

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**VANESSA ERMES SANTOS**

**DESEMPENHO BALÍSTICO DE COMPÓSITO DE COBRE COM  
PERLITA EXPANDIDA**

**Rio de Janeiro  
2020**

VANESSA ERMES SANTOS

DESEMPENHO BALÍSTICO DE COMPÓSITO DE COBRE COM  
PERLITA EXPANDIDA

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Curso de Mestrado em Ciência dos  
Materiais do Instituto Militar de Engenharia,  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de Mestre em Ciência dos Materiais.  
Orientador: André Ben-Hur da Silva  
Figueiredo – D.Sc.

Rio de Janeiro  
2020

©2021

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Santos, Vanessa Ermes

Desempenho balístico de compósito de cobre com perlita expandida/ Vanessa Ermes Santos. Rio de Janeiro, 2020.

48 f.:

Orientadores: André Ben-Hur da Silva Figueiredo.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia de Defesa, 2020.

1. Blindagem Balística. 2. Poros. 3. Cobre. 4. Perlita.  
Figueiredo, André Ben-Hur da Silva, orient. I. Título.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**VANESSA ERMES SANTOS**

**DESEMPENHO BALÍSTICO DE COMPÓSITO DE COBRE COM PERLITA  
EXPANDIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientador: André Bem-Hur da Silva Figueiredo – D.Sc.

Aprovada em 3 de dezembro de 2020 pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: André Bem-Hur da Silva Figueiredo – D.Sc.

Aprovada em 3 de dezembro de 2020 pela seguinte Banca Examinadora:

---



Prof. André Bem-Hur da Silva Figueiredo – D.C. do IME – Presidente

---



Prof. Ronaldo Sérgio de Biasi – Ph.D. do  
IME

---

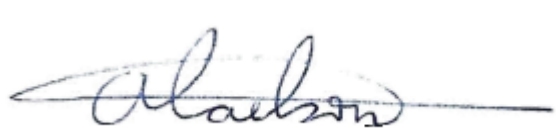


Prof.ª Lucia Helena Guimarães Cardoso

---

Prof.ª Lucia Helena Guimarães Cardoso – D.C. da ETAM

---



Prof. Aelsson Vieira Gomes – D.C. do IME

Rio de Janeiro  
2020

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ser o meu maior guia e protetor não só neste período de desafios e dedicação, mas em toda a minha vida.

Aos meus pais, José e Francisca, por todo o suporte e incentivo que me deram durante todo o período do mestrado, me apoiando e motivando para que eu chegasse até aqui.

Ao meu esposo, Emmanuel, que sempre foi um encorajador nesta fase da minha vida. Agradeço por toda a ajuda que me deu e pela paciência que teve em todas as vezes que precisei.

Ao meu orientador, André Ben-Hur, que foi um grande incentivador desde que iniciei o mestrado. Agradeço pela orientação e pelos ensinamentos que me foram fornecidos, extremamente enriquecedores para mim.

Aos meus amigos, em especial à Suzana Noronha, por ter sido tão importante em todo o período desta pós-graduação, nunca conseguirei retribuir tudo o que foi feito por mim. E aos demais que foram tão significativos no mestrado: Edilainea Melo, Isla Almeida, Raí Felipe, Lucas Neuba, Isaque Brito, Hugo Pedra, Iran Aragão, Luana Demosthenes e Michelle Oliveira.

Aos professores que compõem o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME, por toda a aprendizagem que obtive neste período.

À Coordenação de Apoio à Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelo apoio financeiro fornecido para o desenvolvimento deste trabalho.

*“A humanidade precisa de homens práticos, que tirem o máximo proveito de seu trabalho e, sem esquecer o bem geral, salvaguardem seus próprios interesses. Mas a humanidade também precisa de sonhadores.”*

*Marie Curie*

## RESUMO

O campo do desenvolvimento dos materiais de proteção balística busca por componentes que combinem boa resposta ao impacto e uma leveza associada. Nesta perspectiva, os materiais porosos agem como absorvedores das ondas de choque e os espaços vazios presentes nestes materiais podem reduzir a sua densidade. A formação de poros de maneira controlada em um material pode fornecer novas propriedades a este e, conseqüentemente, comportamento superior em determinado campo de aplicação. Os metais porosos apresentam espaços vazios dispersos no material metálico, com forma esférica e separados uns dos outros. O cobre é um metal promissor, com boas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, porém, com alta densidade. Na área das cerâmicas, tem-se a perlita, que é um mineral extremamente leve e com a peculiaridade de expansão de volume com o aquecimento em altas temperaturas, formando a perlita expandida. Assim, foi produzido um compósito poroso de cobre com perlita expandida, com o intuito de originar um material mais leve que o cobre puro e com boa resposta no comportamento dinâmico. A avaliação da densidade pelo método de Arquimedes mostrou a eficácia do emprego da perlita expandida na redução da massa específica do metal. As imagens de MEV mostraram o êxito na formação da porosidade no material produzido e a interação natural entre os dois constituintes do compósito. A técnica de DRX mostrou a presença do cobre e ausência de picos relacionados a perlita, devido ao fato desta cerâmica ser amorfa. O teste balístico mostrou o bom desempenho balístico do compósito, exibindo elevada absorção de energia no impacto.

**Palavras-chave:** Blindagem Balística; Poros; Cobre; Perlita.

## ABSTRACT

The field of ballistic protection material development seeks components that combine good impact response and associated lightness. In this perspective, porous materials act as shock absorbers and the empty spaces present in these materials can reduce their density. The formation of pores in a controlled manner in a material can provide new properties to it and, consequently, superior behavior in a given field of application. Porous metals present empty spaces dispersed in the metallic material, with spherical shape and separated from each other. Copper is a promising metal, with good mechanical, electrical and thermal properties, but with high density. In the area of ceramics, there is perlite, which is an extremely light mineral and with the peculiarity of volume expansion with heating at high temperatures, forming the expanded perlite. Thus, a porous copper composite with expanded perlite was produced, in order to originate a lighter material than pure copper and with good response in dynamic behavior. The density evaluation by the Arquimedes method showed the effectiveness of using expanded perlite to reduce the specific gravity of the metal. SEM images showed the successful formation of porosity in the material produced and the natural interaction between the two constituents of the composite. The XRD technique showed the presence of copper and the absence of peaks related to perlite, due to the fact that this ceramic is amorphous. The ballistic test showed the good ballistic performance of the composite, showing high energy absorption on impact.

**Keywords:** Ballistic Shield; Pores; Copper; Perlite.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Esquema de blindagem mista (a) antes; (b) durante; (c) após o impacto balístico.....	17
Figura 2.2 – Imagens de MEV do compósito de AA2124 reforçado por Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> sinterizado: (a) AA2124+5%Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ; (b) AA2124+10%Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ; (c) AA2124+15%Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ; (d) AA2124+20%Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	19
Figura 2.3 – Imagens de MO do compósito da amostra A20: 80%Cu-20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	20
Figura 2.4 – Ilustração dos diferentes tipos de poros em um sólido poroso: (a), (b), (c) abertos; (b) gargalo de garrafa; (c) cilíndrico; (d) fechado; (e) rugosidade da superfície.....	21
Figura 2.5 – Esquema representativo dos tipos de poros: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície.....	22
Figura 2.6 – Imagens de MEV obtidas no centro de microscopia da UFMG mostrando a superfície de um sólido monolítico à base de neodímio-ferro-boro (Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B) em duas magnificações diferentes: (a) imagem de baixa magnificação (aumento de 30 vezes); (b) imagem de alta magnificação (aumento de 100 vezes).....	22
Figura 2.7 – Valores de pressão e energia de choque previstos para Inconel 718.....	23
Figura 2.8 – Imagens de MEV das chapas de cobre porosas: (a) e (b) macroporos formados; (c) e (d) morfologia dos microporos.....	26
Figura 2.9 – Imagem de MEV da perlita expandida, destacando sua morfologia lamelar.....	28
Figura 2.10 – Difratogramas de DRX da perlita não calcinada e calcinada a 600 e 800°C.....	28
Figura 2.11 – Curva TG e DTG da perlita expandida.....	29
Figura 3.1 – (a) Cadinho contendo o conjunto Cu+PE sob aquecimento; (b) Placas cerâmicas de granito empregadas para prensar o fundido.....	31
Figura 3.2 – (a) Escamas de compósito com poros visíveis macroscopicamente; (b) Descontinuidade na extensão das escamas.....	31

Figura 2.2 (a) Matriz metálica empregada; (b) Amostra contendo as escamas embutidas na resina epóxi.....	32
Figura 3.4 – Sistema experimental para realização da análise da densidade por Arquimedes.....	33
Figura 3.5 – (a) Rifle de ar comprimido; (b) Projétil de chumbo utilizado para o teste de impacto balístico.....	34
Figura 4.1 – Difratoograma das escamas.....	37
Figura 4.2 – Imagens de MEV das amostras do compósito poroso: (a) presença de poros fechados e individuais; (b) morfologia aproximadamente arredonda e variação no tamanho dos poros; (c) interface formada entre a matriz metálica de cobre e a fase cerâmica (d) verificação de uma fronteira separando as regiões porosa e não porosa.....	38
Figura 4.3 – Amostras após a execução do ensaio balístico: (a) Amostra 10 %v; (b) Amostra 20 %v apresentando o comportamento de delaminação após o teste.....	39
Figura 4.4 – Amostra 30 %v de compósito poroso na resina epóxi.....	39
Figura 4.5 – Curva massa do compósito x energia absorvida.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Níveis de proteção balística adotados no Brasil.....	16
Tabela 2.2 – Classificação dos poros de acordo com sua faixa de tamanho, segundo a IUPAC.....	21
Tabela 4.1 – Densidade das amostras compósitas porosas pelo método de Arquimedes.....	36
Tabela 4.2 – Resultados das velocidades de impacto e residual no teste balístico..	40
Tabela 4.3 – Resultados da energia absorvida e massa do compósito no teste balístico.....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
2.1	BLINDAGEM BALÍSTICA.....	16
2.2	COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA.....	18
2.3	MATERIAIS POROSOS.....	20
2.4	COBRE.....	24
2.5	PERLITA EXPANDIDA.....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1	PRODUÇÃO DO COMPÓSITO POR FUNDIÇÃO.....	30
3.2	EMBUTIMENTO DAS ESCAMAS EM RESINA EPÓXI.....	31
3.3	CARACTERIZAÇÃO.....	33
3.3.1	MÉTODO DE ARQUIMEDES.....	33
3.3.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	33
3.3.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	34
3.3.4	ENSAIO BALÍSTICO.....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1	MÉTODO DE ARQUIMEDES.....	36
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	36
4.3	MICROSCOPIA ÓPTICA E ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	37
4.4	ENSAIO BALÍSTICO.....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>43</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>
--	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade, o desenvolvimento das blindagens caminhou junto com a evolução dos armamentos. A otimização da blindagem de proteção balística tornou-se cada vez mais necessária devido as armas de fogo de alto calibre presente nos dias atuais, o que leva o mercado bélico a buscar blindagens que possuam resistência ao impacto aliada a leveza (BATISTA NETO; DE AMORIM JUNIOR, 2018).

O aprimoramento da proteção balística começou a ser mais pronunciado nas fases de guerras, e com o passar dos anos, o estudo de materiais de blindagem evoluiu, com uma crescente demanda, buscando-se cada vez mais por materiais e processos de fabricação viáveis, envolvendo técnicas avançadas e de baixo custo. O foco neste setor é desenvolver um aumento na resistência das proteções balísticas e, ao mesmo tempo, reduzir o peso, produzindo coletes com maior facilidade de mobilidade (LIMA et al., 2018).

