

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS



MICHAEL JOSÉ BATISTA DOS SANTOS
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS



MICHAEL JOSÉ BATISTA DOS SANTOS
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Amanda Kelly da Costa Veiga
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Michael José Batista dos Santos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de minas e materiais / Organizador Michael José Batista dos Santos. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-641-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.413211211>

1. Engenharia de minas. 2. Engenharia de materiais. I. Santos, Michael José Batista dos (Organizador). II. Título.

CDD 622

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A obra “Coleção desafios das engenharias: Engenharia de minas e materiais” versa sobre áreas interdisciplinares inerentes a extração e concentração mineral, além do aproveitamento dos recursos naturais alternativos, de biopolímeros, e avaliação de microestruturas em ligas metálicas.

A coleção reúne trabalhos, estudos de caso, pesquisas e análises desenvolvidas em laboratório, capazes de contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico na mineração, através de metodologias passíveis de implementação de melhorias de processos produtivos nas etapas de lavra e beneficiamento mineral. Da mesma forma, a obra traz compreensão da engenharia de materiais referente ao comportamento de materiais metálicos e o desenvolvimento de novos materiais provenientes de recursos renováveis e ambientalmente amigáveis.

Estes são trabalhos que tem como foco principal oferecer soluções de engenharia pertencentes da indústria mineral e de materiais, as quais são discutidos cientificamente de forma objetiva e eficiente nos capítulos desta coleção.

Em suma, parabênizo os autores dos capítulos não unicamente pelo conhecimento científico compartilhado, como também pela abordagem concisa e didática nesta publicação.

Ademais, desejo que esta seja uma leitura técnica e reflexiva, que sirvam de pilar e provocação pela busca de melhoria contínua de processos e do desenvolvimento científico-tecnológico nas engenharias, e que contribua na construção de novas soluções para os grandes desafios, sobretudo das área de mineração e de materiais.

Michael José Batista dos Santos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA MAIOR PILHA DE ESTÉRIL DO COMPLEXO MINERADOR DE FERRO CARAJÁS

Michael José Batista dos Santos
Glauce Wivyanne Oliveira Costa
Denilson Andrade Torres
Irineu Antônio Schadach de Brum

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112111>

CAPÍTULO 2..... 14

AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS EM UM DEPÓSITO MINERAL DE CALCÁRIO CALCÍTICO

Nayara Augustino Amorim
Júlio César de Souza
Jorge Luiz Valença Mariz
Suelen Silva Rocha
Gabriel Filinkoski

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112112>

CAPÍTULO 3..... 27

DESIGN OF A SELECTIVE FLOTATION SYSTEM FOR A CU-ZN ORE, ASSOCIATED TO HIGH PYRITE-PYRRHOTITE CONTENTS (>25%)

Prieto-Díaz Ma. de J.
Hernández-Salazar Ma. M.
Corona-Arroyo M.A.
Elorza-Rodríguez E.

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112113>

CAPÍTULO 4..... 35

COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE LIGAS DE AL-SI FUNDIDAS SOB GRAVIDADE, ALTA E BAIXA PRESSÃO

Margarete Sabino de Moura
Josiel Bruno de Oliveira
Debora Silva Costa
Roger Hoel Bello
Adalberto Gomes de Miranda
José Costa de Macêdo Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112114>

CAPÍTULO 5..... 43

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, QUÍMICA E MORFOLÓGICA DAS FIBRAS DE CIPÓ TITICA (*Heteropsisriedeliana Schott*) E POLIPROPILENO RECICLADO, VISANDO A APLICAÇÃO EM COMPOSITOS POLIMÉRICOS

Talisson Sousa Oliveira
Josiel Bruno de Oliveira

Roger Hoel Bello
Adalberto Gomes de Miranda
José Costa de Macêdo Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112115>

SOBRE O ORGANIZADOR	55
ÍNDICE REMISSIVO.....	56

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA MAIOR PILHA DE ESTÉRIL DO COMPLEXO MINERADOR DE FERRO CARAJÁS

Data de aceite: 01/11/2021

Data de submissão: 14/10/2021

Michael José Batista dos Santos

Universidade Federal do Oeste do Pará
(UFOPA), Campus Regional de Juruti
Juruti – Pará
<https://orcid.org/0000-0002-9958-9868>
<http://lattes.cnpq.br/5889866630676008>

Glauce Wivyanne Oliveira Costa

Vale
Parauapebas – Pará
<http://lattes.cnpq.br/3317427303694985>

Denilson Andrade Torres

Vale
Parauapebas – Pará
<http://lattes.cnpq.br/2085750042808441>

Irineu Antônio Schadach de Brum

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Escola de Engenharias,
Departamento de Metalurgia
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<https://orcid.org/0000-0003-4852-8325>
<http://lattes.cnpq.br/3390199353240612>

RESUMO: Carajás detém a maior mina de minério de ferro a céu aberto, gera uma quantidade considerável de estéril, que é responsável pela formação de enormes pilhas de estéril. A engenharia geotécnica busca o melhor custo benefício para manter a estabilidade física das estruturas geotécnicas, como barragens de

rejeitos, taludes e depósitos de minas (pilhas de estéril). Devido aos desastres socioambientais de barragens de rejeitos no Brasil, as construções geotécnicas estão no centro das atenções políticas. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação de segurança, incluindo a classificação de um dos depósitos de mina mais antigos do complexo de mineração de Carajás – a pilha de disposição de estéril (PDE) Oeste – a estrutura artificial mais elevada (maior cota) do estado do estado do Pará. Essa investigação é adequada para comprovar a confiabilidade do investimento e a responsabilidade socioambiental dos empreendimentos de mineração. Por meio de métodos de avaliação, foi possível definir a classificação da pila de estéril Oeste de acordo com o nível de estabilidade. Os resultados da avaliação mostram um baixo potencial de ruptura ainda que sejam avaliadas suas seções críticas.

