

Fabricação e caracterização da liga de alumínio AA7009 através de técnicas de metalurgia do pó

Manufacturing and characterization of aluminum alloy AA7009 processed by powder metallurgy techniques

DOI:10.34115/basrv5n3-023

Recebimento dos originais: 17/05/2021

Aceitação para publicação: 17/06/2021

Enéas Carlos de Oliveira Silva

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife – PE
E-mail: eneasoliver@gmail.com

Daniel Ricardo de Araújo Amaro

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife – PE
E-mail: daniel.ricardo@ufpe.br

Diogo Monteiro do Nascimento

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife-PE
E-mail: diogomonteiro.nascimento@gmail.com

Eduardo José Silva

Engenheiro Mecânico
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife – PE
E-mail: eduardo.jose184@gmail.com

Moisés Euclides da Silva Junior

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife – PE
E-mail: juniormoisés7@hotmail.com

Thiago Batista David

Engenheiro Mecânico
Centro Universitário Estácio do Recife
Recife – PE
E-mail: tebmaster2013@gmail.com

Wilton Batista da Silva

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Recife – PE
E-mail: wilton.batista@ufpe.br

Oscar Olimpio de Araujo Filho
Doutor em Tecnologia Nuclear - Materiais
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Recife – PE
E-mail: oscar.oaraujo@ufpe.br

RESUMO

Entre as diversas ligas de alumínio, destacam-se as da série 7XXX, aplicadas principalmente em componentes estruturais de aeronaves, pois apresentam níveis mais elevados de resistência e dureza. Assim, este trabalho consistiu na fabricação e caracterização da liga de alumínio AA7009, fabricada via metalurgia do pó. Os pós foram processados através da moagem de alta energia (MAE) durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas e em seguida caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-X (DRX) e por fim granulometria por Difração a Laser. Após a caracterização dos pós, os mesmos foram consolidados através de compactação uniaxial a frio, seguida de uma sinterização por fase sólida. Por fim, foi realizada a caracterização microestrutural do sinterizado através de MO e MEV, a composição química do material foi analisada através da técnica de EDS, e em seguida o material foi submetido ao ensaio de microdureza Vickers, possibilitando o estudo da propriedade de dureza obtida nos corpos de prova. A liga de Al AA7009 processada por MAE durante 2h apresentou um ganho de 246,23% de dureza na seção superficial e 211,16% na seção transversal, quando comparado com o material consolidado da liga de Al AA1100 sem moagem.

Palavras-Chave: Metalurgia do Pó, Moagem de Alta Energia, Liga AA7009.

ABSTRACT

Among the various aluminum alloys, those of the 7XXX series stand out, mainly applied to structural components of aircraft, as they have higher levels of strength and hardness. So, this work consisted in the manufacture and characterization of the aluminum alloy AA7009, manufactured via powder metallurgy route. The powders were processed by high energy ball milling (HEBM) for 0.5, 1.0 and 2.0 hours and then characterized by scanning electron microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (DRX) and finally Laser Diffraction granulometry. After the characterization of the powders, they were consolidated by cold uniaxial compaction, followed by sintering by solid phase. Finally, the microstructural characterization of the sinter was carried out using OM and SEM, the chemical composition of the material was analyzed using the EDS technique, and then the material was subjected to the Vickers microhardness test, enabling the study of the obtained hardness property in the specimens. The Al AA7009 alloy processed by HEBM for 2h showed a gain of 246.23% of hardness in the surface section and 211.16% in the cross section, when compared with the consolidated material of the Al AA1100 alloy without grinding.

Keywords: Powder Metallurgy, Mechanical Alloying, AA7009 Alloy.

1 INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de alumínio é a prova de que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. Dentre as características físico-químicas, destaca-se o seu baixo peso específico, comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica/térmica (ABAL, 2007).

Um dos motivos que torna o alumínio tão atrativo, é o fato de poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, formando ligas a partir destas combinações para obtenção de características tecnológicas. As ligas de alumínio são amplamente utilizadas na indústria devido às suas propriedades: baixo peso específico, baixa densidade, ductilidade, boa condutividade térmica e elétrica, resistência à corrosão (KUMAR, 2018). Dentre essas, destacam-se as ligas da série 7XXX (Al, Zn), utilizada principalmente na indústria aeronáutica (fuselagem de aeronaves), pois oferece uma maior resistência mecânica (ASM, 1992).

O alumínio e suas ligas atualmente são processados por técnicas de metalurgia com aplicações no setor industrial em grande escala (BARBOSA, 2014; CHIAVERINI, 2001). A metalurgia do pó é um processo de fabricação que consiste na manufatura de peças a partir da consolidação de pós-metálicos, possui baixo custo econômico, utiliza o aproveitamento máximo da matéria-prima (acima de 95%) e obtenção de peças com formas complexas. Tornando-se assim muitas vezes mais competitivo do que outros processos de fabricação (CHIAVERINI, 2001, DE ARAUJO FILHO et al., 2017).

O presente trabalho consiste em fabricar ligas de alumínio AA7009, utilizando o processo de fabricação por metalurgia do pó. Os pós foram misturados e homogeneizados através de técnicas de moagem de alta energia, submetidos a uma compactação uniaxial, obtendo forma e dimensões e por fim sinterização por fase sólida, promovendo uma maior rigidez, dureza e resistência mecânica dos materiais processados (DE ARAUJO FILHO et al., 2014).

2 METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo de descrever de forma clara e sucinta todos os materiais e procedimentos utilizados na fabricação da liga de alumínio AA7009. A metodologia adotada tanto para a etapa de MAE, quanto para a de sinterização segue o exposto por De Araujo Filho et al. (2016).