Os materiais de blindagem metálica empregados para resistir a munições perforantes precisam ser eficientes em fragmentar a ponta do projétil, absorver energia cinética e inibir o estilhaçamento da blindagem. Assim, os metais utilizados em proteção balística devem possuir as propriedades de dureza e tenacidade (OLIVEIRA et al., 2019). Os materiais metálicos são mais densos que os polímeros e as cerâmicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Portanto, em setores como a blindagem balística, onde a leveza é um fator crucial, a aplicação dos metais se torna um desafio.

Na atualidade, a busca é por materiais de blindagem que apresentem alta produtividade e qualidade no produto final. Assim, são requeridos o estudo e a otimização dos materiais, buscando por aqueles que resistam aos mais variados tipos de cargas e, ao mesmo tempo, combinem técnicas de processamento acessíveis, propriedades mecânicas elevadas, custos menores e menor impacto ambiental (LINS et al., 2015). Desse modo, temos os compósitos, que são definidos como resultado da associação de dois ou mais materiais diferentes (MOURA; DE MORAIS; DE MAGALHÃES, 2010).

A presença de poros em determinados materiais pode ser muito vantajosa, resultando em um material com propriedades superiores e possibilitando a ampliação

dos seus campos de aplicação. Como aplicações de materiais porosos podemos citar o carvão ativado e os biomateriais. O carvão ativado é um material poroso bastante empregado, exibindo grande capacidade de adsorção devido ao seu nível elevado de porosidade. Já os biomateriais porosos são aplicados em próteses ou no preenchimento do tecido ósseo. Estes materiais biocompatíveis, com a presença de poros, atuam promovendo sustentação à parte fisiologicamente ativa dos seres vivos, visto que o sistema ósseo possui naturalmente poros (micro, meso e macroporos) que interconectados agem dando fixação de componentes celulares, extracelulares e vasos sanguíneos (SANTOS, A. M. et al., 2015).

O cobre refere-se à um metal de grande notoriedade na história da humanidade, começando a ser utilizado pelo homem há mais de 7000 anos, tendo-se registros da existência de armas constituídas de cobre na época do surgimento dos espanhóis no continente americano. Tem como características ser um metal dúctil, resistente à corrosão (não sofre oxidação por íons hidrogênio sob condições padrão), ótimo condutor de calor e eletricidade e possui coloração avermelhada (RODRIGUES; SILVA; GUERRA, 2012).

A perlita refere-se a um material cerâmico que possui a característica de expandir-se quando submetida a temperaturas elevadas, a qual só pode ser obtida em regiões específicas do mundo, como Argentina, Estados Unidos, Grécia e Turquia (BELARMINO, 2011). A perlita expandida é formada por partículas esféricas e é constituída quimicamente por Si, Al, K, Ca, Fe e Mn (DE OLIVEIRA et al., 2019).

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em produzir um compósito poroso de matriz de cobre com partículas de perlita expandida dispersas, através da técnica de fundição.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância deste trabalho está na otimização do processamento dos compósitos de cobre, aprimorando a técnica de produção de modo a conseguir um controle no tamanho, fração e distribuição dos poros e das propriedades do material produzido. A

finalidade é obter redução da densidade em relação ao cobre puro e gerar um material absorvedor de energia sob impacto balístico. A técnica de processamento escolhida consiste na rota de fundição, que é de fácil processamento, devido ao baixo ponto de fusão do cobre.

Não foram encontradas na literatura referências que possuam estudos similares ao que é proposto neste trabalho.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

No território brasileiro, os coletes balísticos são produtos controlados pelo Ministério da Defesa – Exército Brasileiro – Pela Portaria nº. 18, de 19 de dezembro de 2006 (Anexo B). Os coletes devem estar em conformidade com as normas americanas *National Institute Justice (NIJ)* (SANTOS, M. et al., 2011). Segundo a norma *NIJ Standard-0101.04*, os níveis de proteção balística são classificados em seis grupos (I, II-A, II, III-A, III e IV). Esta classificação é apresentada na Tabela 2.1, a qual permite caracterizar os coletes conforme sua capacidade de proteção (BERNARDINO, 2018).

Tabela 2.1 - Níveis de proteção balística adotados no Brasil.

Nível	Munição	Energia Cinética (J)	Grau de Restrição	
I	.22 LRHV Chumbo	133	Uso permitido	
	.38 Special RN Chumbo	342		
II-A	9 FMJ	441		
	.357 Magnum JSP	740		
II	9 FMJ	513		
	.357 Magnum JSP	921		
III-A	9 FMJ	726		
	.44 Magnum SWC Chumbo	1411		
III	7,62 FMJ (.308 Winchester)	3406		Uso restrito
IV	.30 06 AP	4068		

(Fonte: Adaptado do Decreto Nº 3665, de 20 de novembro de 2000).

Com ênfase nos níveis de proteção balística dos coletes balísticos, os níveis II-A e II possuem a capacidade de resistir a impactos de munições de 9 mm, porém, o nível II é superior devido ao fato de suportar impactos com maiores velocidades. Com relação ao nível III-A, este apresenta a capacidade de resistir a munições de 9 mm e adicionalmente, é eficiente na proteção contra o calibre .44 Magnum. O nível III, por

sua vez, exibe capacidade de proteção balística maior que os anteriores, uma vez que possui, além das demais munições, resistência contra o calibre fuzil 7,62 mm, com energia acima de 3400 J. O nível de proteção IV consegue ser eficiente até o calibre 7,62 mm com munições perfurantes, com energia acima de 4000 J (BERNARDINO, 2018). Quanto ao grau de restrição, os armamentos podem ser classificados em os de uso permitido e os de uso restrito, de modo que, os coletes que possuem níveis de proteção I, II-A, II e III-A são de uso permitido, isto é, sua utilização é autorizada a pessoas físicas em geral, assim como a pessoas jurídicas. Em contrapartida, as armas correspondentes aos níveis de proteção III e IV são de uso restrito, sendo permitidos apenas para utilização pelas Forças Armadas ou por instituições de segurança, pessoas jurídicas e físicas habilitadas autorizadas pelo Exército, de acordo com o decreto Nº 3665, de 20 de novembro de 2000, da Presidência da República.

Até o presente momento, não existe um único material que seja capaz de resistir a combinação de tensões mecânicas envolvidas em um impacto balístico nível III, que tenha baixo volume. Daí, tem-se a importância do desenvolvimento de blindagens mistas que adicionam as propriedades particulares de dois materiais distintos. Essa combinação de propriedades deve ser eficiente em evitar a penetração do projétil. Durante um evento balístico, ou seja, ao longo do esforço de impacto, o material de proteção balística deve possuir as propriedades de dureza e alta resistência a compressão no início do processo e resistência a flexão e ductilidade nas últimas etapas (DA SILVA et al., 2014). A Figura 2.1 mostra o esquema de uma blindagem mista antes, durante e após o impacto promovido por um evento balístico.

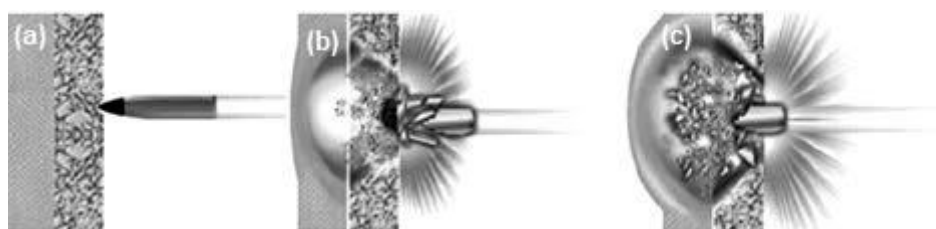


Figura 2.1 – Esquema de blindagem mista (a) antes; (b) durante; (c) após o impacto balístico.  
(adaptado de DA SILVA et al., 2014)

## 2.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Os compósitos permitem a obtenção de materiais com boas propriedades mecânicas, em que os reforços são ligados com uma matriz polimérica, metálica ou cerâmica. Neste sentido, os compósitos de matriz metálica destacam-se por suas elevadas propriedades estruturais, o que leva a estudos contínuos com relação a esses materiais. Metais como ligas de Cu, Ti, Mg, Al e Fe são exemplos de materiais utilizados como matriz em compósitos. No entanto, as ligas leves são as preferíveis, devido a benefícios como a razão tensão/densidade, fatores de custo e a facilidade no processo de fabricação. Com isso, as ligas de alumínio (leves e com baixo ponto de fusão) tomam posição de destaque no campo dos materiais compósitos de matrizes metálicas. Todavia, a molhagem entre o reforço e a matriz de alumínio torna-se um problema abaixo da temperatura de 1000°C, visto que ocorre a formação de uma camada de alumina na superfície do alumínio fundido, dificultando a interação entre os dois materiais (DUARTE, 1988).

Araújo Filho et al. (2014) avaliaram a síntese e a caracterização de compósitos de matriz metálica de liga de alumínio AA2124 reforçada com partículas de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), por meio da técnica de metalurgia do pó. Os compósitos produzidos com uma matriz metálica e uma segunda fase cerâmica foram preparados com quatro diferentes composições (5%, 10%, 15% e 20% de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) através das etapas de moagem de alta energia, compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo. No estágio de compactação foi utilizada uma pressão de 700 MPa. A Figura 2.2 apresenta imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do compósito de matriz metálica produzido, contendo as diferentes concentrações de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . É verificada a excelente distribuição das partículas do reforço na matriz, sem aglomerações, para todas as proporções da fase cerâmica analisadas.

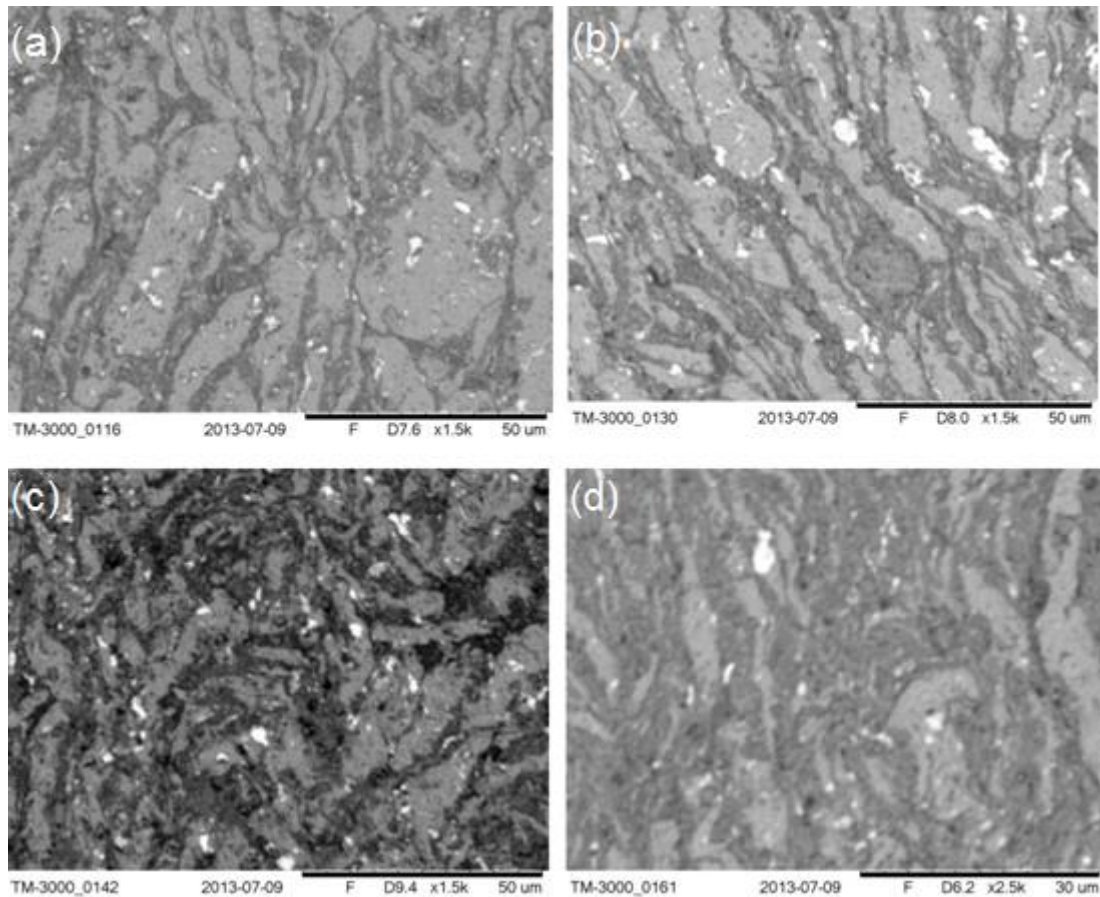


Figura 2.2 – Imagens de MEV do compósito de AA2124 reforçado por Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sinterizado: (a) AA2124+5%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (b) AA2124+10%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (c) AA2124+15%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (d) AA2124+20%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. (ARAÚJO FILHO et al., 2014)

