilmente na reação entre os dois metais.

Este intermetálico apresenta aumento na dureza e pode ser utilizado como material de revestimento de superfícies, assim como outros intermetálicos de ferro e alumínio.

Porém, durante a sinterização, o Fe_2Al_5 pode aparecer como subproduto do processo.

Segundo (Yousaf, Iqbal, e Ajmal, 2011), é de conhecimento geral que na aluminização do aço, as fases intermetálicas de FeAl se formam na sua superfície. Neste processo, um dos intermetálicos de ferro e alumínio presentes é o Fe_2Al_5 , que é um material frágil.

Junto com a fragilidade, o intermetálico Fe_2Al_5 deve apresentar uma microdureza Vickers alta, na faixa de 900 a 1000 HV segundo (Lison, 1998).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O compósito utilizado neste trabalho foi produzido dentro das permanências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco. Para sua produção, foram misturados pós metálicos de alumínio e ferro nas quantidades necessárias para a obtenção do intermetálico Fe_2Al_5 .

A metodologia implantada na obtenção do Fe_2Al_5 , foi baseada na proposta por Kang, 2005. Seguindo os parâmetros de tempo, temperatura, atmosfera e conformação do recipiente onde os pós de ferro e alumínio estavam alocados.

Primeiramente foram misturados pós de alumínio e ferro na proporção de 45,27% de peso de Ferro e 54,73% de Alumínio em misturador em Y por 30 minutos.

A mistura de 26,86 g foi colocada em um tubo e suas extremidades foram seladas mecanicamente. O tubo teve então sua seção transversal reduzida em 60% por meio de prensagem e depositada no forno tubular. Foi então feito vácuo no tubo com uma bomba de vácuo por 10 minutos e então o forno foi programado para temperatura de 450 °C, durante uma hora, a uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto.

Após 105 minutos, o tubo foi retirado e novamente sua seção transversal foi diminuída, agora para 30%. Então o material foi novamente colocado no forno tubular. Novamente foi feito vácuo, e então o forno foi programado a 750 °C, por mais uma hora, com taxa de 10 °C por minuto.

A conformação do tubo foi realizada na prensa hidráulica P100001 BONEVAU com uma carga de 13 toneladas.

Depois do processo finalizado, o intermetálico foi retirado do forno, o tubo selado foi aberto, e o intermetálico produzido foi então moído e peneirado. A moagem realizada foi manual utilizando almofariz e pistilo cerâmicos. O pó foi então peneirado em peneira de 53 μ m assim como o alumínio puro.

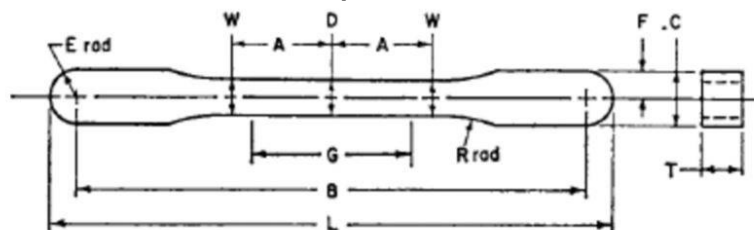
O alumínio puro comercial foi adquirido da empresa Alcoa e apresenta uma composição química de 99,7% de Al, 0,20% de Fe, 0,06% de Si e 0,02% de outros metais.

O intermetálico produzido foi então misturado com alumínio puro em misturador em Y por 30 minutos, com rotação de 30 RPM na proporção de 80% de

alumínio puro e 20% de Fe_2Al_5 . Após a mistura dos pós, os corpos de prova foram fabricados.

As dimensões dos corpos de prova seguiram os parâmetros descritos na norma ASTM B557M-10 para alumínio, conforme Figura 2.

Figura 2 –Adaptado Modelo de corpo de prova para ensaio de tração segundo a norma ASTM B557M-10 para alumínio.



Área de Prensagem = 1.00 in.²

	Dimensões, pol.
G	1.000 ± 0.005
D	0.225 ± 0.001
W	0.235 ± 0.001
T	0.200 to 0.250
R	1
A	$\frac{5}{8}$
B	3.187 ± 0.001
L	3.529 ± 0.001
C	0.343 ± 0.001
F	0.1715 ± 0.0010
E	0.171 ± 0.001

Fonte: Adaptado de Norma ASTM B557M-10

Para a fabricação dos corpos de prova, o molde foi lavado com álcool, secado e posteriormente lubrificado com uma solução de acetona e estearato, para melhor desmoldagem e para evitar contaminação do material. Após o molde ser lubrificado, a mistura de alumínio com compósito foi colocada. Uma chapa metálica foi então posicionada no fundo do molde, travada e levada a prensa hidráulica para a prensagem.