PALAVRAS-CHAVE: Pilha de disposição de estéril; avaliação de estabilidade, classificação de estabilidade.

SAFETY CLASSIFICATION AND ASSESSMENT OF THE LARGEST MINE WASTE DUMP IN THE CARAJAS IRON-MINING COMPLEX

ABSTRACT: Carajás holds the largest iron ore surface mine; it produces a considerable quantity of waste, which is responsible for build huge waste piles. Geotechnical engineering searches for the best cost-benefit to maintain the physical stability of geotechnical structures, such as tailings dams, mine slope and mine dumps (waste piles). Geotechnical constructions are at the centre of political attention because of socio-

environmental disasters of tailing dams in Brazil. This paper aims to accomplish a security assessment, including classification one of the oldest mine dump of the Carajás mining complex – the mine waste dump West – the tallest (elevation) man-made structures in Pará state. This investigation is suitable to prove the investment reliability and socio-environmental responsibility of mining ventures. Using evaluation methods, it was possible to define the classification of the mine dump West according to stability level. The evaluation results show a low failure potential.

KEYWORDS: Mine waste dump; stability assessment; stability classification.

1 | INTRODUÇÃO

Proceedings of the First Southern African Geotechnical Conference Mining Engineering Handbook (2011) argumenta que os termos pilhas e depósitos de estéril de mina significam pilhas de disposição de estéril, material rochoso que carregam pouco ou nenhum valor econômico no momento em que são transportados, uma vez que estéril não possui conceitos fixos, eles podem mudar de um para outro ao longo do Tempo. O planejamento, a localização adequada e o monitoramento de uma pilha de disposição de estéril (PDE) de uma mina têm o dever de minimizar os custos de lavra e evitar o risco de acidentes destas estruturas geotécnicas. Assim, muitos aspectos são levados em consideração neste estudo, como a taxa de remoção da mina, a estabilidade natural do terreno sob o despejo, sua localização deve ser estrategicamente definida a partir das distâncias de transporte de resíduos entre muitos outros aspectos. Os custos associados a este tipo de estrutura geralmente representam um parte significativa dos investimentos de uma mina (Couzens, 1985).

A disposição dos rejeitos da mina deve ocorrer na forma de camadas e monitoramentos frequentes, que avaliam a estabilidade da estrutura em relação à presença de água, lençol freático, infiltração e percolação, utilizando medidas de mitigação como, por exemplo, drenagem de bermas, de forma a minimizar a erosão, evitando o escorregamento do material. Outro ponto importante é a drenagem superficial, a qual, idealmente, tem que passar pelos canais periféricos para desviar o curso de água natural da chuva. A vegetação é uma forma de amenizar os efeitos pluviométricos, permitindo melhor proteção superficial. Dique de contenção são dispositivos que evitam o assoreamento na ponta a jusante de uma pilha de disposição de estéril (PDE), o que é ecologicamente correto, pois protege rios, lagos e outros cursos d'água. De acordo com o livro *Mining Engineering Handbook* (2011), existem outros parâmetros indispensáveis que influenciam a estabilidade de uma pilha de estéril, são eles: topografia do local, geometria do depósito, taxa de disposição e de adensamento do material depositado, propriedades geotécnicas intrínsecas ao material disposto, método de construção, cargas de equipamentos, superfície freática, e forças sísmicas.

A pilha de estéril deve manter um fator de segurança de, no mínimo, 1,5 quando esta

estrutura estiver seca de acordo com a legislação brasileira. Porém, se for selecionada uma área específica de instabilidade mais provável dessa estrutura geotécnica, que se refere a condições transversais críticas em direção ao lençol freático, o fator de segurança mínimo exigido passa a ser considerado 1,3 como valor mínimo aceito. A avaliação de segurança é adequada para comprovar a avaliar a confiabilidade do investimento e a responsabilidade socioambiental dos empreendimentos de mineração. Por meio de métodos de avaliação, foi possível definir a classificação do depósito de mina Oeste de acordo com o risco geotécnico de ruptura ou colapso (BC Mine Waste rock Pile Research Committee, 1991).



Figura 1- Pilha de estéril Oeste. Fonte: Vale S.A.

2 | METODOLOGIA

É possível subdividir o sistema de classificação da pilha de disposição de estéril (PDE) proposto neste trabalho em três etapas principais, são elas: coleta de dados de campo e de ensaios de laboratório; análise e avaliação de risco geotécnico e, por fim, classificação da pilha de disposição de estéril, como pode ser observado no Quadro 1.

Classificação da PDE Oeste



Quadro 1- Etapas de classificação da DPE Oeste

O equilíbrio limite é a teoria capaz de analisar a estabilidade de taludes, seccionando ao longo de superfícies de deslizamento do talude da pilha de estéril, que são em formas lamelas ou cortes. O número de fatias varia e depende volume de material rochoso que é limitada pela ruptura de acordo com a geometria da massa de deslizamento e seus tipos de materiais. O processo iterativo numérico que satisfaz todas as condições de equilíbrio é o método para calcular o fator de segurança de uma falha de declive específica. A teoria do equilíbrio limite utilizou o método de Spencer para determinar o fator de segurança (FoS) dessa PDE, uma vez que o método de Spencer não considera apenas o equilíbrio limite em relação ao momento, mas também os pontos de tensão e resistência entre as fatias ou lamelas (JACOBSZ, 2016).