A respeito dos compósitos metálicos com matriz de cobre, este metal é fonte de vários estudos com o intuito de elevar as suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Tem-se investigações de compósitos de cobre reforçados com a fase cerâmica alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a fim de melhorar o seu comportamento mecânico (WERMUTH et al., 2016). O fato de a alumina ser empregada como reforço em diversos estudos ocorre devido a esse material cerâmico ser relativamente barato e acessível (DA FONSECA; MONTEIRO, 2018). Nesta perspectiva, Da Fonseca e Monteiro (2018) investigaram compósitos a base de cobre reforçados com alumina. O reforço foi incorporado em matrizes de cobre puro e em ligas de Cu-Cr-Ag, processados pela técnica de metalurgia do pó, envolvendo compactação uniaxial a frio com pressão de 1080 MPa. Nas análises microestruturais, foram observadas a densificação eficiente das amostras e a boa adesão entre todas as fases presentes. Com foco nos compósitos Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, foram poucas as regiões onde a fase cerâmica esteve finamente dispersa nos contornos de grãos do cobre. Apesar da boa

distribuição, a alumina estabeleceu aglomerados de até mais que 40  $\mu\text{m}$  de diâmetro, sendo que as partículas do reforço eram nanométricas. As poucas áreas em que a alumina ficou finamente dispersa são apontadas pela seta na Figura 2.3, que apresenta imagens de Microscopia Óptica (MO) das amostras constituídas por matriz de cobre puro com 20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

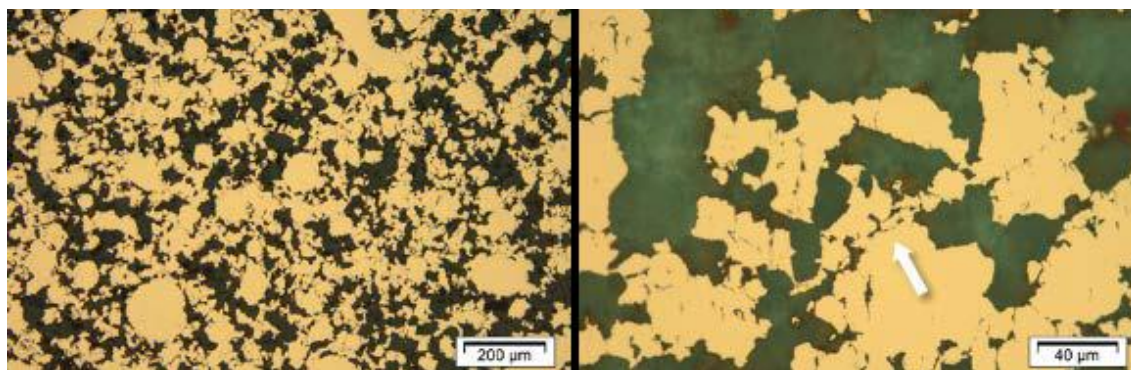


Figura 2.3 – Imagens de MO do compósito da amostra A20: 80%Cu-20% $\text{Al}_2\text{O}_3$ . (DA FONSECA; MONTEIRO, 2018)

### 2.3 MATERIAIS POROSOS

Em tese, todo sólido possui algum nível de porosidade, sejam esses poros identificáveis ou não, sendo consequência de cavidades, canais ou interstícios. Estudar a porosidade de um material é importante devido ao fato de que os poros interferem em propriedades físicas como densidade, condutividade térmica e resistência mecânica. Os poros podem ser classificados de acordo com sua disponibilidade a um fluido externo ou segundo a sua forma. No primeiro caso, os poros podem ser abertos ou fechados. Embora os fechados sejam inativos quanto ao fluxo de líquidos e gases, eles influenciam em características importantes do material, como as propriedades mecânicas, a densidade e a condutividade térmica. Em conformidade com a segunda classificação, os poros podem ser denominados como cilíndricos e gargalo de garrafa. A própria rugosidade na superfície de um material também pode ser encarada como uma porosidade. A Figura 2.4 apresenta uma esquematização dos tipos de poros encontrados em um sólido (FERREIRA et al., 2007).

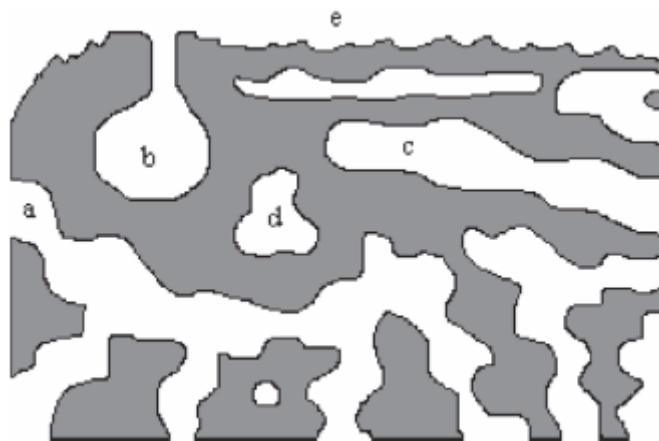


Figura 2.4 – Ilustração dos diferentes tipos de poros em um sólido poroso: (a), (b), (c) abertos; (b) gargalo de garrafa; (c) cilíndrico; (d) fechado; (e) rugosidade da superfície (FERREIRA, 2007).

A *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* indica uma classificação dos poros também relacionada às suas faixas de tamanhos. Desse modo, tem-se os microporos, mesoporos e macroporos, apresentados na Tabela 2.2. (FERREIRA et al., 2007; SANTOS, A. M. et al., 2015).

Tabela 2.2 – Classificação dos poros de acordo com sua faixa de tamanho, segundo a IUPAC

Classificação	Diâmetro do poro (d)
Microporos	$d < 2 \text{ nm}$
Mesoporos	$2 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$
Macroporos	$d > 50 \text{ nm}$

(Fonte: FERREIRA, et al., 2007; SANTOS, A. M. et al., 2015).

De acordo com Santos, A. M. et al. (2015), os poros podem ser classificados ainda de acordo com a sua localização na extensão do material, em externos ou internos. Além disso, há a possibilidade de interconecção entre poros abertos, conforme ilustrado na Figura 2.5.

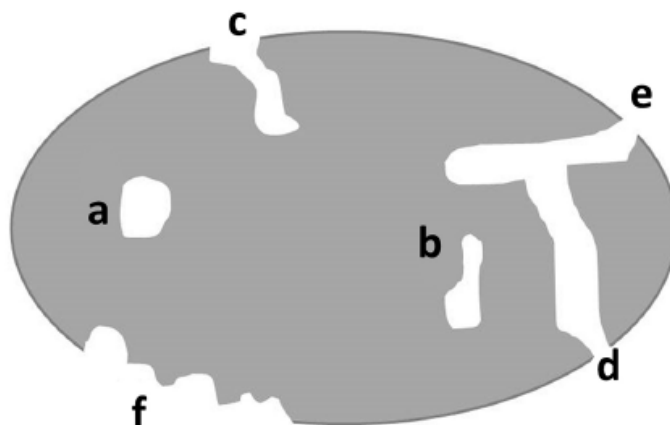


Figura 2.5 - Esquema representativo dos tipos de poros: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície (SANTOS, A. M. et al., 2015).

Por vezes, a porosidade presente em um material não é visivelmente detectada. A Figura 2.6 exhibe a imagem de MEV da superfície de um sólido monolítico: um magneto a base de neodímio-ferro-boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) recoberto com níquel. Em (a), uma imagem de baixa ampliação, não são percebidos poros na superfície. No entanto, em (b), com maior ampliação, nota-se que na realidade a superfície apresenta diversos poros, com tamanhos e formas irregulares (SANTOS, A. M. et al., 2015).

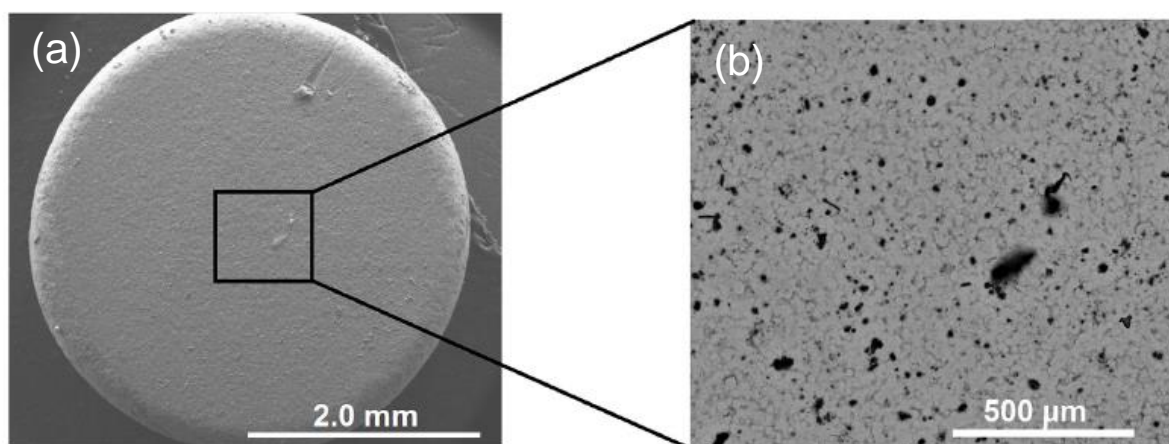


Figura 2.6 - Imagens de MEV obtidas no Centro de Microscopia da UFMG mostrando a superfície de um sólido monolítico à base de neodímio-ferro-boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) em duas magnificações diferentes: (a) imagem de baixa magnificação (aumento de 30 vezes); (b) imagem de alta magnificação (aumento de 100 vezes) (adaptado de SANTOS, A. M. et al., 2015).

Embora a existência não controlada de poros em um material possa originar tensões estruturais com conseqüente formação de trincas, a porosidade e a densidade interferem em propriedades importantes como mecânicas, ópticas e

elétricas, de modo que, essas propriedades são dependentes das características dos poros: forma, tamanho e localização (externos ou internos) (SANTOS, A. M. et al., 2015).