Inicialmente foi selecionada a composição das ligas a serem fabricadas de acordo com o ASM Handbook (1992), de posse dos percentuais referentes a cada elemento das ligas, os pós elementares foram separados e em seguida pesados em uma balança analítica. Posteriormente esses pós foram submetidos a moagem de alta energia (MAE) através de um moinho de bolas vibratório do tipo SPEX, durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas (DE ARAUJO FILHO et al., 2014).

A caracterização microestrutural e química do material particulado foi realizada através das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), o estudo e identificação das fases geradas após a MAE foi realizado através de difração de RX.

Os pós processados por MAE e o pó da liga de alumínio puro AA1100 foram consolidados através de compactação uniaxial a frio e sinterização por fase sólida.

Para tal estudo foram fabricados três corpos de prova sinterizados para cada um dos tempos de moagem e mais 3 corpos de prova sinterizados da liga de alumínio AA1100 sem moagem, totalizando assim, 12 corpos de prova, em seguida os corpos de prova foram submetidos ao processo de preparação metalográfica (corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico). A caracterização microestrutural e química do material consolidado, foi realizada através das técnicas de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada a espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Finalizando o processo de caracterização do material consolidado, os corpos de prova sinterizados foram submetidos a um ensaio de microdureza Vickers, determinando assim a propriedade de dureza do material estudado.

2.1 PESAGEM DOS PÓS

As massas dos pós elementares foram pesadas utilizando-se uma balança analítica com precisão de 4 casas decimais, da marca SHIMADZU, modelo ATI224.

A Tabela 1 mostra a quantidade de massa (g) utilizada na moagem de alta energia para a fabricação das ligas de alumínio. A massa total calculada para processamento dos pós foi 12g + ácido esteárico (2% da massa total), totalizando 12,24g (pó).

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio AA 7009.

Amostra	Tempo de Moagem	Al Puro (g)	Si (g)	Fe (g)	Cu (g)	Mn (g)	Zn (g)	Ti (g)	ACP (g)	Massa da Esfera (g)
AA 7009	0,5h	11,0887	0,0241	0,0244	0,1563	0,0121	0,6722	0,0245	0,2439	120
	1,0h	11,0881	0,0243	0,0247	0,1564	0,0126	0,672	0,0241	0,2415	120
	2,0h	11,0883	0,0243	0,0246	0,1565	0,0125	0,6725	0,0245	0,2406	120

Fonte: Adaptado de ASM HandBook (1992).

2.2 PROCESSAMENTO DOS PÓS (MAE)

Para o processamento dos pós, utilizou-se um moinho vibratório de alta energia do tipo SPEX Figura 1, equipamento este, comumente empregado no processamento de amostras em laboratório. material foi processado durante períodos de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, a uma velocidade de rotação de 720 rpm, conforme aplicado por Zarzar et al. (2021a) e Zarzar et al. (2021b).

Figura 1. Moinho de bolas vibratório (SPEX).



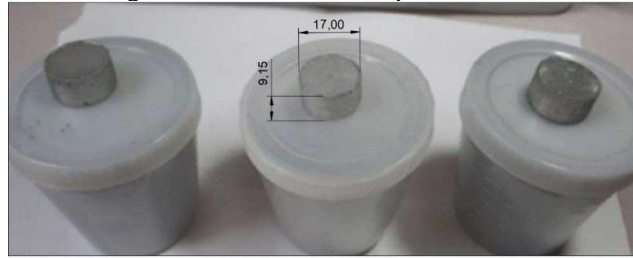
Fonte: Silva Junior (2020).

Os pós foram colocados na jarra (recipiente de moagem) fabricada em aço inox 304L e como corpo de moagem foi utilizado esferas metálicas. A relação de massa de esfera/massa de pó foi de 10:1, ou seja, para cada 120g de esferas foram utilizadas 12g de massa dos pós conforme indicado por Nascimento et al. (2021), Zarzar et al. (2021a) e Zarzar et al. (2021b).

2.3 COMPACTAÇÃO E SINTERIZAÇÃO

Os pós processados foram submetidos a uma compactação uniaxial a frio, em numa prensa hidráulica. O tempo de aplicação da carga foi de 10 minutos a uma pressão de 40 ton. O produto resultante da compactação por apresentar alguma consistência e resistência mecânica limitada, é denominado de “compactado verde”. O material compactado ganhou forma e dimensionamento específico, obtendo diâmetro de 17,00mm e espessura de 9,15mm, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2. Amostras de compactado verde.



Fonte: Autor (2018).

Logo após a compactação, as amostras (compactado verde) foram sinterizadas num forno a vácuo com atmosfera de argônio, as amostras foram sinterizadas durante 5h a uma temperatura de 500 °C, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min conforme indicado em Nascimento et al. (2021), Zarzar et al. (2021a) e Zarzar et al. (2021b).

Com o término do aquecimento o forno foi desligado e a temperatura resfriada calmamente dentro do forno até permanecer na temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento foi de 0,459 °C/min.

2.4 PREPARAÇÃO METALOGRAFICA

Para a análise no microscópio ótico, foram utilizadas as amostras sinterizadas. Elas foram cortadas (particionadas) em uma “cut-off”, foi usado uma máquina de policorte, da marca Arotec, modelo COR 80, sendo usado como meio cortante um disco de corte abrasivo (óxido de silicato). O principal objetivo do corte foi obter para estudo as secções superficiais e transversais. Logo após processo de corte dos materiais, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento a quente.

Com as amostras embutidas, a etapa subsequente é a de lixamento. A técnica utilizada para o lixamento foi a manual, que consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixa de granulometria cada vez menor. Para este trabalho foram utilizadas as lixas metalográficas com granulometrias de: 180#, 240#, 320#, 600#, 800#, 1000# e 1200#.