O coeficiente R_u avalia a saturação, que é a rocha retém água, que modela a pressão dos poros como um fator de pressão vertical da terra para cada fatia do balanço limite; cada fatia contém 10% de massa que mostra o fenômeno de pressão dos poros (coeficiente de R_u de 10%). Por outro lado, a saturação de sua fundação considera o coeficiente H_u igual a 1. A equação 1 rege este coeficiente, ou seja, considera que a fundação retém água inteiramente.

$$\mu = H_u y^u h$$

Equação 1 – Coeficiente H_u

A pressão dos poros é calculada por meio de um coeficiente H_u variando de 0-1. Onde $H_u = 0$ significa solo seco, enquanto $H_u = 1$ representa condições hidrostáticas. Slide® analisa as seções críticas da pilha de estéril Oeste. Este software estima automaticamente a pressão dos poros usando a Equação 2.

$$H_u = \cos^2 \alpha$$

Equação 2 – estimativa da poropressão

Onde α representa a inclinação da superfície da água em relação à horizontal. A análise de estabilidade utiliza os critérios de Mohr-Coulomb para determinar o comportamento da rocha e do solo presentes na PDE Oeste. A equação generalizada é apresentada como Equação 3, que consiste no critério de ruptura, Mohr-Coulomb, que depende do atrito e da coesão simultaneamente.

$$\tau_f = c + \tan\Phi$$

Equação 3 – cálculo da resistência do material rochoso

Para definir a localização exata das seções críticas, Civil3D-Autocad® permite uma boa avaliação das seções a partir da topografia atualizada, conforme mostra a Figura 2, foram selecionadas a seções com as geometrias menos favoráveis à estabilidade da PDE Oeste.

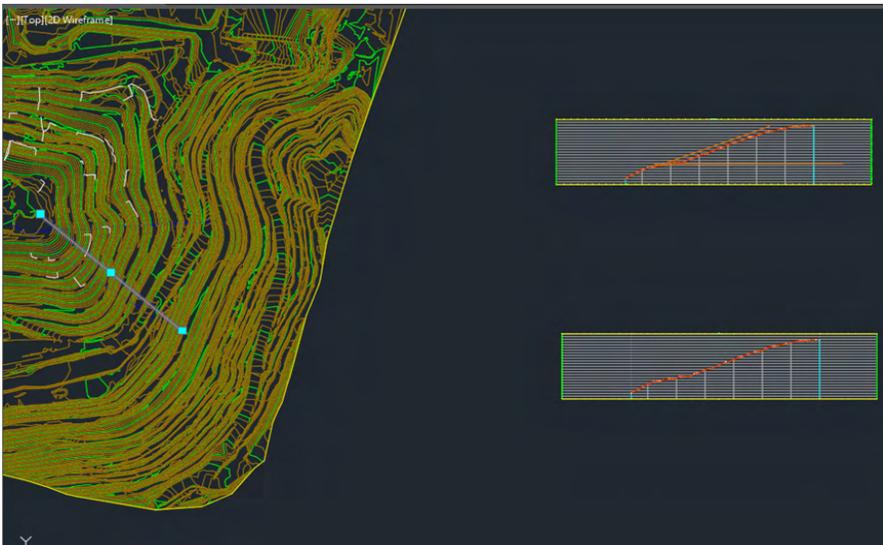


Figura 2 – Seleção de seções críticas da PDE Oeste (Civil3D-Autocad®)

A Figura 3 expõe a aplicação do Slide® para encontrar o fator de segurança de um de geometria crítica, considerando todos os lados da PDE Oeste. É ressaltado o método de Spencer de interação das lamelas ou fatias do equilíbrio limite.

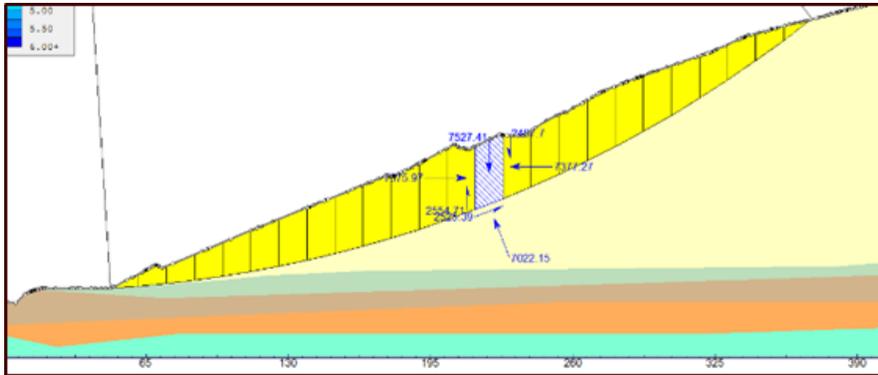


Figura 3- Método de Spencer e o Equilíbrio Limite

O método de classificação consiste em uma soma de pontuações, o risco de ruptura aumenta conforme a pontuação também aumenta, possuem relação direta. As pilhas de estéril são classificadas em quatro categorias diferentes de acordo com o risco de falha, eles são insignificante, baixo, moderado ou alto. As quatro categorias ou classes de estabilidade da PDE são determinadas com base na análise das seções críticas de estabilidade, geometria, taxa de disposição de estéril entre outros fatores já apresentados no Quadro 1. O método de classificação ajuda a definir o nível de esforço ou trabalho exigido para manter a estrutura geotécnica estável. Propõe-se um método conveniente para avaliar o nível apropriado de esforço refletido pela classificação de estabilidade de uma PDE. Portanto, este método permite definir premissas, determinar o nível provável de restrição operacional e indicar uma classificação ou classe de estabilidade da PDE. Podem refletir os requisitos de monitoramento frequente, por exemplo. Quando uma pilha de estéril reflete uma pontuação inferior a 300, o mínimo aceitável, ela representa um risco de ruptura insignificante. Por outro lado, a pontuação máxima possível é de 1800. Uma PDE com a pontuação máxima é classificada como classe IV, o que significa alto risco de ruptura ou colapso, seria necessária uma investigação profunda e um alto nível de esforço de projeto para um pilha de disposição de estéril com essa classificação. Características geométricas são levadas em consideração, as alturas, por exemplo, são divididas em quatro intervalos: menos de 50 metros, entre 50 e 100 metros, de 100 a 200 metros e superiores a 200 metros. Em termos de volume, o depósito de resíduos pode ser pequeno (menos de 1 milhão de metros cúbicos de banco), médio (de 1 a 50 milhões de metros cúbicos por banco) e grande (mais de 50 metros cúbicos por banco). A inclinação do despejo em declive que é classificada como plana (menos de 26 graus), moderada (de 36 a 35 graus) e íngreme (mais de 35 graus). O método também classifica intervalos de inclinação da fundação variando de suave (<10 graus) a extremamente inclinada (> 32 graus) e se define como plana, moderada, íngreme e extrema, que corresponde de zero a duzentos de pontuação.