De acordo com Meyers (1994), um material poroso age como um meio de absorção de energia, uma vez que aumentando o grau de porosidade em um material sólido, maior será o valor de energia necessário para alcançar determinado valor de pressão, conseqüentemente, é preciso solicitar bem mais de um material com poros, sendo este então, um absorvedor das ondas de choque, que são as ondas presentes no impacto (comportamento dinâmico). A Figura 2.7 evidencia este fato, mostrando que, quanto maior o grau de porosidade em um material, maior a quantidade de energia exigida para gerar determinado valor de pressão.

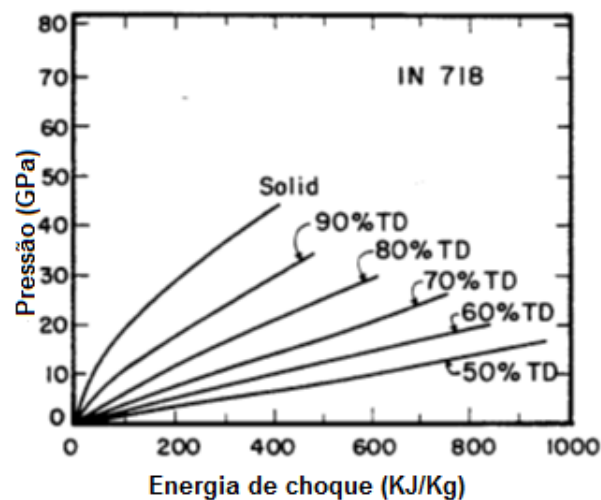


Figura 2.7 - Valores de pressão e energia de choque previstos para Inconel 718. (adaptado de MEYERS, 1994)

Existe uma dependência nítida entre as propriedades mecânicas como módulo de rigidez e comportamento em compressão com a densidade relativa para materiais celulares, sendo esta última definida como a razão da densidade do material poroso pela densidade do material maciço (GIBSON; ASHBY, 1997).

Um dos fatores mais relevantes quando se fala da estrutura de materiais celulares consiste na distribuição dos poros (BONALDI, 2012). Não há um diâmetro específico dos poros, e estes podem ser controlados através da composição química do material da matriz e do processamento. Parâmetros como tamanho, geometria e orientação dos poros são de suma importância para estabelecer a sua morfologia (GATAMORTA, 2009).



Os metais porosos compreendem materiais que possuem poros dispersos no metal, sendo estes geralmente esféricos e individuais. São um tipo especial de metal celular, onde o grau de porosidade é, normalmente, menor que 70% (BANHART, 2002).

A própria natureza exhibe materiais altamente eficientes, ou seja, materiais que combinam alta rigidez e baixo peso específico, como os ossos, o bambu e a madeira, por exemplo, sendo estes materiais porosos. Polímeros porosos já são amplamente empregados em diversos campos, como isolamento térmico e acústico. Por outro lado, os metais porosos tiveram um desenvolvimento mais lento, devido a procura por processos de fabricação que envolvessem baixo custo e um produto final com propriedades homogêneas (GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ; OÑORO, 2008).

## 2.4 COBRE

Mesmo tendo sido descoberto há muitos anos, nos dias de hoje o cobre ainda é um elemento extremamente relevante para a evolução de novas tecnologias. Para sua obtenção, este metal é encontrado na natureza predominantemente nos minerais calcocita, calcopirita e malaquita. Processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos são empregados para a extração do metal livre (RODRIGUES; SILVA; GUERRA, 2012).

Corresponde ao melhor condutor de calor e de eletricidade, após a prata. Seu ponto de fusão consiste em 1083°C e sua densidade corresponde a 8,96 g/cm<sup>3</sup>. O cobre exhibe elevada deformabilidade, apresentando assim, boa usinabilidade. Outro ponto de destaque deste metal é a sua boa resistência a corrosão, formando uma camada esverdeada quando exposto ao ar e, adicionalmente, não é corroído pela água pura. Apesar de dúctil, o cobre apresenta resistência mecânica satisfatória (CHIAVERINI, 1986).

O cobre é um metal de amplo uso na indústria global, fazendo com que a indústria do cobre seja um setor primordial para a economia do mundo (LIU, S. et al., 2020). A importância deste metal é tão grande que, na China, o cobre é, após o petróleo, a maior matéria-prima estratégica (WANG, W., 2014 apud LIU, S. et al., 2020). Se torna um material acessível e com amplo uso devido a seus sais serem pouco tóxicos e relativamente baratos. Metal produzido também no Brasil, o cobre é utilizado pelo homem há mais de seis mil anos, sendo empregado em sua forma metálica e como elemento de ligas especiais, como o bronze e o latão. Com relação ao comportamento

mecânico, adquire no estado sólido uma estrutura cristalina com empacotamento denso, isto é, Cúbica de Face Centrada (CFC), promovendo um arranjo de camadas empilhadas em sua estrutura, e, conseqüentemente, formando um material com alta ductilidade (SILVA et al., 2019).

No campo da tecnologia da informação, o mecanismo de resfriamento de pequenos dispositivos eletrônicos portáteis tem sido um desafio, uma vez que busca-se pela dissipação de calor ao mesmo tempo que esses componentes diminuem de tamanho e o uso de energia aumenta. Este gerenciamento térmico é necessário para garantir a velocidade do sistema, a durabilidade e a confiabilidade. Dito isso, o cobre poroso de célula aberta (com poros abertos) pode ser extremamente útil para este resfriamento, pois apresenta propriedades termodinâmicas superiores, alta densidade de área superficial e elevada permeabilidade aos fluidos de refrigeração. Mosalagae et al. (2020) estudaram a caracterização estrutural de chapas de cobre porosas fabricadas pela combinação dos processos de sinterização por carbonato perdido e fundição de fita.

A associação desses dois processos na produção das folhas porosas de cobre foi empregada por possibilitar o controle direto das propriedades estruturais significativas para a transferência de calor, como a porosidade, ou seja, tamanho e distribuição dos poros, além da densidade. A Figura 2.8 mostra imagens de MEV do material produzido, em que foram formados macro e microporos. Em amostras com maior nível de porosidade, a microestrutura se apresenta com macroporos interconectados entre si, imagens (a) e (b). Em amostras com baixo grau de porosidade, no entanto, os macroporos são na maioria das vezes interligados por microporos, representados pelas imagens (c) e (d), sendo este um efeito secundário da densificação incompleta das partículas de cobre sinterizadas.

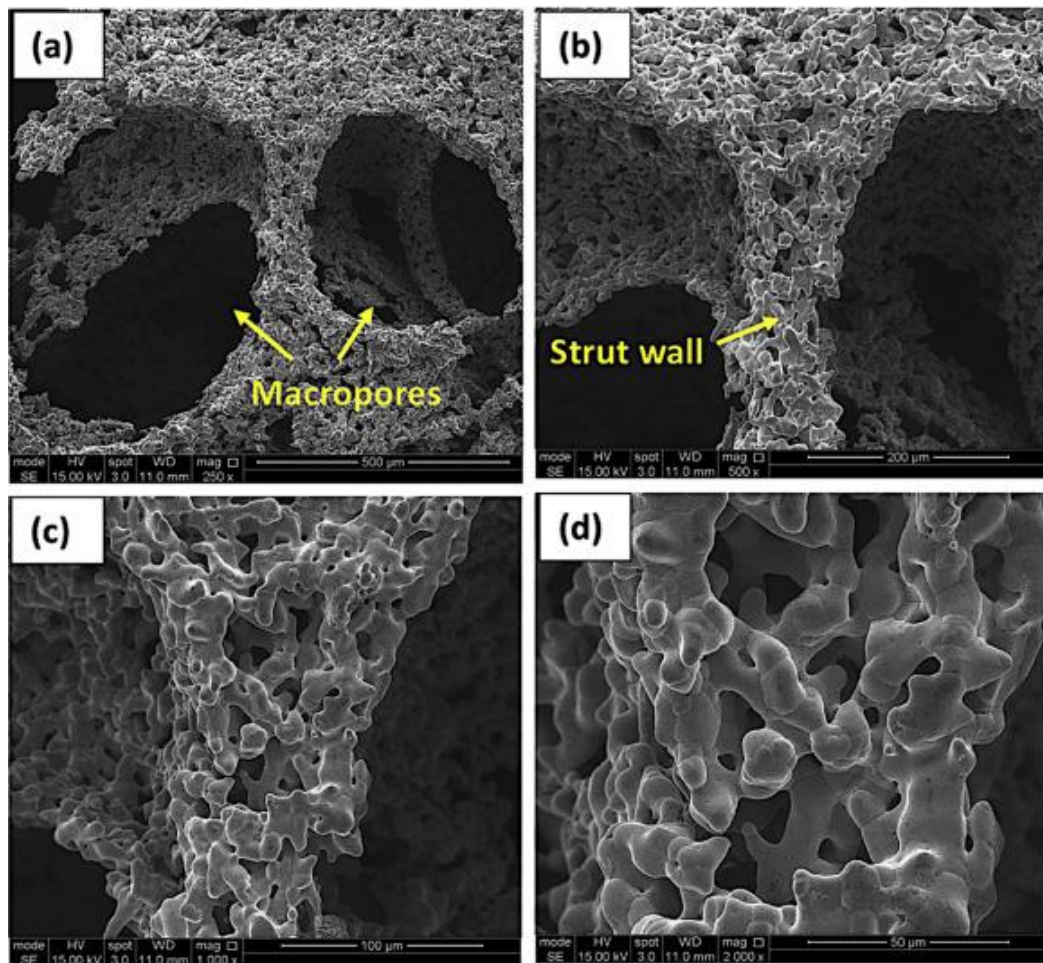


Figura 2.8 – Imagens de MEV das chapas de cobre porosas. (a) e (b) macroporos formados; (c) e (d) morfologia dos microporos. (MOSALAGAE et al., 2020)

Os metais porosos apresentam boas propriedades de absorção de som nas regiões de média e alta frequência. Além de exibirem baixa densidade, alta resistência e ductilidade, boa condutividade térmica, resistência à altas temperaturas e ao desgaste. Liu, R. et al. (2020) estudaram a absorção sonora de chapas sinterizadas de fibra de cobre porosa com superfície rugosa. Verificaram que elevando a espessura ou reduzindo a porosidade das amostras, a resistência do som é aumentada, levando a uma melhoria significativa nos coeficientes de absorção sonora na região de baixa frequência. Por outro lado, o desempenho da absorção sonora na região de alta frequência diminuiu com o aumento da resistência sonora. Portanto, a absorção sonora nas regiões de alta frequência é melhorada com o aumento da porosidade no cobre.

## 2.5 PERLITA EXPANDIDA

Dentre os materiais que expandem sob aquecimento, encontra-se a perlita, que por sua vez, refere-se à um vidro vulcânico e a sua formação está relacionada a atividades vulcânicas. Do ponto de vista da caracterização do material, a perlita é um silicato de alumina alcalina, com quantidade de água significativa em sua estrutura, na faixa de 3 – 6% (KAYACI, 2020).

A perlita consiste basicamente em um aluminossilicato, ou seja, é um material quimicamente composto essencialmente por silício e alumínio, com morfologia lamelar e amorfo. Uma peculiaridade deste mineral é o fato de que a perlita se expande quando aquecida em temperaturas da ordem de 900°C, aumentando o seu volume em até vinte vezes, gerando a perlita expandida. Essa expansão ocorre devido a água presente na estrutura do material, de modo que, com o aquecimento, esta água evapora deixando vazios nas regiões em que ocupava, no qual tais vazios compreendem bolhas de ar conectadas e fechadas. A perlita expandida possui, além de óxidos de Si e Al, outros elementos como K e Fe. Devido aos poros presentes, se apresenta como um agregado leve, com massa específica aparente na faixa de 80-100 kg/m<sup>3</sup>. O seu ponto de fusão encontra-se entre as temperaturas de 1085-1250°C (DA SILVA FILHO; VINACHES; PERGHER, 2017). A concentração de sílica (SiO<sub>2</sub>) na perlita está entre 71-75% (DOGAN; ALAKN, 2003).