Figura 3 – Molde para fabricação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os corpos foram prensados em uma prensa hidráulica Bonevau P 100001 utilizando uma pressão de 35 toneladas e mantidos a essa pressão por um minuto.

A desmoldagem foi então realizado cuidadosamente para evitar a quebra do corpo de prova verde. O próximo passo foi o processo de retirada de rebarba para melhor acomodar os corpos de prova no forno para a sinterização.

Juntamente com os corpos de prova de $\text{Al-Fe}_2\text{Al}_5$, foram fabricados corpos de prova de alumínio puro, seguindo os mesmos parâmetros, para que fosse possível comparação entre ambos.

Depois de fabricados e acabados, os corpos de prova foram alocados no suporte para corpos de prova do forno tubular, então introduzidos no forno. Uma bomba hidráulica de vácuo foi então acoplada ao forno para a formação de uma atmosfera controlada.

A bomba de vácuo permaneceu ligada por 15 minutos para garantir a formação de vácuo no interior do forno. Após os 15 minutos, a entrada de nitrogênio foi aberta e o tubo de saída do forno foi fechado.

O forno foi então programado e ligado. Os parâmetros utilizados foram o de temperatura de 660 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto. A atmosfera controlada utilizada foi de nitrogênio 5.0 a 1,5 kgf/cm² de pressão.

A fabricação dos corpos de prova foi realizada em duas ocasiões, mantendo-se todos os parâmetros de peneiramento, mistura, forma, preparação e sinterização, mudando a quantidade de materiais, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de materiais em cada batelada de produção de compósito

Quantidade de Al (g)	Quantidade de Fe ₂ Al ₅ (g)
32	12
8	3

Fonte: Autoria própria, 2017.

Depois de fabricados os corpos de prova, os ensaios mecânicos e metalográficos foram realizados para a comparação de valores entre os corpos de metal puro e os de compósito de matriz metálica.

Os primeiros ensaios realizados foram os de Arquimedes, seguindo norma ASTM B962-14 para determinar a massa específica dos corpos de prova.

Para a realização deste ensaio, a massa de cada corpo de prova foi medida ao ar e então submerso em água tendo uma extremidade amarrada e suspensa. Então a massa de água deslocada também foi medida e utilizando a equação 1 foi calculada a massa específica de cada corpo. A temperatura da água também foi medida para a determinação da massa específica.

$$ME = \frac{A \cdot \rho_{\text{água}}}{B} \quad (1)$$

Onde A é a massa do corpo de prova ao ar, B a massa de água deslocada e $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água na temperatura medida.

Após ensaio de Arquimedes, foram realizados ensaio de tração e de microdureza para se determinar propriedades mecânicas dos materiais.

O ensaio de tração foi realizado para a obtenção de valores de resistência a tração e percentual de alongamento. Eles seguiram os parâmetros da norma ASTM B557M-10 e foram realizados em uma máquina universal de ensaios de bancada.

Foram então cortadas amostras de material de um dos corpos de prova de alumínio puro e do compósito para a realização do ensaio de microdureza e para a metalografia.

O processo de preparação para a microdureza começa com o corte de uma amostra de corpo de prova. Essa amostra foi então posicionada em uma embutidora, onde foram colocadas granalha e baquelite.

Após embutido, o corpo de prova passou pelo processo de lixamento, em lixas de granulometria gradativamente mais finas, de 220, 400, 600, 800 e 1200 para

se atingir uma superfície o mais uniforme possível. Isso é necessário para o ensaio de microdureza.

Os parâmetros do ensaio de dureza foram a carga de 1 kg, ou 9,81 N, por 12 segundos com uma lente de aumento de 400 vezes para análise da indentação.

O equipamento utilizado para o ensaio de microdureza foi um Microdurômetro Vickers modelo TH710.

Depois de realizado o ensaio de microdureza, as amostras embutidas foram novamente lixadas e polidas para a realização da metalografia.