Após o lixamento, a próxima etapa é a do polimento, que tem como principal função eliminar os riscos e marcas da superfície. Para o polimento das amostras foi utilizada uma pasta de diamante de 3 µm e 1 µm, dando um melhor acabamento para a amostra, pano de polimento adequado. A politriz usada no polimento é da marca Arotec, modelo Aropol 2V.

Por fim, com o intuito de revelar os contrastes das fases, as amostras foram submetidas ao ataque químico, através de uma solução aquosa de ácido fluorídrico a 0,5% durante um tempo de 15 segundos, através do método de esfregaço, posteriormente as

amostras foram lavadas com água corrente, etanol e em seguida secadas por um jato de ar quente paralelamente a superfície atacada.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CONSOLIDADO

Os corpos de prova dos materiais consolidados foram submetidos a caracterização microestrutural, através das técnicas de microscopia ótica (MO), e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a análise de composição química pontual foi realizada através do sensor de EDS acoplado ao MEV utilizado. Por fim as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers.

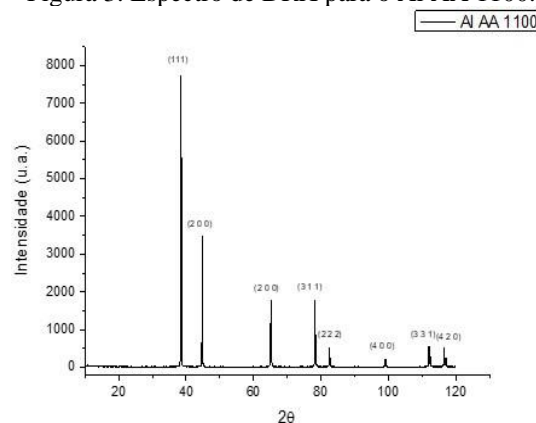
3 RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos através do presente trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

A Figura 3 representa o espectro de raios – X para o Al AA 1100. No difratograma, o alumínio apresenta estrutura CFC, conforme a literatura este tipo de estrutura deve ter os valores dos índices de Miller (h, k e l) todos os números pares ou ímpares (CALLISTER, 2012).

Figura 3. Espectro de DRX para o Al AA 1100.

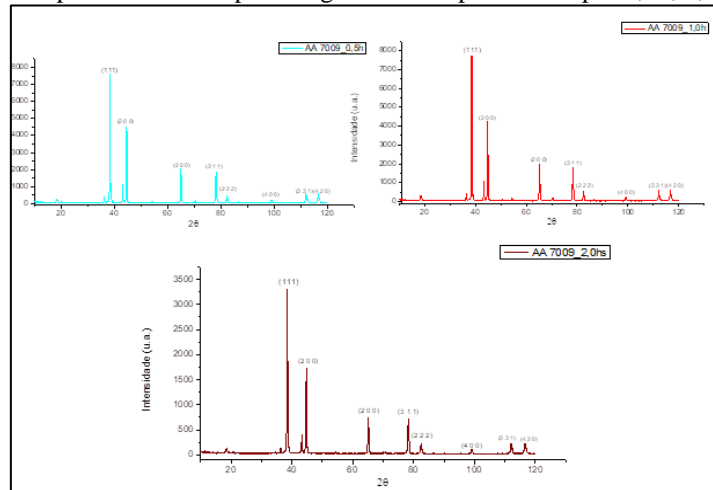


Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4 são apresentados os difratogramas das amostras de pós da liga de alumínio AA 7009, processadas durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas através de moagem de alta energia. Observa-se que não houve alterações significativas nos difratogramas para os diferentes tempos de moagem. Observa-se uma variação de intensidade dos picos com

relação à liga processada durante 2,0h, apesar da mudança na intensidade dos picos, os valores de ângulos de difração (2θ) da matriz em alumínio (AA 1100) são os mesmos. Eventualmente outras fases dos elementos de ligas adicionados ao AA 1100 não foram identificados, pois ficou abaixo da resolução do equipamento, inferior a 5%.

Figura 4. Espectros de DRX para a liga AA 7009 processada por 0,5h, 1,0h e 2,0h.

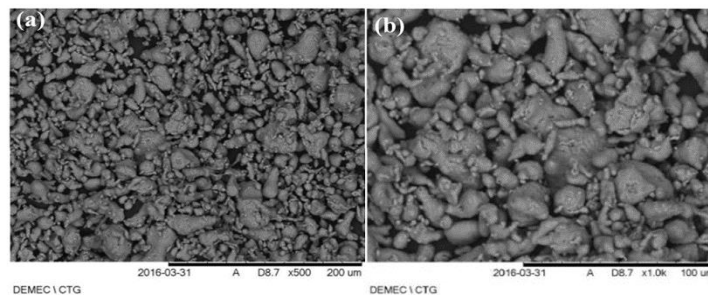


Fonte: Autor (2018)

A Figura 5 (a, b) apresenta as imagens de MEV do pó de Al AA 1100 (alumínio comercialmente puro), como recebido, utilizado neste trabalho.