Além da configuração geométrica, o método classifica o grau de confinamento do material rochoso depositado pode variar entre confinado, moderadamente confinado e não confinado, seguem algumas características e marcam mais pontos possíveis para a classificação. As inclinações da fundação também influenciam na classificação. É confinado, intermediário ou não confinado, considerando fatores de observação de sua forma da Pilha, como de fundo de vale ou ainda do tipo pilha propriamente dito, empilhamento ou também chamado informalmente de “bolo de noiva” tal como é o caso da PDE em estudo. Enquanto a qualidade do material despejado é alta, moderada e ruim. Por sua vez, o método de construção é favorável, misto ou desfavorável. As condições Piezométricas e climáticas apresentam juntas uma importante variável na classificação da PDE, que pode ser intermediária favorável e desfavorável. Enquanto a taxa de disposição de estéril é definida como lenta, moderada ou alta. A última variável é a sismicidade que é baixa moderada ou alta após os estudos da zona de risco.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados necessários para a classificação da PDE Oeste do complexo ferrífero de Carajás foram elencados neste trabalho conforme Quadro 2. Esta estrutura geotécnica tem sua classe definida de acordo com o método apresentado, que descreve e pontua cada uma das características que regem a estabilidade de uma pilha de estéril segundo metodologia apresentada.

NOME	PILHA DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (PDE) OESTE
<i>Ciclo de vida</i>	<i>Desativada ou descomissionada</i>
<i>Localização</i>	<i>Ao Oeste da mina N4E (-9330793 e 591022) SAD69</i>
<i>Altura</i>	<i>155,35 metros</i>
<i>Elevação (cota)</i>	<i>863,35 metros</i>
<i>Área</i>	<i>957.295,32 metros quadrados</i>
<i>Volume</i>	<i>62.300,00 metros cúbicos</i>
<i>Massa</i>	<i>124.600,00 toneladas</i>
<i>Inclinação global dos taludes</i>	<i>23 graus</i>
<i>Inclinação de talude (entre bancos)</i>	<i>27 graus (variando de 16 a 27 graus)</i>
<i>Inclinação da fundação</i>	<i>Até 3%</i>
<i>Tipo da PDE</i>	<i>Empilhamento, pilha central ou “bolo de noiva”</i>
<i>Volume/banco</i>	<i>7,8 metros cúbicos</i>
<i>Inclinação do talude entre bancos (altura/banco)</i>	<i>Varia de 17 a 27 graus</i>
<i>Altura por banco</i>	<i>20 metros (varia de 18 a 23,6)</i>

<i>Largura de berma</i>	<i>Varia entre 4,5 a 25 metros, a largura de berma diminui à medida que a altura aumenta.</i>
<i>Drenagem superficial</i>	<i>Complementam a vazão através de estruturas civis como canaletas, e valetas.</i>
<i>Método Construtivo</i>	<i>Misto: método ascendente nas últimas décadas, e método ascendente desde 1984 em diante.</i>
<i>Material da fundação</i>	<i>Fundação resistente com rochas máficas competentes.</i>
<i>Material disposto</i>	<i>Estéril com granulometria fina</i>
<i>Grau de confinamento</i>	<i>Solo confinado</i>
<i>Taxa de disposição</i>	<i>Sem disposição por mais de 3 anos</i>
<i>Condições climáticas</i>	<i>Taxa de precipitação total Anual de 2.088 milímetros</i>
<i>Condições piezométricas</i>	<i>Sem evidências de pressão piezométrica significativa, considerada baixa, portanto.</i>
<i>Sismicidade</i>	<i>Zone 0 de risco sísmico de acordo com ABNT/NBR 15421/2017</i>

Quadro 2 – Dados coletados em trabalhos de campo e estudos prévios da PDE Oeste

Seguindo ao seu resultado, o guia de classificação ainda é capaz de sugerir um determinado nível de esforço que deve ser feito para a estrutura. De acordo com o método, a PDE Oeste atingiu 550 pontos de pontuação, o sistema de classificação define a pilha como classe de estabilidade II (faixa de pontuação entre 600 a 1200 pontos) o que indica um baixo risco potencial de ruptura, colapso ou desestabilização significativa.

Fatores-chave da estabilidade	Descrição	Intervalos das condições		Pontuação	
Geometria da PDE	Altura	Regular	155,34m	De 100 a 200 m	100
	Volume	Moderado	7.800 m ³ /bancos	Entre 1 a 50.000 m ³ /banco	50
	Inclinação global	Flat	23°	Menos de 26°	0
	Inclinação da fundação	Flat	3°	Menos de 10%	0
Grau de confinamento	Confinado	Talude côncavo em uma seção plana	Talude côncavo em uma seção plana –bom suporte em sua fundação		0
Tipo de fundação	Competente	Material da fundação tão competente ou mais competente que o material disposto na PDE, Sem estrutura geológica adversa.			0