O último ensaio realizado foi a difratometria de raio-x, ou DRX, realizada pela central de análises da UTFPR Pato Branco. Para tanto, uma amostra do material foi retirada e moída para que fosse possível a realização do ensaio. Os parâmetros do teste são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetro da difratometria de raio-X

Raio-X	40 kV, 15 mA	Velocidade de <i>scan</i> / tempo	2.0000 deg/min
Goniômetro	MiniFlex 300/600	Comprimento do passo	0.0200 deg
Ligação	Padrão	Eixo de varredura	Theta/2-Theta
Filtro	Nenhum	Alcance de varredura	20.0000 - 80.0000 deg
Detector	SC-70	Ranhura receptora #1	1.250deg
Modo de varredura	CONTINUO	Ranhura receptora #2	0.3mm

Fonte: Adaptado de Central de Análises UTFPR, 2017.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todo o processo de fabricação foi possível obter o compósito Al – Fe₂Al₅. Os corpos de prova apresentaram rigidez suficiente para manuseio e para serem realizados ensaios. Os corpos de prova fabricados são mostrados na Figura 4, onde os corpos mais escuros, à esquerda, são de compósito e os mais claros, à direita, de alumínio puro.

Figura 4 – Corpos de prova de alumínio puro (à direita) e de intermetálico (à esquerda)



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os corpos de prova foram nomeados de CPXC, para corpos do compósito Al-Fe₂Al₅, e CPXA para os corpos de prova de alumínio puro, onde X = 1, 2, 3, ..., n.

4.1 ENSAIO DE ARQUIMEDES

Os valores encontrados no ensaio de Arquimedes foram satisfatórios, pois demonstram claramente o aumento da densidade dos corpos de prova de compósito se comparados ao de alumínio puro.

Os resultados apresentados na Tabela 2 também apresentam uma relação satisfatória entre a densidade teórica dos materiais e a densidade medida, o que ajuda a afirmar que o compósito realmente se formou.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de Arquimedes

CP	Massa CP Seco [g]	Massa Específica CP [g/cm ³]	Massa Específica do Material [g/cm ³]	Densidade experimental em relação à densidade teórica [%]
CP1C	4,772	2,78	3,15	87,63
CP2C	5,034	2,73	3,15	86,63
CP3C	5,265	2,71	3,15	86,52
CP4C	5,699	2,84	3,15	87,12
CP1A	7,77	2,48	2,67	92,72
CP2A	7,563	2,53	2,67	94,01

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova sinterizados apresentaram certa fragilidade, e somado ao fato de que alguns corpos de prova empenaram durante o processo de sinterização, o procedimento de ensaio de tração teve de ser cuidadoso. Alguns corpos de prova foram quebrados antes de ocorrer o ensaio devido a esses fatores, porém os resultados dos corpos ensaiados encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de tração

CP	Limite de Resistência a Tração [Mpa]	Alongamento [%]
CP1A	68,57	11,81%
CP2A	67,33	9,25%
CP3A	56,59	11,42%
CP1C	22,16	0,00%
CP2C	24,34	0,00%
CP3C	19,96	0,00%

Fonte: Autoria própria, 2017.

Os corpos de prova de alumínio puro apresentaram valores de alongamento e de limite de resistência a tração satisfatórios e condizentes com os valores teóricos do material sinterizados. Já os corpos de prova de compósito, apresentaram um deslocamento nulo e baixos valores de tensão de rompimento, o que, quando comparado aos valores do alumínio puro, solidifica a tese de que o compósito fragiliza o material.

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA

As amostras de cada um dos corpos de prova foram submetidas a nove ensaios de microdureza, tendo o seu maior e menor valores desconsiderados do cálculo da média e do desvio padrão. Os valores encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de microdureza

CP	Média de Dureza [HV]	Desvio Padrão
CP2A	40,67	0,91
CP2C	46,73	3,38

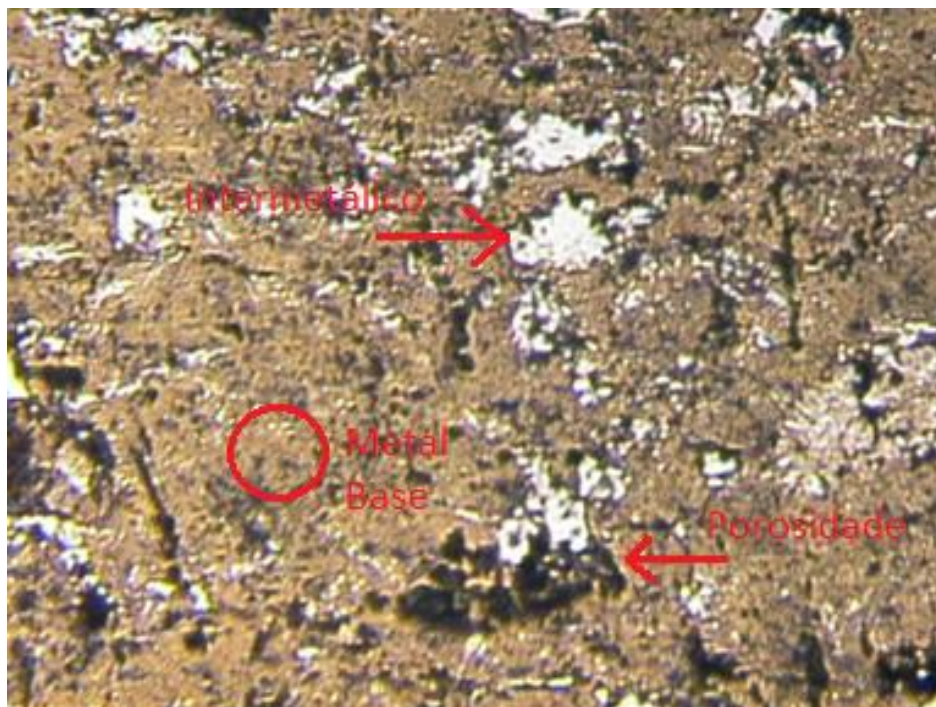
Fonte: Autoria própria, 2017.