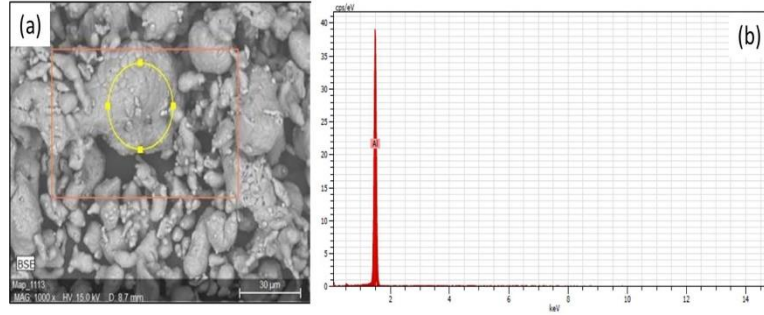
A Figura 5 destaca a morfologia original, predominantemente esférica (grãos equiaxiais) do Al AA 1100 recebido para pesquisa obtidas por Silva (2017), sem reforço e sem sofrer o processo de moagem de alta energia (MAE). Essa morfologia é típica de material dúctil e de pó fabricado pelo método de atomização a ar, que promove a solidificação do metal em partículas finamente divididas. A Figura 6 (a, b) foram obtidas por Silva (2017) e apresenta a região analisada e o espectro de EDS do pó de Al AA 1100. A análise de EDS do AA 1100 demonstra apenas o espectro de Al na composição. É importante ressaltar que não foi identificada a presença de contaminação neste pó

Figura 5. Imagem de MEV – Al AA 1100. (a) aumento de 500x; (b) aumento de 1000x.



Fonte: Silva (2017).

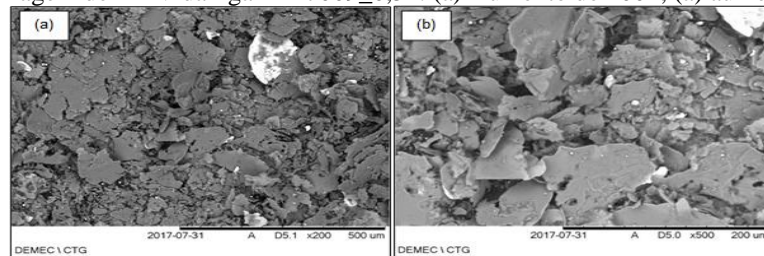
Figura 6. EDS do Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.



Fonte: Silva (2017).

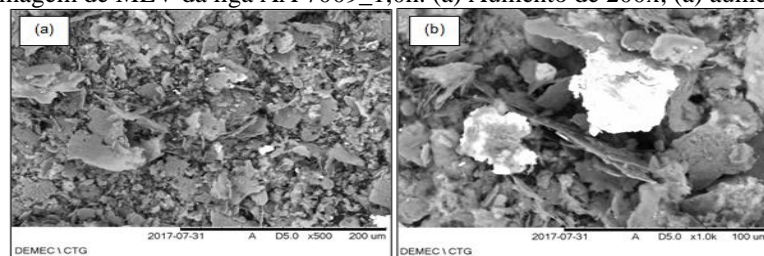
As Figuras 5 a 7 apresentam as imagens de MEV para a liga processada AA 7009 durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h. Para a amostra de pó processada no moinho de alta energia durante 0,5h, a liga de alumínio AA 7009 apresentou uma morfologia relativamente achatada e irregular. Observa-se que com o aumento do tempo de moagem para 1h, as partículas começam a diminuir e ficar menos achatadas e em 2h, a morfologia dos pós vai tendendo para uma forma mais regular.

Figura 7. Imagem de MEV da liga AA 7009_0,5h. (a) Aumento de 200x; (b) aumento de 500x.



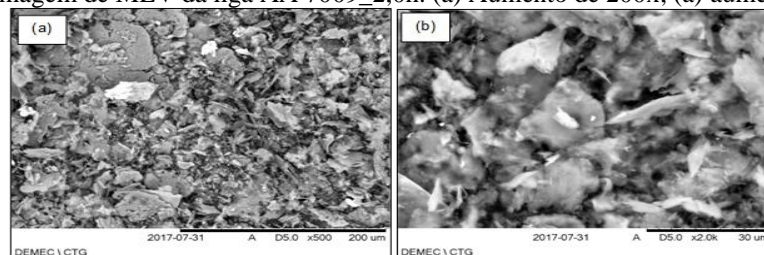
Fonte: Autor (2018).

Figura 8. Imagem de MEV da liga AA 7009_1,0h. (a) Aumento de 200x; (b) aumento de 500x.



Fonte: Autor (2018).

Figura 9. Imagem de MEV da liga AA 7009_2,0h. (a) Aumento de 200x; (b) aumento de 500x.

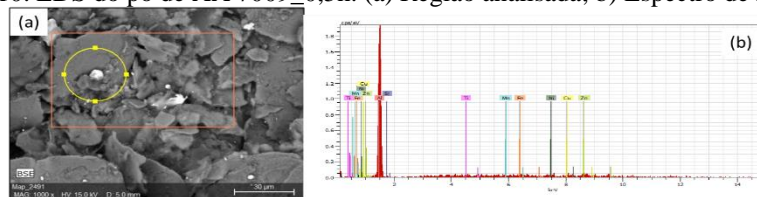


Fonte: Autor (2018).

As figuras 10 a 12 apresentam os EDS das amostras de pós processados em 0,5h, 1,0h e 2,0h por moagem de alta energia.

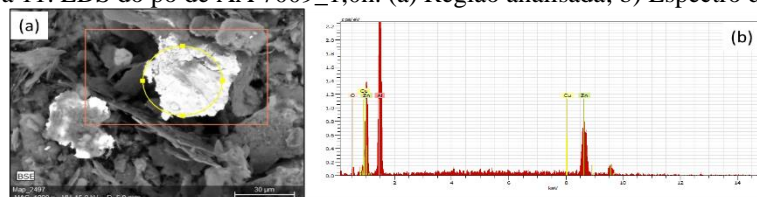
A análise por EDS, na Figura 10, da liga de alumínio AA 7009 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, mostra os elementos que compõem esta liga, além do alumínio há o Fe, Ni, Cu, Zn, Mn, Ti e Si. A Figura 11, processada durante 1,0h mostra elementos de Zn, Cu e O, a presença de oxigênio indica que houve oxidação durante o processo de moagem de alta energia. Para o tempo de 2,0h, Figura 12, há presença de Al, Zn, Cr, Mn, Ti e O.