Da Silva Filho, Vinaches e Pergher (2017) realizaram uma caracterização estrutural da perlita expandida tratada a 900°C, e verificaram suas características microestruturais e químicas. A Figura 2.9 apresenta uma imagem de MEV do mineral, evidenciando as lamelas presentes em sua morfologia.

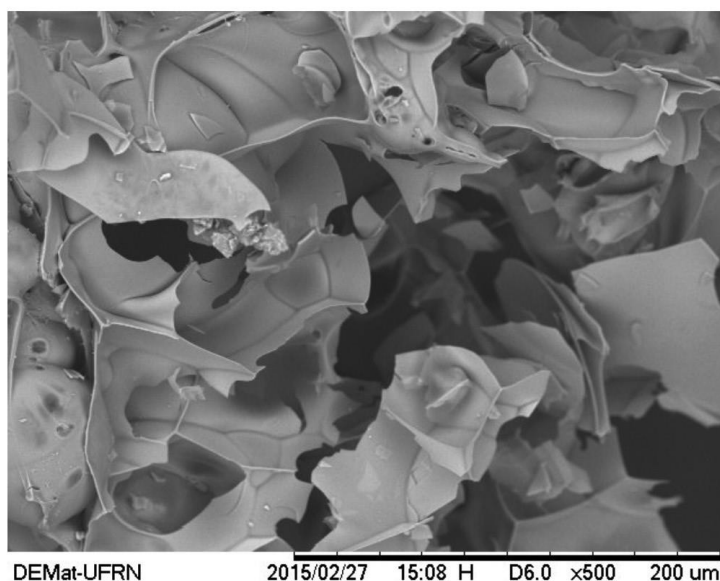


Figura 2.9 - Imagem de MEV da perlita expandida, destacando sua morfologia lamelar. (DA SILVA FILHO; VINACHES; PERGHER, 2017)

A Figura 2.10 apresenta o resultado da análise de Difração de Raios X (DRX) da perlita expandida nos estados não calcinada, calcinada a 600°C e calcinada a 800°C, respectivamente, indicando a natureza amorfa do material para todos os casos.

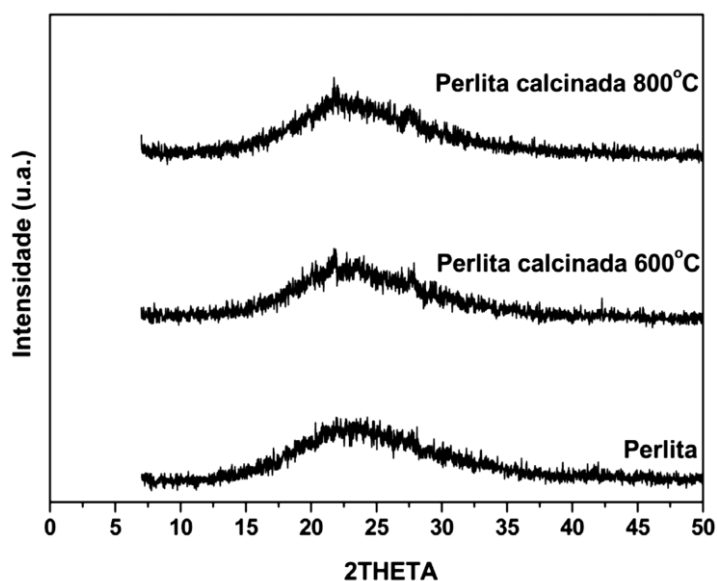


Figura 2.10 - Difractogramas de DRX da perlita não calcinada e calcinada a 600 e 800°C. (DA SILVA FILHO; VINACHES; PERGHER, 2017)

A partir da análise térmica de Termogravimetria (TGA) foram observados dois eventos com o aquecimento da perlita expandida, apresentados pela Figura 2.11. Uma primeira perda de massa ocorre na faixa de temperaturas 109-419°C e uma

segunda em 657-870°C. O primeiro evento possivelmente indica perda de água e o segundo provavelmente está associado a duas possibilidades: transformação de fase ou uma deshidroxilação de estruturas.

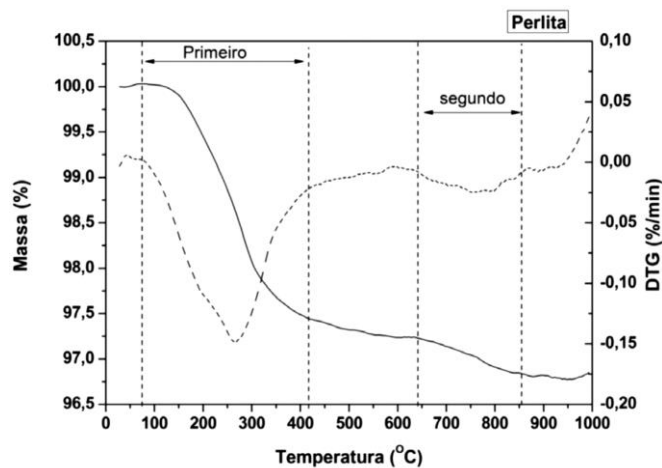


Figura 2.11 – Curva TG e DTG da perlita expandida. (DA SILVA FILHO; VINACHES; PERGHER, 2017)

Com relação à atividade industrial, a perlita na sua forma expandida ganha destaque, sendo um material granular, com baixíssima densidade e alta área superficial específica, obtida pelo aquecimento rápido em altas temperaturas (PÁLKOVÁ et al., 2020). O processo de expansão da perlita provoca o aumento de volume do material e alterações estruturais e microestruturais (KAPELUSZNA et al., 2020).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO POR FUNDIÇÃO

O processo de fabricação do compósito cobre-perlita consistiu na técnica de fundição, a qual seguiu os seguintes passos:

- i) As partículas de perlita expandida foram previamente peneiradas em tamanho micrométrico, com o tamanho das partículas variando na faixa de 0 a 0,18 mm.
- ii) Em seguida, o cobre foi submetido à fusão (1085°C) com a utilização de um maçarico.
- iii) Após o metal fundir e liquefazer, as partículas de perlita expandida são adicionadas na matriz metálica líquida e é realizada a mistura.
- iv) Posteriormente, o conjunto é vertido em uma placa de granito e prensada manualmente por outra placa cerâmica do mesmo tipo, com o objetivo de reduzir ao máximo a espessura das amostras. Após o resfriamento ao ar, foram obtidas escamas (finas camadas) porosas de Cu-Perlita.

Foi definida a proporção 10% de perlita expandida peneirada em massa em relação a massa do cobre pesada na balança. O maçarico empregado para a fusão do cobre possui um cilindro com volume de 1 m<sup>3</sup>, envolvendo uma mistura oxicom bustível de oxigênio e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A Figura 3.1 mostra estágios da produção do compósito, isto é, o cadinho com os dois constituintes do compósito submetido a chama do maçarico e as placas de granito utilizadas. A Figura 3.2 apresenta as escamas porosas de compósito obtidas.



Figura 3.1 – (a) Cadinho contendo o conjunto Cu+PE sob aquecimento; (b) Placas cerâmicas de granito empregadas para prensar o fundido.

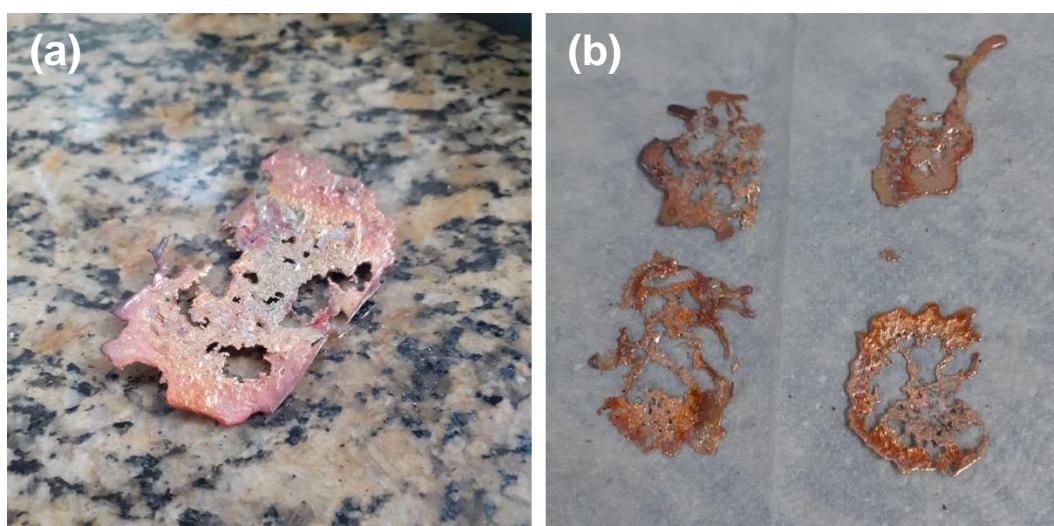


Figura 3.2 – (a) Escamas de compósito com poros visíveis macroscopicamente; (b) Descontinuidade na extensão das escamas.

### 3.2 EMBUTIMENTO DAS ESCAMAS EM RESINA EPÓXI

Em seguida, foi empregada uma segunda etapa de embutimento em resina epóxi, com o intuito de fornecer sustentação às escamas de cobre para que pudessem ser avaliadas no ensaio balístico, uma vez as amostras apresentaram pequena espessura e ausência de continuidade em toda sua extensão. As etapas desse estágio foram as seguintes:

- i) Misturou-se a resina com o endurecedor, a fim de promover a cura.



- ii) Em seguida, colocou-se uma camada de resina, uma camada de escama, e assim sucessivamente até que todo o espaço da matriz fosse ocupado. A última camada foi de resina.
- iii) A matriz foi colocada na prensa, onde passou 24 h submetida à 2 toneladas em um pistão com diâmetro de 31,0 mm.
- iv) Após serem retiradas da prensa, as amostras permaneceram ao ar durante sete dias, a fim de chegar na cura completa da resina epóxi.

A resina epóxi empregada foi a do tipo éter, diglicídico do bisfenol-A (DEGEB) e o endurecedor trietileno tetramina (TETA). Para a cura da resina, foi utilizada a estequiometria de 50 partes de endurecedor para 100 partes de resina. A matriz usada gerou amostras circulares com as dimensões: diâmetro 51 mm e altura 5 mm. A Figura 3.3 exibe a matriz utilizada e as amostras obtidas após o embutimento, prontas para serem examinadas no ensaio balístico. Devido a matriz utilizada, as amostras possuíam 5 mm de espessura.