Qualidade do material disposto	Baixa	Poucas rochas e muito solo bem intemperizados –com granulometria fina em mais de 25% do material.		200
Método construtivo	Misto	Espessura vertical da camada disposta por banco moderada (de 25 a 50), método construtivo misto.		100
Condições climáticas e piezométricas	Intermediária	Desfavorável	Alta pressão piezométrica, surgências, alta precipitação, alto potencial para surgimento de superfície freática ou para elevar o nível de saturação consideravelmente.	100
Taxa de disposição	Baixa	Sem disposição nos últimos 3 anos	Menos de 25m ³ em bancada por metros lineares da crista do talude por dia (menor taxa).	0
Sismicidade	Baixa	Zona de risco 0 (zero)	Risco sísmico mínimo	0
PONTOS DE ESTABILIDADE				550
CLASSE DE ESTABILIDADE DA PDE				II

Quadro 3 -Avaliação de Segurança PDE Oeste

O Quadro 3 reúne todos os dados correspondentes às etapas de classificação das estacas apresentadas na metodologia, expondo a pontuação de cada etapa de avaliação do método. Ao final do Quadro 3, é possível observar a pontuação total referente à soma das sucessivas etapas de classificação da pilha de descarte Oeste. Por meio da pontuação final quantificada para esta pilha, será possível discutir a classificação obtida e quais atividades são recomendadas para a estrutura geotécnica que se encontra nesta faixa de classificação.

A classe de estabilidade definida através da avaliação é de nível II, o que significa que os esforços recomendados estão entre outros: Investigação completa do local, poços de teste, amostragem podem ser necessários, vários ensaios de laboratório, análise de estabilidade simples necessária, algumas restrições na construção, motoramente de rotina e instrumentação simples como INA (indicador de nível d'água) e Avaliação da poropressão.

Os fatores mais expressivos que merecem maior atenção e contribuem para a desestabilização da estrutura geotécnica, os quais foram abordados neste trabalho são:

altura da estaca; qualidade do material predominante de rochas de baixa competência no empilhamento; método de construção misto de elevação de margem; condições piezométricas e climáticas moderadamente desfavoráveis. A altura do depósito de estéril Oeste é de 155,34 metros e, portanto, é classificado com a segunda maior faixa de pontuação nesta categoria, pontuando 100 para esta característica da estrutura geotécnica, em termos de altura. É importante destacar que quanto maior a soma das pontuações das categorias, menor é a estabilidade.

A qualidade do material predominante é de baixa competência, compondo a pilha de estéril com rochas de baixa competência e muito intemperizada e solo, que é o material da escavação que não tem aproveitamento econômico no momento da lavra, e sua retirada é fundamental para a exploração do minério localizado nas camadas abaixo desta e, portanto, não permite a substituição do material. O método construtivo é misto, pois apresenta as duas formas, em sequência ascendente e descendente, depende da década, já que a PDE Oeste data desde a década de 1980 e deixa de receber estéril há pouco mais de 3 anos. Os fatores que combinados determinaram o método construtivo foram: minimização da distância média de transporte, capacidade e estabilidade da estrutura geotécnica.

A influência do carga sísmica também foi investigada neste trabalho. Em suma, o fator de segurança sofre redução insignificante devido à sismicidade. O carregamento sísmico adicionado à situação crítica das águas subterrâneas não é capaz de deixar o fator de segurança global da PDE Oeste abaixo de 1,3. É um excelente indicador de boa segurança da estrutura, pois atende aos requisitos normativos mesmo que seja considerada a atividade sísmica da região. Os fatores de segurança das seções analisadas apresentam bons resultados. O fator de segurança (FS) global do trecho, parte leste da PDE Oeste que apresenta piores resultados, é normalmente 1,76 e se for considerado também o nível freático crítico, durante a estação chuvosa Amazônica, o fator de segurança cai para 1,48. Analisando taludes individualmente (em apenas alguns taludes isolados, não é o FS global) quando a análise considera a poropressão, o lençol freático crítico e a sismicidade ao mesmo tempo O resultado é o menor fator de segurança deste trabalho, FS de 1,35 como é perceptível na Figura 4.

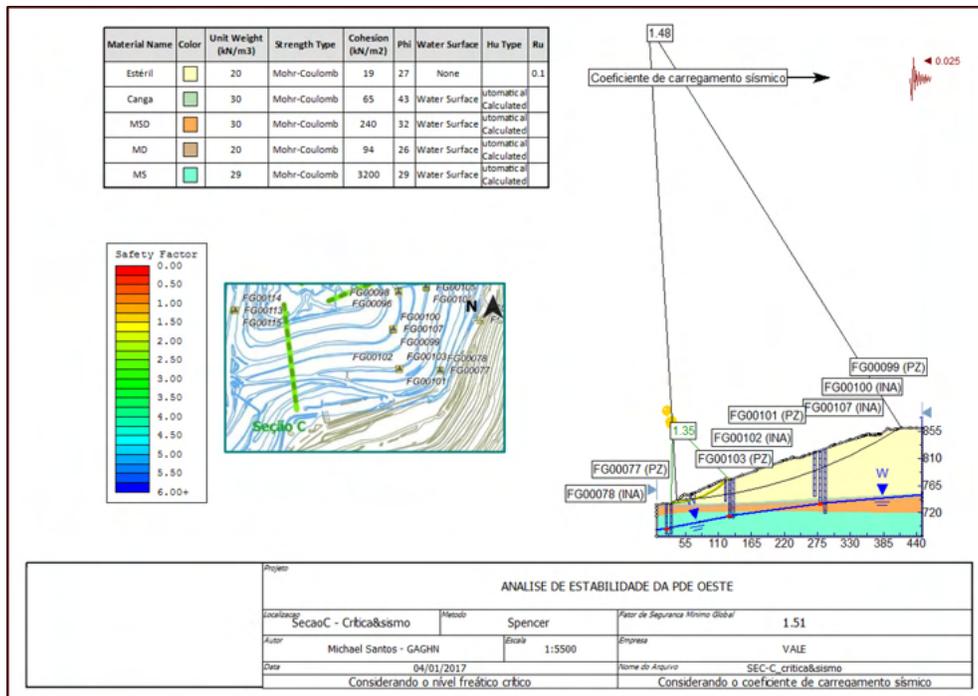


Figura 4- Análise de estabilidade da seção mais crítica

Os fatores de segurança também fornecem uma boa avaliação, que mostra um bom nível de estabilidade mesmo que ocorresse uma atividade sísmica na parte chuvosa do ano, nível freático crítico, a PDE Oeste manteria sua estabilidade física.