Figura 10. EDS do pó de AA 7009_0,5h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.



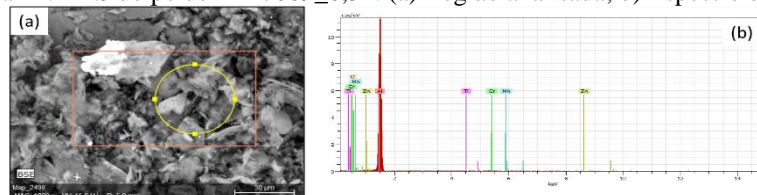
Fonte: Autor (2018).

Figura 11. EDS do pó de AA 7009_1,0h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.



Fonte: Autor (2018).

Figura 12. EDS do pó de AA 7009_2,0h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.



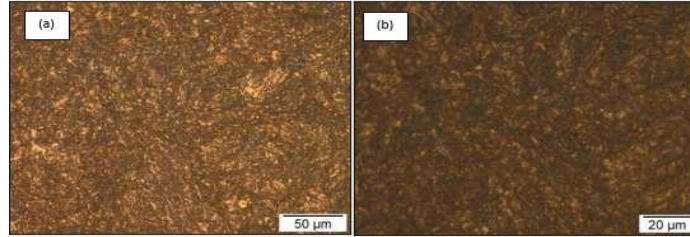
Fonte: Autor (2018).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CONSOLIDADO

Foram submetidas a caracterização via Microscopia Ótica a amostra sinterizadas de Al AA 1100 e amostras sinterizadas dos pós processados por MAE da liga AA 7009.

As Figuras 13 (a, b) apresentam a amostra de Al AA 1100 sinterizada. A imagem de MO do Al AA 1100 apresenta boa homogeneidade e densificação.

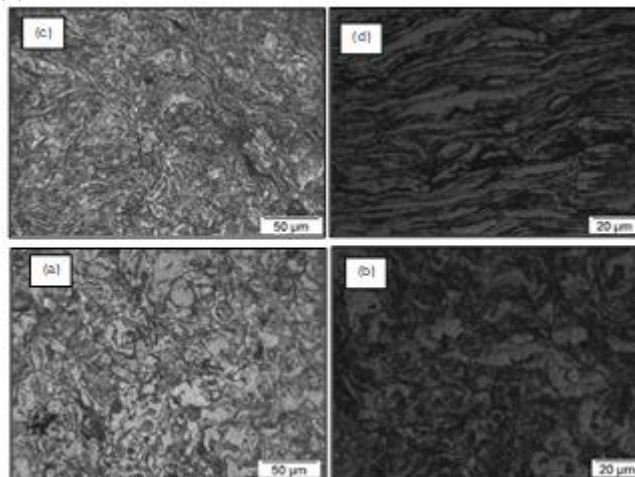
Figura 13. Imagens de MO da liga AA 1100 – seção superficial: (a) 500x; (b)1000x.



Fonte: Autor (2018).

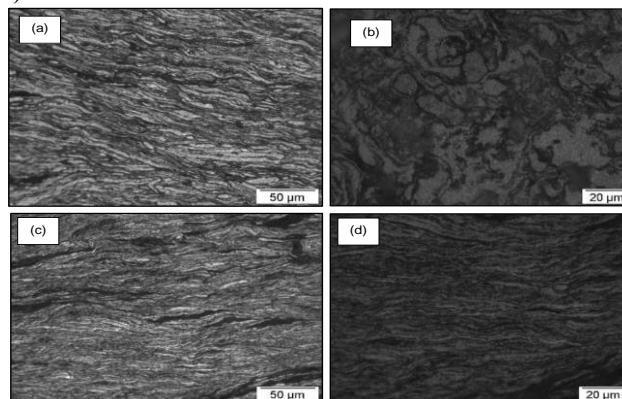
As Figuras de 14 a 16 apresentam os resultados da microscopia ótica nas amostras das ligas de Alumínio AA 7009 das seções superficiais e transversais com tempo de processamento no MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com duas ampliações de 500x e 1000x. É possível observar uma morfologia de grãos irregular e contornos de grãos definidos. Notamos que com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas, ilustradas nas seções transversais.

Figura 14. Imagens de MO da liga AA 7009_0,5h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.



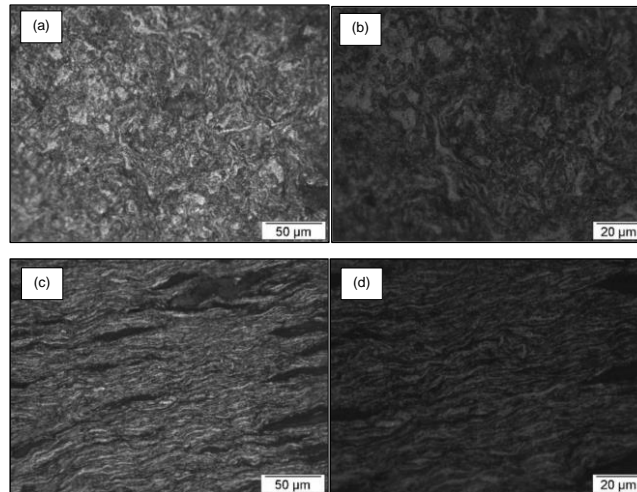
Fonte: Autor (2018).

Figura 15. Imagens de MO da liga AA 7009_1,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.



Fonte: Autor (2018).