A amostra do corpo de prova do compósito apresentou maior dureza do que o de alumínio puro. Porém a diferença entre os resultados foi menor do que o esperado. Considerando a regra das misturas de que a dureza é diretamente proporcional à dureza de cada material mistura, a dureza esperada seria da ordem $0,8 \cdot \text{dureza Al puro} + 0,2 \cdot \text{dureza do Fe}_2\text{Al}_5$ que é igual a 232,536 HV.

4.4 METALOGRAFIA

A metalografia do material mostra claramente a distinção do intermetálico, que são os pontos mais claros na figura 5, e a matriz de alumínio, além de apresentar vários pontos de porosidade na superfície, como esperado de um material sinterizado.

Figura 5 – Metalografia do intermetálico Al-Fe₂Al₅



Fonte: Autoria própria, 2017.

É possível notar na figura 5, que a maior parte da porosidade ocorreu nas regiões do entorno do intermetálico, ou seja, a porosidade é mais presente no alumínio base do que no composto.

4.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

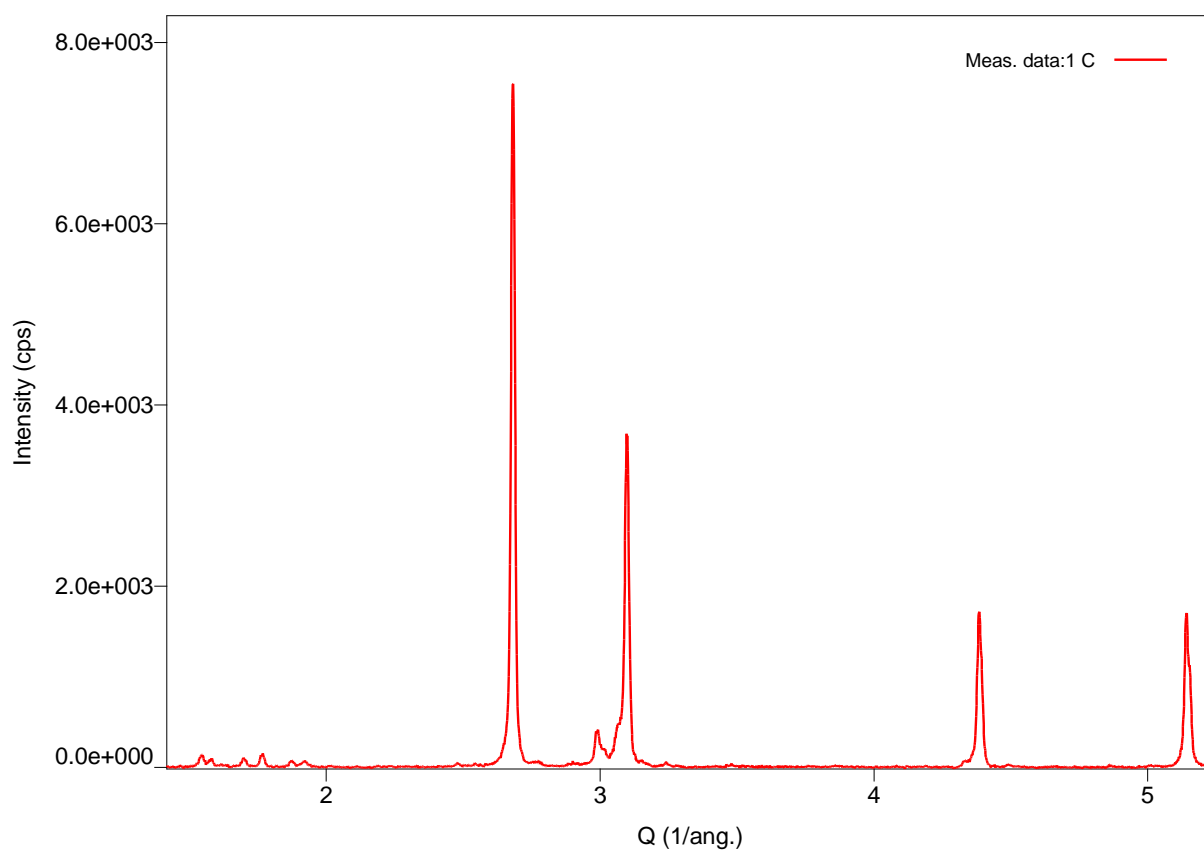
A difratometria de raio-x realizada após os ensaios mecânicos mostrou que a matriz de alumínio reagiu com o reforço de Fe₂Al₅, formando Fe₄Al₁₃ juntamente com o composto. O resultado do ensaio é mostrado na tabela 6 e na figura 6.