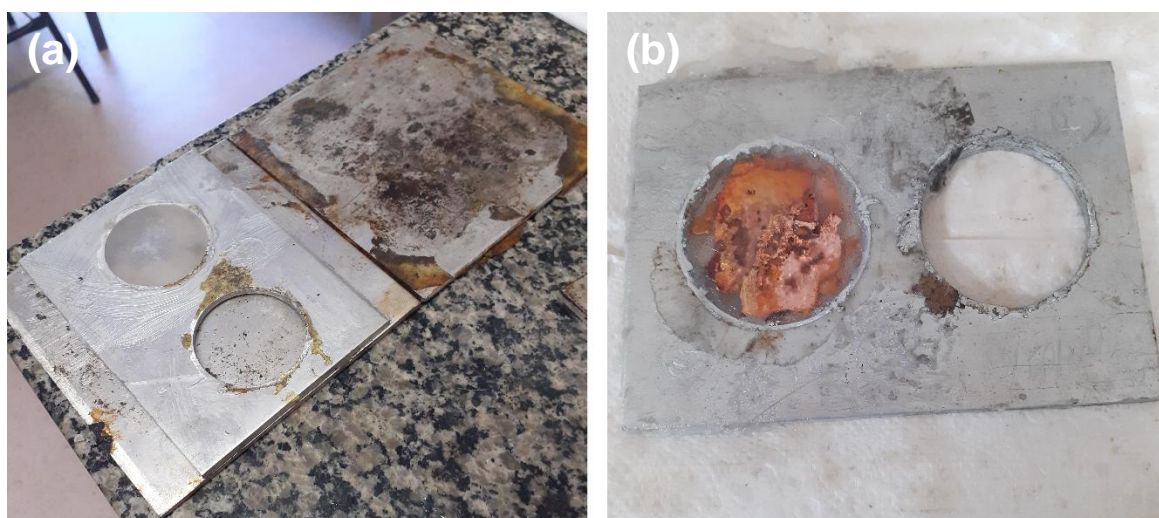


Figura 3.3 – (a) Matriz metálica empregada; (b) Amostra contendo as escamas embutidas na resina epóxi.

Foram preparadas as seguintes condições de composição: 10, 20 e 30%v de compósito na resina, considerando as densidades do metal e do agente expensor como 8,96 e 0,12 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A densidade da resina foi considerada 1,17 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 MÉTODO DE ARQUIMEDES

A determinação da densidade das escamas foi obtida pelo método de Arquimedes. A estruturação dos equipamentos para esta análise está ilustrada na Figura 3.4. A EQ. 3.1 apresenta os cálculos utilizados para determinar a densidade dos corpos metálicos porosos. A execução desta técnica foi feita no Instituto Militar de Engenharia (IME).

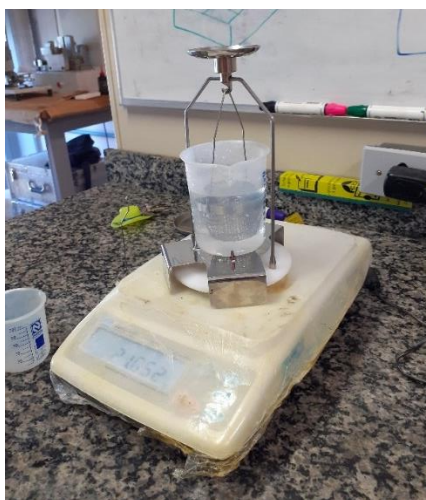


Figura 3.4 – Sistema experimental para realização da análise da densidade por Arquimedes.

$$\rho = \frac{mS}{(mM - ml)} \times \rho L \quad (1)$$

Onde:

$\rho$ : densidade da amostra

$mS$ : massa da amostra seca

$mM$ : massa da amostra molhada

$ml$ : massa da amostra imersa no líquido

$\rho L$ : densidade do líquido (no caso, a água:  $\rho = 0,9971 \text{ g/cm}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ )

### 3.3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O compósito poroso foi submetido à técnica de Difração de Raios X (DRX), com o intuito de identificar a natureza química das amostras de compósito, através da estrutura cristalina. Utilizou-se os parâmetros faixa angular de 10 a 120° e fonte de radiação  $\text{CoK}\alpha$ . O ensaio foi realizado em um difratômetro de Raios X, modelo X'Pert Pro Panalytical, disponível no Instituto Militar de Engenharia (IME).

### 3.3.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O material poroso fabricado foi submetido à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com tensão de aceleração de 30 kV. Esta análise permitiu avaliar a presença dos poros na matriz, sua morfologia e a adesão entre a fase contínua de cobre e os grãos de perlita expandida. A análise foi realizada no equipamento pertencente ao Instituto Militar de Engenharia (IME).

### 3.3.4 ENSAIO BALÍSTICO

Para a realização da análise da resposta ao impacto pelas amostras produzidas, no ensaio balístico, foi empregado o teste balístico com um rifle de ar comprimido Gunpower SSS, através de um projétil de chumbo no calibre 22, com massa de aproximadamente 3,0 g, apresentados na Figura 3.5. Os ensaios balísticos das amostras foram realizados no Instituto Militar de Engenharia (IME).

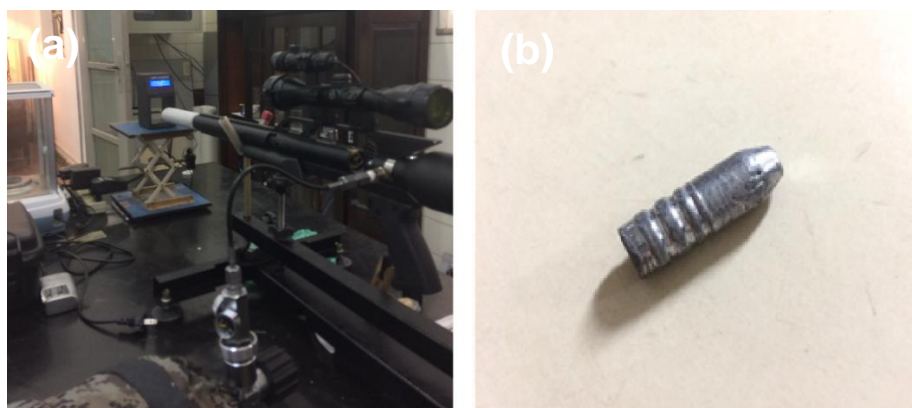


Figura 3.5 – (a) Rifle de ar comprimido; (b) Projétil de chumbo utilizado para o teste de impacto balístico.

Adicionalmente, foi utilizado um cronógrafo balístico Air Chrony modelo MK3, com precisão de 0,15m/s, com o intuito de medir a velocidade do projétil durante o ensaio. A disposição dos equipamentos segue a ordem: o rifle colocado a uma distância de 5 m das amostras de compósito (alvo), que corresponde a amostra avaliada livremente apoiada em uma morsa, mantendo a superfície do compósito posicionada perpendicularmente ao rifle. Dois cronógrafos foram posicionados, com o intuito de medir as velocidades de impacto do projétil na amostra e a residual. A EQ. 3.2 exhibe o cálculo utilizado para obter a energia absorvida por cada amostra, a partir das velocidades de impacto ( $V_i$ ) e residual ( $V_r$ ) e da massa do projétil ( $m$ ), isto é, por meio da diferença de energia cinética.

$$E_{abs} = \frac{m \cdot (V_i^2 - V_r^2)}{2} \quad (2)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MÉTODO DE ARQUIMEDES

A Tabela 4.2 apresenta os dados obtidos pelo método de Arquimedes, que são identificados como: massa da amostra seca (mS); massa da amostra imersa na água (ml); massa da amostra molhada (mM) e densidade ( $\rho$ ). A primeira coluna CuPe<sub>i</sub> apresenta o total de 10 amostras analisadas, onde i representa a numeração das amostras, sem nenhuma diferença entre elas. Para todos os casos, a massa específica do cobre de 8,96 g/cm<sup>3</sup> foi reduzida com a presença dos poros, conforme observa-se na Tabela 4.2, obtendo uma densidade média de 7,2372 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4.1 – Densidade das amostras compósitas porosas pelo Método de Arquimedes.

ESCAMA	mS (g)	ml (g)	mM (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
CuPe <sub>1</sub>	1,254	1,002	1,220	<b>5,7356</b>
CuPe <sub>2</sub>	3,874	3,377	3,895	<b>7,4571</b>
CuPe <sub>3</sub>	3,342	2,940	3,361	<b>7,9152</b>
CuPe <sub>4</sub>	1,218	1,052	1,253	<b>6,0421</b>
CuPe <sub>5</sub>	3,413	2,994	3,455	<b>7,3820</b>
CuPe <sub>6</sub>	2,964	2,586	2,973	<b>7,6589</b>
CuPe <sub>7</sub>	4,660	4,156	4,695	<b>8,6206</b>
CuPe <sub>8</sub>	5,052	4,379	5,105	<b>6,9385</b>
CuPe <sub>9</sub>	8,233	7,239	8,295	<b>7,7738</b>
CuPe <sub>10</sub>	5,089	4,422	5,163	<b>6,8478</b>

### 4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Por meio da difração, confirmou-se a natureza química do cobre presente nas amostras, com a correspondência dos picos obtidos em relação ao cobre puro, localizados nas posições angulares  $2\theta$ : 50,755°; 59,324°; 88,834°; 110,305°. No entanto, apareceram outros dois picos não pertencentes ao cobre, nas posições  $2\theta$  10,801° e 117,793°, que se sugere que podem ser referentes aos resquícios de material cerâmico que ficaram impregnados na superfície das amostras após o contato do fundido com as placas de granito, mineral definido pela associação variada de diversos materiais. Assim, aponta-se que os picos não referentes ao cobre são

relativos ao granito, uma vez que a perlita expandida é amorfa. A Figura 4.1 mostra o difratograma obtido para as amostras compósitas de cobre com perlita.

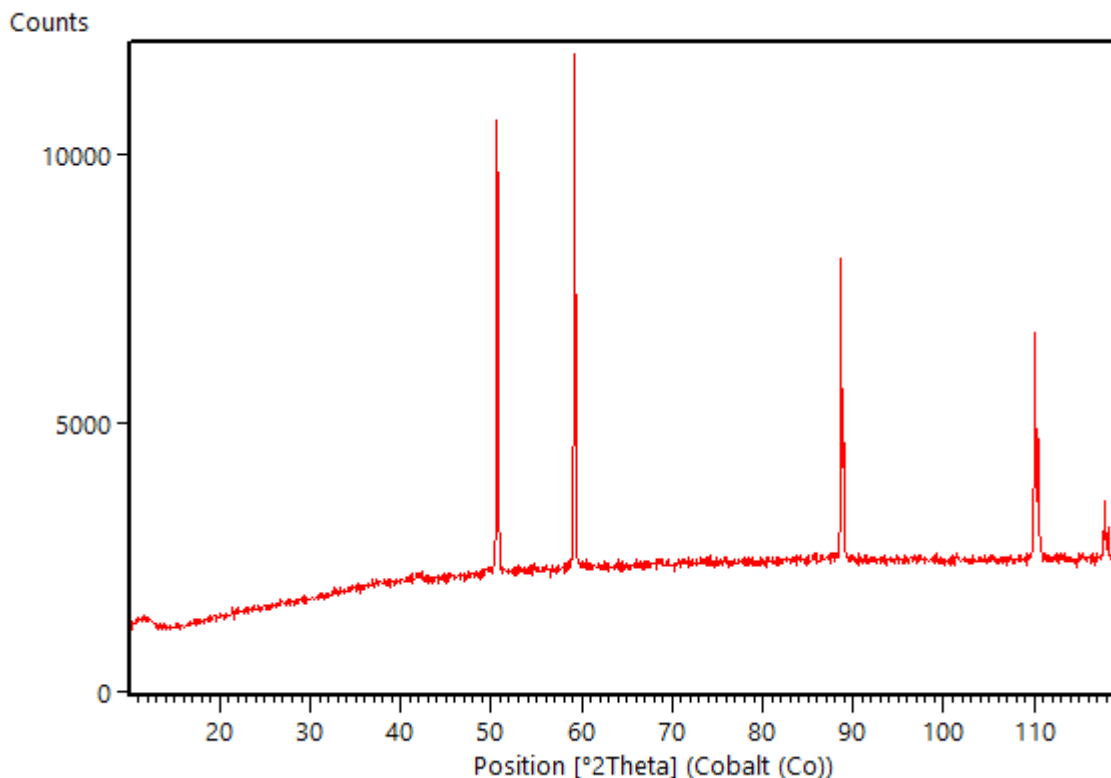


Figura 4.1 – Difratograma das escamas.