Figura 16. Imagens de MO da liga AA 7009_2,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

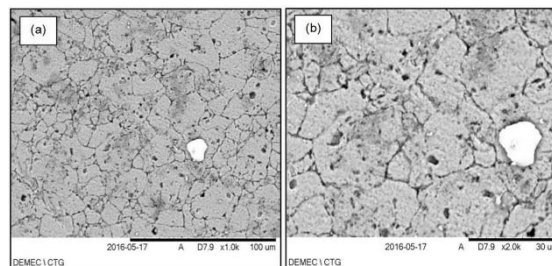


Fonte: Autor (2018).

Percebemos uma distribuição bastante equilibrada do reforço na matriz (processada ao período de 0,5h, 1,0h e 2,0h) em todas as imagens da microscopia ótica (seção superficial e transversal), afirmando a assertiva de que a moagem de alta energia (MAE) é um processo eficiente para a diminuição do tamanho de partícula tanto da matriz quanto do reforço e incorporação dessa partícula de reforço na matriz metálica. Isso garante um material com menor porosidade e propriedades mecânicas superiores, coerente com a teoria das ligas produzidas via metalurgia do pó (MP).

A Figura 17 (a, b) apresentam as imagens de MEV da amostra sinterizada de alumínio AA 1100. A amostra apresenta contornos de grãos bem definidos, morfologia irregular e possui grãos maiores que 30 μm.

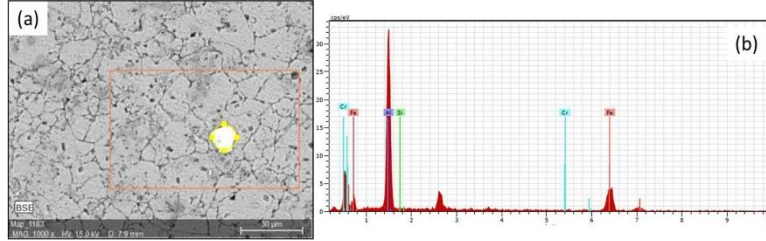
Figura 17. Imagem de MEV da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 18 apresenta o EDS da amostra de Al AA 1100. O Grão branco em destaque é identificado pelo EDS como sendo um precipitado contendo picos de Al e impurezas de Fe, além de Cr e Si em menor quantidade.

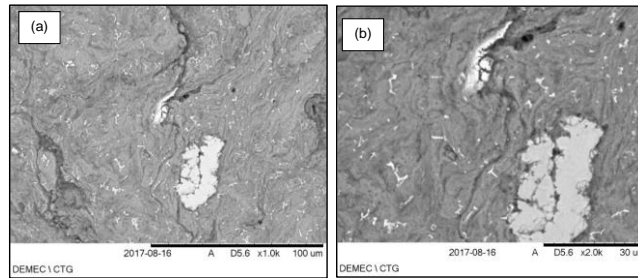
Figura 18. EDS da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.



Fonte: Autor (2018).

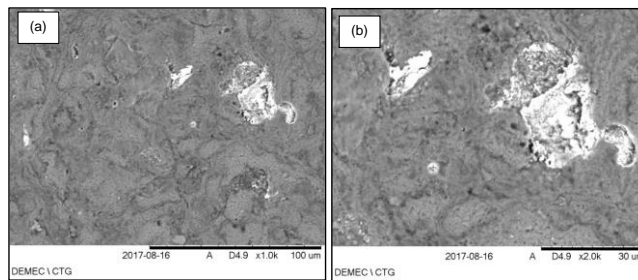
As figuras 19 a 21 apresentam os resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura das seções superficiais das amostras da liga de alumínio AA 7009, com tempo de processamento em MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com ampliações de 1.000x e 2.000x. Observa-se grãos irregulares e alongados, com o aumento do tempo de moagem há uma maior incorporação dos elementos de liga na matriz.

Figura 19. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009_0,5h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.



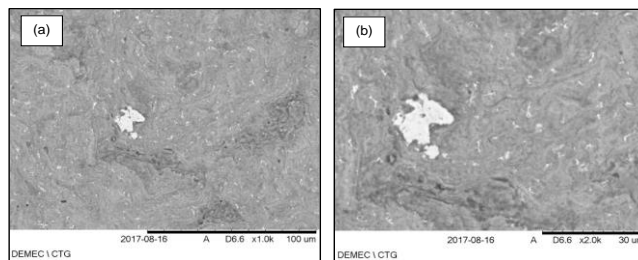
Fonte: Autor (2018).

Figura 20. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009_1,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.



Fonte: Autor (2018).

Figura 21. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009_2,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

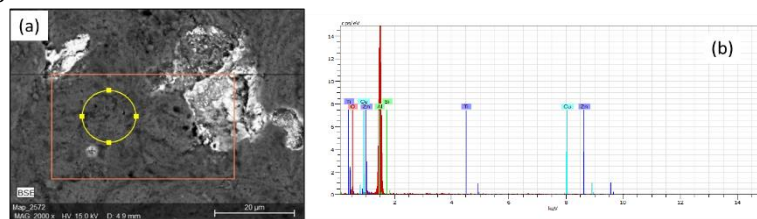


Fonte: Autor (2018).

As figuras 22 a 24 apresentam os EDS da amostra da liga sinterizada processada por moagem de alta energia, AA 7009, durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h.