4 | CONCLUSÃO

O sistema de classificação de Pilhas de disposição de estéril apresentado é uma ferramenta muito útil na avaliação de PDE de mineração de ferro em fase de desativação, atingindo um nível razoável entre aplicabilidade e facilidade no estudo do caso avaliado. O sistema de classificação utilizado consiste em uma forma de primeira avaliação, que deve indicar o nível de esforço que deve ser aplicado e quanta pesquisa e planejamento de atividades se recomenda para cada situação. A pontuação da avaliação de segurança da PDE estudado totalizou 550 pontos, o que corresponde à classe de estabilidade II, indicando baixo potencial de ruptura. O menor fator de segurança é de 1,35 (em um talude na seção mais crítica, não se refere ao fator de segurança global) quando a análise considera a sismicidade, o nível freático crítico e poropressão ao mesmo tempo, que ainda é capaz de manter estável o depósito de estéril Oeste.

O guia de classificação de pilha de estéril recomenda uma inspeção local, incluindo monitoramento frequente de poços, amostragem obrigatória, análise de estabilidade

obrigatória básica (que já é feita no monte estudado), algumas restrições na construção de conclusão, instrumentação visual e de rotina também podem ser necessárias. Portanto, este sistema de classificação serve de base para a tomada de decisão inicial no que diz respeito às pesquisas geotécnicas e, conseqüentemente, dá uma boa ideia do nível de investimento necessário para a implantação da estabilidade da PDE Oeste.

Os fatores que trazem instabilidade à PDE Oeste são a qualidade do material, por se tratar de decapeamento de baixa competência geomecânica, método construtivo misto, condições climáticas desfavoráveis. Além de ser uma pilha com dezenas de anos e, portanto, possui altura e volume consideráveis, os maiores, de fato, de todos os do complexo minerário de Carajás, no Pará, Brasil.

Por outro lado, os fatores que contribuíram para a manutenção da estabilidade geotécnica da PDE Oeste são a inclinação que permanece 23 graus no ângulo de inclinação global, a fundação que é praticamente plana e formada por material muito competente, a taxa de disposição que nos últimos anos foi zero. A sismicidade também foi um fator analisado, mas não teve influência significativa na estrutura geotécnica estudada dada sua zona sísmica.

5 | REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Coletânea de normas de mineração e meio ambiente - NBR 13029. Rio de Janeiro. 2006.

ABRAMSON, L.W. LEE, T.S., SHARMA, S., and BOYCE, G.M. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo; VIRGILI, José Carlos. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A, Ed(s). *Geologia de Engenharia*. São Paulos: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

BC Mine Waste rock Pile Research Committee. *Mined rock and overburden piles*. Investigation & Design Manual, Interim Guidelines, 1991.

COUZENS, T. R. *Planning Models: Operating and Environmental Implications*. McCarter, M. K. Design of Non-Impounding Mine Waste Dump, AIME, New York. 1985.

FRANCA, O., FRANCO, D., ÁVILA, J. P. & ROBERTSON, A. M. *Risk Management Assessment of dams and waste dumps on MBR mines*. Minas Gerais, Brazil. 2002.

JACOBSZ, S. *Proceedings of the first Southern African Geotechnical Conference*. London: Taylor & Francis Group, 2016.

LOTTERMOSER, B. *Mine Wastes*. Berlin: Springer Berlin, 2014.

MINING ENGINEERING HANDBOOK. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Peter Darling (editor). Third edition. Vol. 1 and 2, USA. 2011.

TALLARICO, F.H.B., MCNAUGHTON, N.J., GROVES, D.I., FLETCHER, I.R., FIGUEIREDO, B.R., CARVALHO, J.B., REGO, J.L., Nunes, A.R. Geological and Shrimp II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, 2006.

VASQUEZ, M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A.. Mapa geológico do Estado do Pará– proposta e avanços. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9, Belém. Resumos Expandidos, Belém, SBG. CD ROM 2006.

AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS EM UM DEPÓSITO MINERAL DE CALCÁRIO CALCÍTICO

Data de aceite: 01/11/2021

Data de submissão: 03/11/2021

Nayara Augustino Amorim

Departamento de Engenharia de Minas –
Universidade Federal de Pernambuco
Recife – PE
<http://lattes.cnpq.br/7959423306035136>

Júlio César de Souza

Dept. de Engenharia de Minas – Universidade
Federal de Pernambuco
Recife - PE
<http://lattes.cnpq.br/4295864256992991>

Jorge Luiz Valença Mariz

Depto. de Engenharia de Minas – Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Recife - PE
<http://lattes.cnpq.br/4225383677086672>

Suelen Silva Rocha

Departamento de Engenharia de Minas –
Universidade Federal de Pernambuco
Recife - PE
<http://lattes.cnpq.br/9112697423226628>

Gabriel Filinkoski

Departamento de Engenharia de Minas –
Universidade Federal de Pernambuco
Recife – PE
<http://lattes.cnpq.br/0114449032235103>

RESUMO: Este trabalho avaliou uma ocorrência mineral de calcário calcítico situada na Fazenda Barrinha a qual localiza-se na cidade de Formosa

da Serra Negra – MA, por meio de modelagem geológica em ambiente computacional. A modelagem do depósito e estimativa dos recursos minerais medidos foram realizadas com base em dados topográficos e informações obtidas com a recuperação dos testemunhos de sondagem utilizando a ferramenta Studio 3, da Datamine. Como resultado, verificou-se a existência de uma delgada camada de material de recobrimento no maciço constituída por solo areno-argiloso e calcário alterado, e um volume de calcário calcítico consideravelmente grande foi estimado. O recurso medido de calcário calcítico e do material do capeamento obtidos mediante a modelagem foi de aproximadamente 3,76 milhões m³ e 510 mil m³, respectivamente, o que possibilita uma vida útil de aproximadamente 10 anos ao empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Geológica, Calcário, Planejamento de Lavra, Avaliação de Reservas.