#### 4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise microestrutural comprovou a presença dos poros nas amostras com perlita, com formato aproximadamente esférico e individuais, isto é, isolados uns dos outros, apresentado pela Figura 4.2 (a). Pode-se observar que alguns poros estão completamente vazios enquanto outros possuem grãos de perlita no seu centro, evidenciando que foi a expansão dessa cerâmica que ocasionou a formação da porosidade. Na Figura 4.2 (b) vê-se a variação no tamanho dos poros originados na matriz de cobre. Pode-se verificar na Figura 4.2 (c) a adesão entre as fases metálica e cerâmica (região em tom mais claro), indicada pelas setas brancas, mostrando a formação de uma interface entre os dois materiais, com uma interação natural entre o cobre e a perlita expandida.

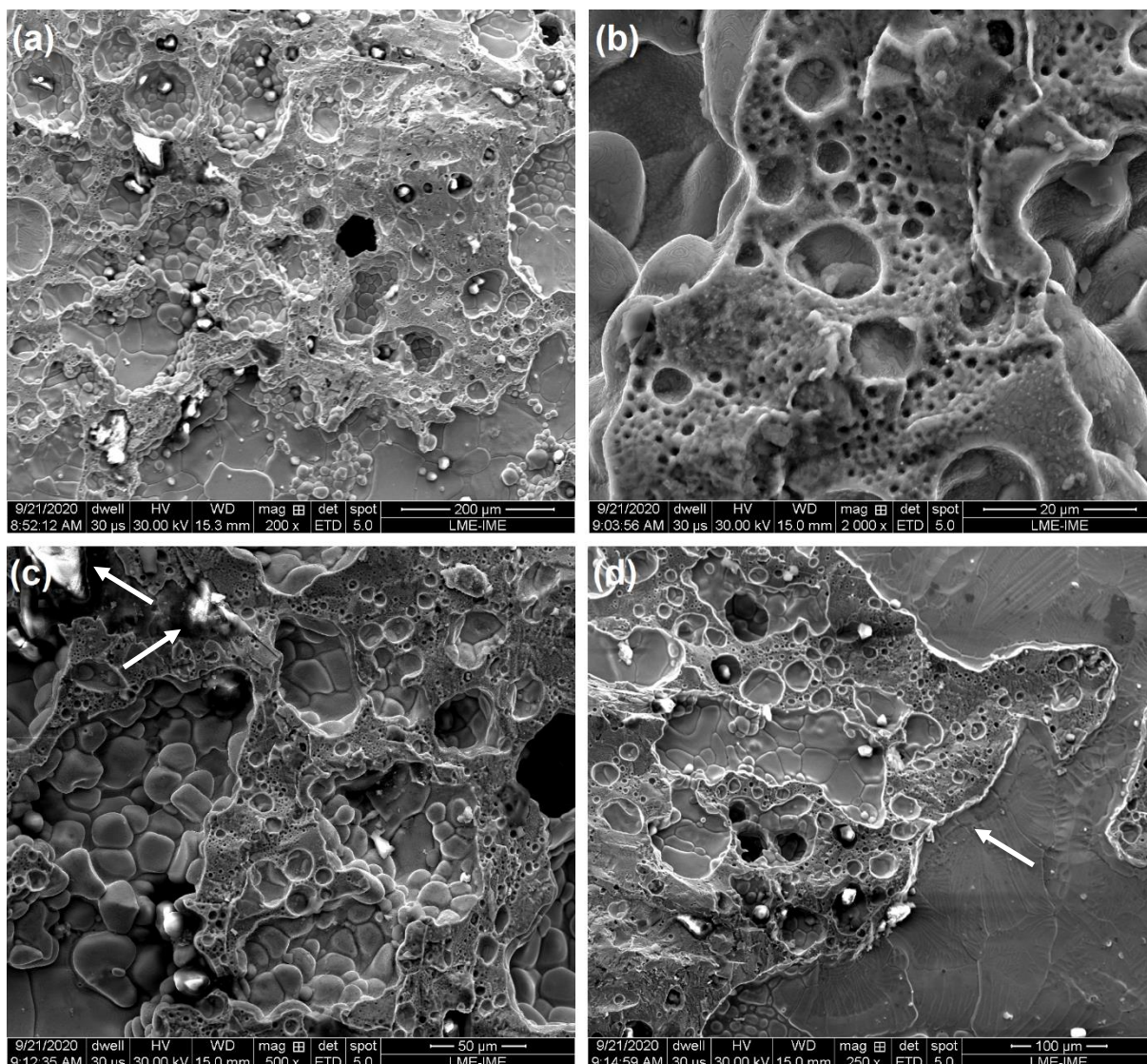


Figura 4.2 – Imagens de MEV das amostras do compósito poroso: (a) presença de poros fechados e individuais; (b) morfologia aproximadamente arredonda e variação no tamanho dos poros; (c) interface formada entre a matriz metálica de cobre e a fase cerâmica (d) verificação de uma fronteira separando as regiões porosa e não porosa.

A Figura 4.2 (d) revela uma fronteira entre a região porosa na matriz e uma região contínua, sem poros. Assim, pode-se sugerir que a quantidade de perlita expandida aplicada não foi suficiente em promover uma porosidade em toda a extensão das amostras, embora tenha sido eficaz em gerar poros micro e macroscópicos.

#### 4.4 ENSAIO BALÍSTICO

Percebe-se que as amostras com 10 %v de escama de compósito de cobre com perlita expandida embutida na resina epóxi, foram as que menos se deformaram e em que a fratura foi menos plástica. Já as com concentração de 20 %v de compósito apresentaram delaminação após o projétil impactá-las. A Figura 4.3 exibe as amostras 10 e 20 %v após o teste.

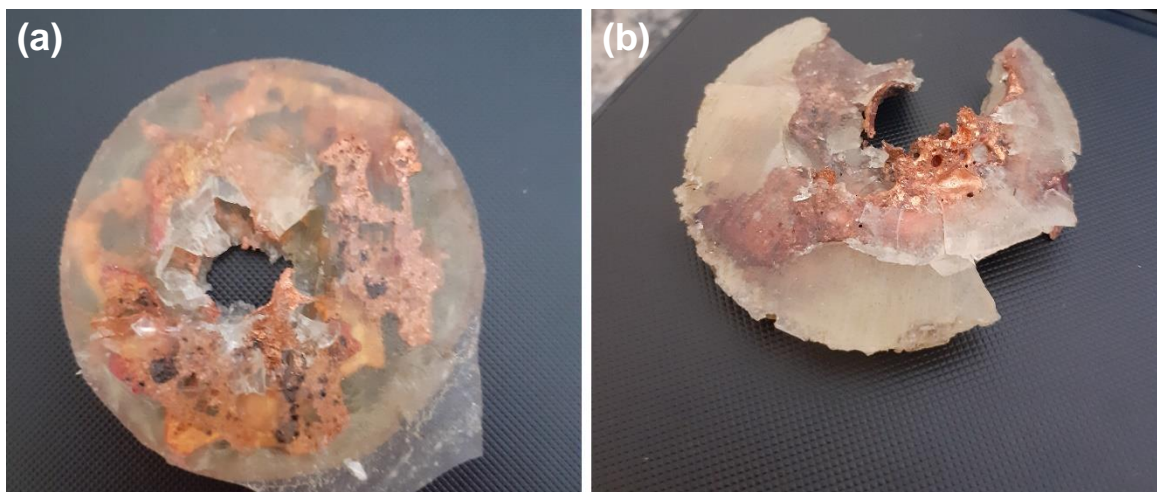


Figura 4.3 – Amostras após a execução do ensaio balístico: (a) amostra 10 %v; (b) amostra 20 %v apresentando o comportamento de delaminação após o teste.

As amostras 30 %v, por sua vez, foram as que mais absorveram energia no ensaio balístico, com aparência após o ensaio apresentada na Figura 4.4. No entanto, todas as amostras foram atravessadas pelo projétil.



Figura 4.4 – Amostra 30 %v de compósito poroso na resina epóxi.

A Tabela 4.2 apresenta os dados obtidos pelo teste balístico, que são identificados como: massa do projétil ( $M_P$ ); velocidade de impacto ( $V_I$ ); velocidade residual ( $V_R$ ); pressão ( $P$ ) e temperatura de ensaio ( $T$ ). CP10E representa a amostra de compósito de cobre com perlita com concentração de 10 %v em epóxi, CP20E a amostra com 20 %v e assim sucessivamente. A pressão média utilizada no ensaio foi de 4616,67 psi e a temperatura média de 25,92 °C.



Tabela 4.2 – Resultados das velocidades de impacto e residual no teste balístico.

<b>AMOSTRA</b>	<b>M<sub>P</sub> (g)</b>	<b>V<sub>I</sub> (m/s)</b>	<b>V<sub>R</sub> (m/s)</b>
CP10E	3,36 ± 0,07	279,86 ± 3,42	214,27 ± 7,67
CP20E	3,36 ± 0,05	280,47 ± 6,81	181,71 ± 64,37
CP30E	3,34 ± 0,05	280,47 ± 4,09	114,55 ± 68,30

Observando os resultados da Tabela 4.2, percebe-se que houve um comportamento de elevação da absorção de energia com o aumento da concentração de compósito na resina epóxi, observando os menores valores de velocidade residual, que significa mais energia absorvida pela amostra. Dado que é mais claramente observado na Tabela 4.3, que apresenta os valores de absorção de energia por cada material. Assim, a amostra com 30%v de escama foi a que absorveu mais energia no impacto balístico, apresentando os melhores resultados dentre as demais condições de composição. Isto é, confirma-se a eficiência do compósito poroso produzido como material absorvedor das ondas de choque, elevando a eficiência da resina no evento balístico com a sua presença. Além disso, a Tabela 4.3 apresenta também a massa do compósito após os disparos.

Tabela 4.3 – Resultados da energia absorvida e massa do compósito no teste balístico.

<b>AMOSTRA</b>	<b>M<sub>c</sub> (g)</b>	<b>E<sub>ABS</sub> (J)</b>
CP10E	17,91 ± 0,07	54,38 ± 3,91
CP20E	19,23 ± 2,30	70,06 ± 26,42
CP30E	24,47 ± 2,76	101,96 ± 30,05

A Figura 4.5 apresenta a curva massa do compósito versus energia absorvida. Analisando o gráfico, pode-se perceber que com a elevação da massa, isto é, com mais escamas de compósito na resina, em M<sub>c</sub> em torno de 19 g, há uma desaceleração no aumento da energia absorvida com o aumento de compósito, indicando que há um ponto de saturação, onde a presença do material na resina começa a não ser tão eficiente.