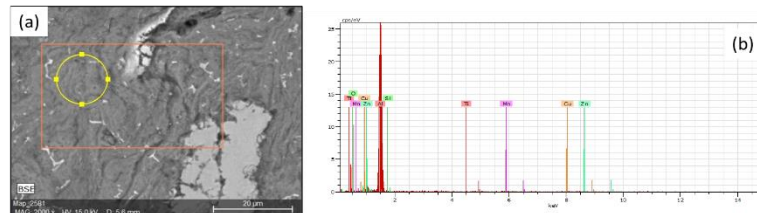
É observado na análise superficial por EDS, na Figura 22 da liga do alumínio AA 7009 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, os elementos que compõe esta liga, além do alumínio há o Zn, Cu, Ti, Si e O. A Figura 23, a liga processada durante 1,0h mostra elementos de Al, Zn, Cu, Ti, Si, Mn e O. Para o tempo de 2,0h, Figura 24, há a presença de Al, Zn, Cu, Fe, Mn, Cr e O. A presença de oxigênio indica que houve oxidação durante o processo de moagem de alta energia.

Figura 22. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7009_0,5h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS



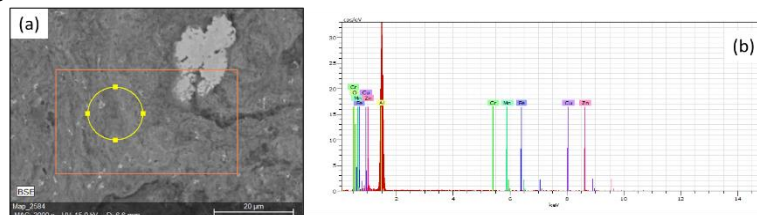
Fonte: Autor (2018).

Figura 23. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7009_1,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS



Fonte: Autor (2018).

Figura 24. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7009_2,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS



Fonte: Autor (2018).

Nesta etapa do trabalho é apresentado os resultados de microdureza Vickers, obtidos após o ensaio das amostras das ligas de Al AA 1100, AA 7009. Durante o ensaio foi realizado 5 endentações em cada superfície (superficial e transversal), sendo aplicado uma carga de 200 g. A Tabela 3 apresenta a evolução dos resultados de microdureza Vickers das ligas processadas durante 0,5h; 1,0h e 2,0h comparada ao resultado da

amostra da liga de Al AA 1100 (alumínio puro), da qual foi usado como base para otimização da obtenção da liga.

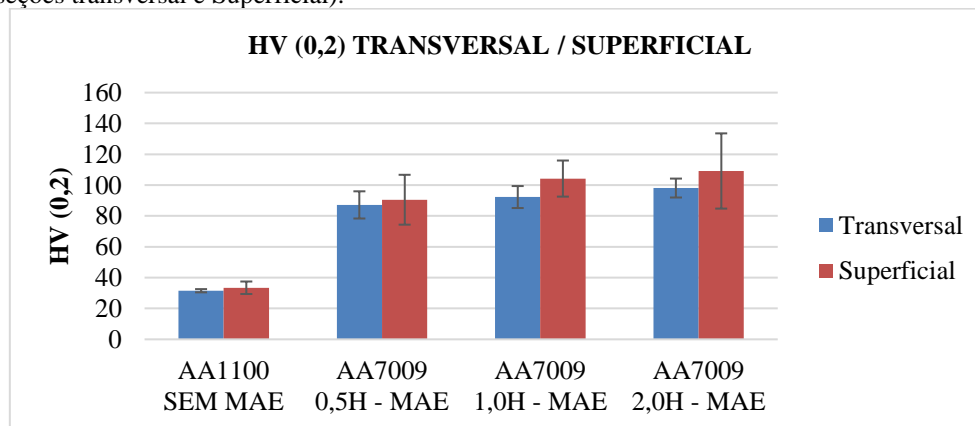
Tabela 3. Resultado Médio de Microdureza Vickers – HV – Transversal e Superficial.

Seção	SEÇÃO TRANSVERSAL				SEÇÃO SUPERFICIAL			
	AA 1100	AA 7009			AA 1100	AA 7009		
		0,5h	1,0h	2,0h		0,5h	1,0h	2,0h
MÉDIA	31,53	87,18	92,28	98,12	33,46	90,54	104,26	109,18
DESVIO PADRÃO	1,05	8,82	7,13	6,13	4,05	16,17	11,7	24,39

Fonte: Autor (2018).

A Figura 25 apresenta a evolução dos valores médios de Microdureza Vickers obtidos para cada amostra nas seções transversal e superficial, das amostras processada nos tempos especificados (0,5h; 1,0h e 2,0h). Pode-se notar um comportamento crescente da dureza com o aumento do tempo de moagem, uma vez que a moagem aumenta a densidade de discordância no material graças à deformação mecânica imposta às partículas do pó metálico (De Araujo Filho, 2017). O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7009 obteve um aumento percentual de 211,16% na seção transversal e de 246,23% na seção superficial em relação a liga Al AA 1100.

Figura 25. Evolução média da microdureza Vickers (HV), utilizando tempo de moagem de 0,5h; 1,0h e 2,0h (seções transversal e Superficial).



Fonte: Autor (2018).

4 CONCLUSÃO

A fabricação das amostras da liga de alumínio AA 7009 processadas durante 0,5h, 1,0h e 2,0h, através da técnica de metalurgia do pó, tomando como a base a liga Al AA 1100. Foi executado com relativo sucesso, através da metalurgia do pó.

Os espectros de DRX dos pós processados por Moagem de Alta Energia, observou-se picos do alumínio da matriz. Foi observado que não houve alterações

significativas nos difratogramas para os diferentes tempos de moagem das ligas processadas, apresentaram os mesmos valores de ângulo de difração (2θ) da matriz em alumínio (AA 1100).

Nas imagens de MEV das amostras dos pós, ficou evidente que durante o processamento de 0,5h o material particulado apresentou uma morfologia relativamente achatada e irregular, e durante o processamento de 2,0h ficou evidente a diminuição das partículas do material particulado, apresentando uma morfologia mais regular (ligeiramente arredondadas) e fina.