EVALUATION OF MINERAL RESOURCES IN A CALCITIC LIMESTONE DEPOSIT

ABSTRACT: This paper evaluated a mineral occurrence of calcitic limestone in Fazenda Barrinha located in Formosa da Serra Negra - MA, through geological modeling in a computational environment. The modeling of the deposit and measured mineral resources estimation were carried out based on the topographic database and the drillholes surveys using the Datamine tool, Studio 3. As a result, it was verified the existence of a thin layer of coating material, constituted of a sand-argillaceous soil and altered limestone and a large volume of calcitic limestone. The

measured resource of calcitic limestone and coating material obtained through the modeling was approximately 3,76 million m³ and 510 thousand m³, respectively, which allows a useful life of approximately 10 years to the mine.

KEYWORDS: Geological Modeling, Limestone, Mine Scheduling, Reserve Evaluate.

1 | INTRODUÇÃO

A mineração tem papel fundamental no desenvolvimento da humanidade desde os tempos pré-históricos, onde os minerais eram utilizados nas mais diversas atividades. À medida que novas tecnologias foram sendo assimiladas, também foram desenvolvidas novas metodologias de exploração dos recursos minerais, chegando-se ao atual cenário em que se tem a informatização de processos que antes requeriam maior tempo e menor confiabilidade. Ainda assim, um desafio global nos próximos anos será o aproveitamento ambientalmente amigoso e atrativo financeiramente dos recursos minerais para atender à demanda crescente da sociedade cada vez mais consumista, sendo um dos setores de maior demanda o de agregados para construção civil. Atualmente, a mineração a céu aberto contribui significativamente na produção de bens minerais (SHISHVAN e SATTARVAND, 2015).

A quantificação e qualificação das reservas minerais são aspectos fundamentais para determinar a viabilidade técnica e econômica de um projeto de mineração. Yamamoto (2001) afirma que o processo de avaliação de um depósito é iniciado com a sua amostragem e tem por objetivo caracterizar a reserva mineral, determinando tipo e extensão da mineralização, a geometria do corpo mineralizado e os seus teores. Os métodos para avaliação de recursos e reservas minerais foram constantemente melhorados para produzir resultados mais precisos e confiáveis. Este aperfeiçoamento foi resultado da crescente escassez de depósitos minerais com alto teor, do grande investimento necessário à abertura de novas minas, e também da evolução de métodos computacionais, que permitiram o fácil manuseio de grande volume de dados de maneira confiável.

Segundo Guerra (1988), os métodos para avaliação de recursos e reservas minerais podem ser classificados em três grandes grupos: métodos convencionais, métodos estatísticos e métodos geoestatísticos. Os métodos computacionais utilizam as funções matemáticas de interpolação, as quais são aplicadas para o cálculo das variáveis de interesse nos blocos de cubagem. As diferenças dos métodos convencionais para os computacionais residem na geometria, na dimensão dos blocos de cubagem e na forma de cálculo dos teores (CURI et al., 2013).

Os métodos computacionais possibilitam a estimativa dos recursos geológicos com maior controle do erro associado, permitindo a definição dos limites da lavra através da modelagem tridimensional geométrica dos depósitos, que consiste em uma representação matemática altamente precisa de dados ou pontos dispostos em três dimensões (CURI,

2014). A utilização de ferramentas computacionais, como os softwares desenvolvidos para a área de planejamento de mina, permite a visualização do corpo mineralizado tridimensionalmente, o que facilita a futura alocação da infraestrutura, dimensionamento dos acessos e aberturas, projeto da cava final, definição dos volumes de minério e estéril no capeamento, a relação estéril/minério e o limite da extração. Tais parâmetros são empregados na determinação da viabilidade técnico-econômica de exploração da jazida (ROCHA et al., 2018).

O setor de agregados para construção civil, que inclui os produtos do calcário, apesar de ter grande expressão no desenvolvimento urbano por oferecer os insumos mais utilizados em diversos setores industriais, apresenta dificuldades com relação à fase inicial de avaliação de recursos e reservas disponíveis por questões como o alto custo para realização de levantamentos topográficos e realização de campanhas de sondagem, o que dificulta a etapa posterior de planejamento da programação da produção que poderiam tornar seus processos mais eficientes, devido ao alto custo de desenvolvimento (CARMO, 2013).

Neste âmbito, o presente estudo teve por objetivo estimar os volumes de minério e estéril, a relação estéril/minério, a cava final e a vida útil de um empreendimento através da modelagem geológica em ambiente computacional de uma ocorrência de calcário situada na Fazenda Barrinha, localizada no município de Formosa da Serra Negra, estado do Maranhão.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização e Contexto geológico

O depósito de calcário calcítico localiza-se na Fazenda Barrinha, no município de Formosa da Serra Negra - MA, conforme ilustra a figura 1, o qual encontra-se a 642 km ao sul da cidade de São Luís. O acesso à cidade de Formosa da Serra Negra, partindo de São Luís, se dá através da BR-135 até a cidade de Presidente Dutra, tomando-se em seguida a BR-226, passando pelo município de Barra do Corda, saindo para a rodovia estadual MA-006 percorrendo uma distância de 86,2 km até a cidade de Formosa da Serra Negra. A partir de então, toma-se a estrada vicinal rumo ao povoado da Varjota por cerca de 48,8 km e seguindo por cerca de 1,32 km se encontra a fazenda Barrinha.