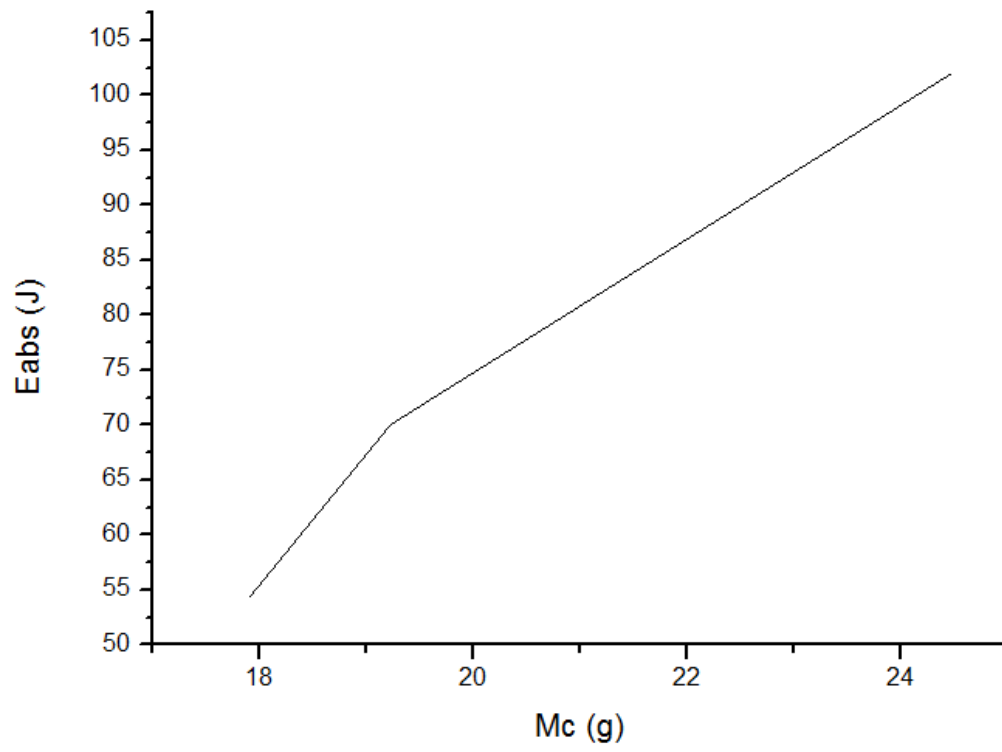


Figura 4.5 – Curva massa do compósito x energia absorvida.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através das análises realizadas no material, mostram que o processamento utilizado e o uso da perlita expandida como agente formador de poros no metal foram eficientes em produzir um compósito poroso na matriz de cobre. Conseqüentemente, foi possível obter uma redução na densidade metal puro, com respectivo aumento do volume, ampliando suas possibilidades de aplicação no campo da blindagem balística pessoal. A amostra com 30%v de compósito em resina epóxi foi a que melhor se comportou no sentido da absorção de energia no impacto.

A caracterização microestrutural comprovou a interação natural entre os dois materiais constituintes do compósito, formando uma interface, eliminando qualquer necessidade de adição de agente compatibilizante ou processamento com o intuito de promover a adesão do metal com a cerâmica, uma vez que essa interação ocorreu de forma espontânea.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a possibilidade de aumentar a concentração de perlita expandida no cobre, para assim elevar o grau de porosidade na matriz metálica, originando uma espuma metálica.
- Estudar o comportamento do compósito produzido como material componente de um sistema de blindagem balística multicamada.
- Analisar como controlar de forma mais precisa a dimensão dos poros formados.
- Empregar a perlita não expandida, de modo que ela sofra o processo de expansão no cobre, e assim a formação da porosidade seja ainda mais efetiva.
- Utilizar a perlita expandida como agente formador de poros em outros metais, como o alumínio, material leve e bastante aplicado no campo da proteção balística.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO FILHO, O. O.; BEZERRA JUNIOR, C. A.; DE MOURA, A. D. A.; DE ARAÚJO, E. G.; DOS SANTOS, M. J.; DE MELO, L. G. T. C. Síntese e caracterização de compósitos de matriz metálica da liga AA2124 com reforço particulado de nitreto de silício através de técnicas de metalurgia do pó. *In*: CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21., 2014, Cuiabá. **Anais** [...]. Cuiabá: UFMT, 2014. p. 4421-4428.

BANHART, J. **Handbook of Cellular Metals: production, processing, application**. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

BATISTA NETO, F. P.; DE AMORIM JUNIOR, W. F. Otimização de uma blindagem balística cerâmica/compósito baseado no modelo analítico de florence. *In*: CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10., 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: UFBA, 2018. p. 1-8.

BELARMINO, L. D. **Avaliação da potencialidade da perlita natural e expandida na adsorção de metais**. 2011. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BERNARDINO, A. M. P. **Impactos balísticos em UAS: requisitos para a criação de um laboratório de impactos**. 2018. Relatório Científico Final do Trabalho de Investigação Aplicada (Mestrado Integrado em Ciências Militares na Especialidade de Infantaria) – Academia Militar, Lisboa, 2018.

BONALDI, P. O. **Obtenção de espuma de alumínio através do processo de metalurgia do pó e propriedades mecânicas de estruturas sanduíche**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BRASIL. Casa Civil. Anexo ao Decreto nº 3.665, de 20 de novembro de 2000, que regulamenta a fiscalização de produtos controlados (R-105). **Diário Oficial da União**: parte 2, Brasília, DF, 20 nov. 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d3665.htm#:~:text=Bras%C3%ADlia%2C%2020%20de%20novembro%20de,e%20112o%20da%20Rep%C3%BAblica.&text=OBJETIVOS-,Art.,Par%C3%A1grafo%20%C3%BAnico](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3665.htm#:~:text=Bras%C3%ADlia%2C%2020%20de%20novembro%20de,e%20112o%20da%20Rep%C3%BAblica.&text=OBJETIVOS-,Art.,Par%C3%A1grafo%20%C3%BAnico). Acesso em: 16 out. 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DA FONSECA, D. P. M.; MONTEIRO, W. A. Processamento, microestrutura e propriedades de compósitos à base de cobre reforçados com alumina. *In*: CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: UFPR, 2018. p. 2321-2329.

DA SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, p. 323-331, 2014.

DA SILVA FILHO, S. H.; VINACHES, P.; PERGHER, S. B. C. Caracterização estrutural da perlita expandida. **Perspectiva**, Erechim, v. 41, n. 155, p. 81-87, set. 2017.

DE OLIVEIRA, A. G.; JANDORNO JÚNIOR, J. C.; DA ROCHA, E. B. D.; DE SOUSA, A. M. F. Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites. **Applied Clay Science**, Holanda, v. 181, p. 1-8, jul. 2019.

DOGAN, M.; ALKAN, M. Removal of methyl violet from aqueous solution by perlite. 2003. **Journal of Colloid and Interface Science**, Turquia, v. 267, p. 32-41, maio 2003.

DUARTE, J. M. F. **Compósitos de matriz metálica – estudo da estrutura e comportamento tribológico de um composto**. 1989. Tese (Mestrado em Materiais e Processos de Fabrico) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1988.

FERREIRA, O. P.; ALVES, O. L.; MACEDO, J. S.; GIMENEZ, I. F.; BARRETO, L. S. Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 464-467, nov. 2007.

GATAMORTA, F. **Obtenção de espumas sintáticas da liga AA2011 a partir do metal no estado semi-sólido e sua caracterização metalúrgica**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GIBSON L. J; ASHBY, M. F. **Cellular Solids – Structure and properties**. 2. ed. Reino Unido: Cambridge University Press, 1997.

GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ, J. A.; OÑORO, J. Espumas de alumínio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, Madri, v. 44, p. 457-476, set./out. 2008.

KAPELUSZNA, E.; KOTWICA, L.; PICHÓR, W.; NOCUN-WCZELIK, W. Cement-based composites with waste expanded perlite - structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments. **Sustainable Materials and Technologies**, Holanda, v. 24, p. 1-12, 2020.

KAYACI, K. The use of perlite as flux in the production of porcelain stoneware tiles. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio**, Madri, p. 1-8, 2020.

LIMA, J. E. S.; ASSUMPÇÃO, T. A. A.; SILVA, R. C. M.; ALVES, M. H. A. Simulação de impactos balísticos aplicada a blindagens de matrizes poliméricos reforçadas por fibras. **Revista Calidoscópico**, São Leopoldo, v. 10, n. 1, p. 39-42, 2018.

LINS, A. E. P.; DOS SANTOS, E. N.; MESQUITA, A. P. P.; DE ARAÚJO, E. G.; FERANADES, L. S.; DE ARAUJO FILHO, O. O. Fabricação de compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA1100 com reforço cerâmico de óxido de zinco através de técnicas de metalurgia do pó. *In: Congresso Anual da ABM – Internacional, 70.*, 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Blucher, 2015. p. 1763-1771.

LIU, R.; HOU, L.; ZHOU, W.; CHEN, Y. Design, fabrication and sound absorption performance investigation of porous copper fiber sintered sheets with rough surface. **Applied Acoustics**, Great Yarmouth, v. 170, p. 1-9, 2020.

LIU, S.; ZHANG, Y.; ZIJIAN, S.; MANMAN, L.; GU, F.; LIU, J.; JIANG, T. Recycling the domestic copper scrap to address the China's copper sustainability. **Journal of Materials Research and Technology**, San Diego, v. 9, n. 3, p. 2846-2855, 2020.

MEYERS, M. A. **Dynamic Behavior of Materials**. San Diego: John Wiley & Sons, 1994.

MOSALAGAE, M.; BRAMBILA RENTERIA, C. M.; ELBADAWI, M.; SHBEH, M.; GOODALL, R. Structural characterisation of porous copper sheets fabricated by lost carbonate sintering applied to tape casting. **Materials Characterization**, Estados Unidos, v. 159, 2020.

MOURA, M. F. S. F.; DE MORAIS, A. B.; DE MAGALHÃES, A. G. **Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2010.

NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ Standard–0101.04: Ballistic Resistance of Personal Body Armor. **National Law Enforcement and Corrections Technology Center**: Rockville, 2000.

OLIVEIRA, S. S.; WEBER, R. P.; SUAREZ, J. C. M.; SOUZA, E. R. S. Aço de alta dureza para aplicação balística: propriedades mecânicas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, 2019.

PÁLKOVÁ, H.; KUREKOVÁ, V.; MADEJOVÁ, J.; NETRIOVÁ, Z.; UHLÍK, P.; VARGA, P.; HRONSKY, V.; LEXA, J. Determination of water content in raw perlites: combination of NIR spectroscopy and thermoanalytical methods. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 240, out. 2020.

RODRIGUES, M. A.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. Cobre. **Química nova na escola**, Uberlândia, v. 34, p. 161-162, 2012.

SANTOS, A. V.; VIANA, M. M.; MEDEIROS, F. H. A.; MOHALLEM, N. D. S. O incrível mundo dos materiais porosos – características, propriedades e aplicações. **Química nova na escola**, Uberlândia, v. 38, n. 1, p. 4-11, 2015.

SANTOS, M. I. M. P.; ALVES, H. A.; DE MELO, F. C. L.; DE MORAIS, P. R.; RIBEIRO, W. Antropometria como ferramenta no projeto de blindagem pessoal. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 307-324, 2011.

SILVA, L. A.; VICTOR, M. M.; LOPES, W. A.; CUNHA, S. Cobre: produção industrial e aplicações. **Química Nova**, São Paulo, v. 42, n. 10, p. 1154-1161, 2019.

WERMUTH, D. P.; MARTINS, V.; DA SILVA, M. M.; TAVARES, A. C.; CAUMO, P. R.; SCHAEFFER, L. Cinzas de carvão mineral aplicadas como reforço em compósitos de matriz metálica de cobre produzido por metalurgia do pó. *In*: Congresso Anual da ABM – Internacional, 71., 2016, Rio de Janeiro, **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Blucher, 2016. p. 336-344.