As imagens de EDS dos pós das ligas processadas em moagem de alta energia (MAE) mostraram de forma semi-quantitativa a presença de elementos de alumínio, zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio, este último presente devido à oxidação na MAE.

No MEV das amostras de pós sinterizadas ficou evidente que a que houve incorporação dos elementos de ligas para as moagens de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, cujo tempo de 2,0h teve uma melhor incorporação. As imagens de EDS confirmaram a presença dos elementos de liga de: zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio.

Nas imagens de MO o material consolidado apresentou uma morfologia de grãos irregular e contornos de grãos bem evidenciados e definidos. Com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas (seção transversal). As imagens de MO também mostram uma boa densificação da liga, contudo nota-se a presença de poros.

Os resultados de dureza apresentaram-se linearmente crescente com o aumento do tempo de moagem, destacando o efeito positivo da técnica de Metalurgia do Pó utilizando MAE na produção da liga alumínio AA 7009.

O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7009 obteve um aumento percentual de 211,20% na seção transversal e de 246,23% na seção superficial da microdureza em relação a liga Al AA 1100.

REFERÊNCIAS

DE ARAUJO FILHO, O.O.; MOURA, A.D.A.de; ARAÚJO, E.R.de; SANTOS, M.J.dos; GONZALEZ, C.H.; SILVA, F.J.da. Manufacturing and characterization of AA1100 aluminum alloy metal matrix composites reinforced by silicon carbide and alumina processed by powder metallurgy. *Materials Science Forum*. 869: 447-451, 2016.

ASM Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1992. v. 2. 3470 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Publicação técnica -Fundamentos e aplicações do alumínio, ABAL, p.22, 2007.

BARBOSA, C. Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações. Ed. E-papers. Rio de Janeiro, 2014.

BEZERRA, CARLOS AUGUSTO; ARAÚJO DE MOURA, ALEXANDRE DOUGLAS; DE ARAÚJO, EDVAL GONÇALVES; DOS SANTOS, MAURÍLIO JOSÉ; DE ARAUJO FILHO, OSCAR OLÍMPIO. Features of the Processing of AA2124 Aluminum Alloy Metal Matrix Composites Reinforced by Silicon Nitride Prepared by Powder Metallurgy Techniques. *Materials Science Forum (Online)*, v. 802, p. 108-113, 2014.

CHIAVERINI, V. Metalurgia do pó. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2001.

DE ARAUJO FILHO, O.O.; DE ARAÚJO, E.R.; DE LIRA, H.M.; GONZALEZ, C.H; SILVA, N.D.G.; URTIGA FILHO, S.L. Manufacturing of AA2124 Aluminum Alloy Metal Matrix Composites Reinforced by Silicon Carbide Processed by Powder Metallurgy Techniques of High Energy Ball Milling and Hot Extrusion. *Materials Science Forum*. 899: 25-30, 2017.

DE ARAUJO FILHO, O. O.; ANTONELLO, RODRIGO TECCHIO; GONZALEZ, CEZAR HENRIQUE ; URTIGA FILHO, SEVERINO LEOPOLDINO; FILHO, FRANCISCO AMBROZIO Preparation of Molybdenum High Speed Tool Steels with Addition of Niobium Carbide by Powder Metallurgy Techniques. *Materials Science Forum (Online)*, v. 802, p. 102-107, 2014.

DE LIRA, HERONILTON MENDES ; RODRIGUEZ, PILAR REY ; DE ARAUJO FILHO, OSCAR OLÍMPIO ; GONZALEZ, CEZAR HENRIQUE ; FILHO, SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA . Nanostructured Al Powder Obtained by High Energy Ball Milling at Ambient and Cryogenic Temperatures. *Materials Science Forum (Online)*, v. 802, p. 125-129, 2014.

Kumar N. M., Kumaraswamidhas L. A. (2018) Characterization and tribological analysis on AA6061 reinforced with AlN and ZrB₂ in situ composites. In *J Mater Res Technol*, 8(3), pp. 969-980.

NASCIMENTO, D. M.; SILVA JUNIOR, M. E.; COSTA, J. E. B.; ZARZAR, S. T.; MUNIZ, M. B. B.; DE ARAUJO FILHO, O. O.. Manufacture and characterization of AA6061 aluminum alloy metal matrix composites with ceramic particulate reinforcement. *International Journal of Development Research*, [S.L.], v. 11, p. 46875-46883, mai. 2021.

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.899.25>.

SILVA JUNIOR, Moisés Euclides da. FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA3003 E AA3303 A PARTIR DOS PÓS ELEMENTARES DE ALUMÍNIO E DE MANGANÊS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ. 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, T. T. L. Manufatura e caracterização de Alumínio-Cobre (Duralumínio) fabricadas via técnicas de metalurgia do pó. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

ZARZAR, S. T.; NASCIMENTO, D. M.; COSTA, J. E. B.; SILVA JUNIOR, M. E. da; ARAUJO FILHO, O. O.. Fabricação e caracterização da liga de alumínio AA8011 através das técnicas de metalurgia do pó/ Manufacturing and characterization of the aluminum alloy AA8011 through powder metallurgy techniques. *Brazilian Applied Science Review*, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 891-904, 2021a. *Brazilian Applied Science Review*.

<http://dx.doi.org/10.34115/basrv5n2-020>.

ZARZAR, S. T.; NASCIMENTO, D. M.; COSTA, J. E. B.; SILVA JUNIOR, M. E. da; ARAUJO FILHO, O. O.. Fabricação e caracterização da liga de alumínio AA8079 através das técnicas de metalurgia do pó / Manufacturing and characterization of the aluminum alloy AA8079 through powder metallurgy techniques. *Brazilian Applied Science Review*, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 891-904, 2021b. *Brazilian Applied Science Review*.

<https://doi.org/10.34115/basrv5n2-032>.