Tabela 6 – Resultados da difratometria de raios-X

Nome da fase	Formula	Proporção (%)
Alumínio	Al	77,6
Ferro Alumínio	Al ₁₃ Fe ₄	22,4

Fonte: Adaptado de Central de Análises UTFPR, 2017.

Figura 6 – Difratoograma de raio-X das amostras



Fonte: Central de Análises UTFPR, 2017.

O $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ é o intermetálico de ferro e alumínio mais comum, que apresenta uma dureza superior ao alumínio puro, porém inferior ao Fe_2Al_5 . Dado intermetálico também causa a fragilização do alumínio puro, o que é provado pelo alongamento nulo dos corpos de prova ensaiados.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de caracterizar o compósito Al – Fe₂Al₅ obtido por meio de Metalurgia do Pó por meio de ensaios mecânicos, e com base nos resultados obtidos com a realização da atividade experimental destaca-se as seguintes conclusões:

Foi produzido um compósito de alumínio e com o intermetálico Fe₂Al₅ e suas principais propriedades foram determinadas

Ocorreu um aumento na massa específica do material, variando de 2,5 g/cm³ para o alumínio puro sinterizado, à uma faixa de 2,75 g/cm³ para o intermetálico Al-Fe₂Al₅.

A dureza do material compósito também foi elevada, passando de uma média de 40,67 HV para o metal puro, à 46,73 HV para o compósito.

No ensaio de tração foi mostrado o alongamento esperado do alumínio, contra o alongamento nulo do Al-Fe₂Al₅, o que prova que o compósito fragiliza a matriz de alumínio puro.

E durante o DRX, foi constatado a formação de Fe₄Al₁₃ através da reação entre Fe₂Al₅ e Al, o que, juntamente com a porosidade do material causou fragilidade aos corpos de prova e a diminuição da microdureza esperada.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, vol 21, 1990.

CALLISTER, Willian D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. Metalurgia do pó: técnicas e produtos. 3ª ed. São Paulo, 1992

BARON, Richard P. COLEMAN, Jones. WAWNER, Frank E. WERT, John A. Mechanical properties of aluminum matrix composites reinforced with sintered ferrous compacts. Materials Science and Engineering A259, p 308–313, 1999.

O'DONNELL, G. LOONEY, L. Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology. Materials Science and Engineering A303, p 292–301, 2001.

GOKÇE, A. FINDIK, F. Mechanical and physical properties of sintered aluminum powders. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol 30, issue 2, 2008

MATYSIK, Piotr. JÓZWIAK, Stanisław. CZUJKO, Tomasz. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System—Microstructures and Mechanical Properties. Materials, 2015.

YOUSAF, M. IQBAL, J. AJMAL, M. Variables affecting growth and morphology of the intermetallic layer (Fe₂Al₅). Materials Characterization, Vol 62, p 517 – 525, 2011.

HARIS RUDIANTO, YANG SANG SUN, KIM YONG JIN² and NAM KI WOO³ Sintering Behavior of Hypereutectic Aluminum-Silicon Metal Matrix Composites Powder. International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol. 6, p. 628 – 633, 2012.

http://www.academia.edu/5897487/Designation_B557_10_Standard_Test_Methods_for_Tension_Testing_Wrought_and_Cast_Aluminum-and_Magnesium-Alloy_Products

Lison R. Wege zum Stoffschluss über Schweiss und Lötprozesse – DVS-Verlag GmbH, 1998.

Kang, Hui-Zhen, Lee, Sanboh, Hu, Chen-Ti. The role of pre-formed Fe₂Al₅ in P/M processing of Fe₃Al, 2005.