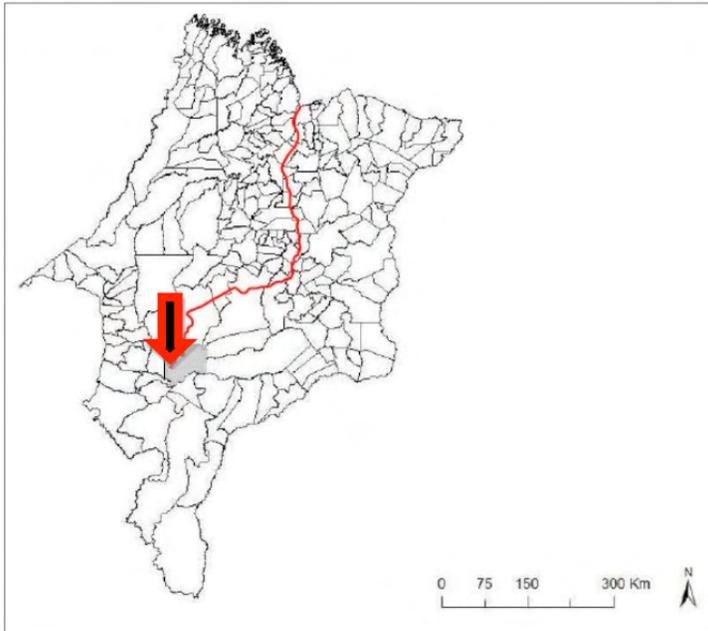


Figura 1 – Mapa de localização e acesso ao município de Formosa da Serra Negra

Fonte: IBGE (2011)

A história da construção e evolução geológica dessa região é demarcada por quatro conjuntos de episódios: episódios do Arqueano, episódios do Paleozoico, episódios do Mesozoico e episódios do Cenozoico (figura 2), sendo este último o mais importante para a compreensão da área estudada, visto que o mesmo é marcado por processos de sedimentação continental fluvial e transacional ocorridos em toda região costeira, em decorrência dos recuos e avanços do mar, originando bolsões e/ou camadas de calcário que bem documentam os eventos transgressivos ocorridos ao longo do Oligoceno – Piloceno.

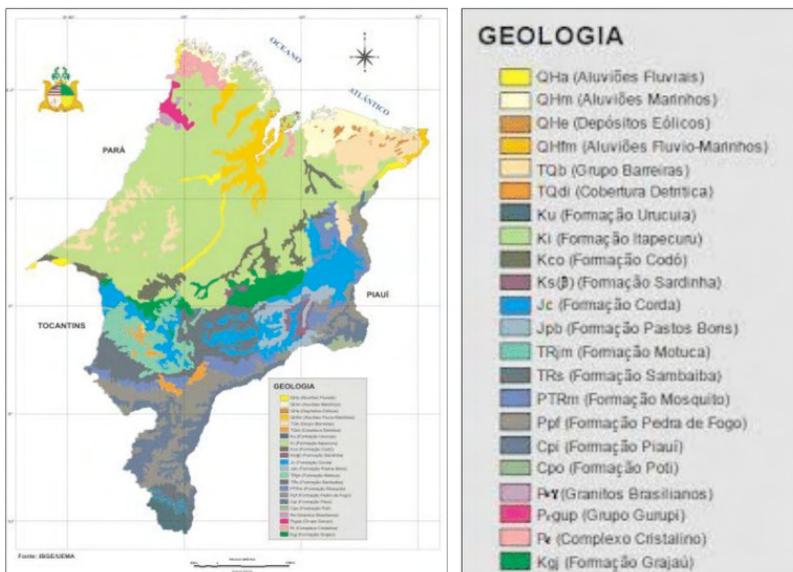


Figura 2 – Mapa geológico do estado do Maranhão

Fonte: CPRM (2011)

A região que circunda a área onde localiza-se o depósito de calcário presente na Fazenda Barrinha é composta por um perfil estratigráfico sequenciado, da base para o topo, pelas Formações Sambaíba, Mosquito, Corda, Grajaú, Codó e por Coberturas Quaternárias, como pode ser visto nas figuras 3 e 4.



Figura 3 – Contato do Basalto da Formação Mosquito com arenito da Formação Sambaíba, Lavra do CESTE (Consórcio Estreito de Energia) - Estreito / MA

Fonte: AMORIM (2018)



Figura 4 – Arenito da Formação Sambaíba (Poço Azul – Riachão/MA)

Fonte: AMORIM (2018)

2.2 Modelagem geológica e determinação de recursos minerais

O planejamento das sondagens foi realizado considerando-se o polígono delimitador da área requerido para licenciamento mineral junto à Agência Nacional de Mineração (ANM), bem como as áreas que possuem restrição ou exigem autorização prévia aos trabalhos de exploração mineral. As sondagens da área estudada foram executadas através do método de perfuração rotativa com equipamento Sonda MACH 920 com motor Agrale M-93 com tripé (figura 5), realizando-se a recuperação de testemunhos para posterior análise mineralógica e química. Além dos furos de sonda, foram escavados trincheiras e poços para análise geomorfológica da área, verificação do condicionamento topogeológico e para conhecimento do perfil estratigráfico em diferentes pontos do depósito mineral.



Figura 5 – Equipamento utilizado para execução das sondagens

Fonte: LOCASONDA (2014)

Foram realizados 17 furos de sonda com profundidade média de 17,5 m segundo uma malha retangular (225 m x 93 m) com furos nas interseções e furos extremos. As trincheiras e poços foram escavados em malha livre com profundidade variável (até 3 m) e seção retangular de 1 m e 1 m x 2 m, respectivamente, com o intuito de verificar as características e espessura da camada de cobertura do minério ao longo do depósito mineral.

A simulação computacional foi realizada através da compilação dos dados topográficos obtidos na base de dados do Google Earth e dos dados coletados durante as campanhas de sondagem, combinando-se os softwares Surfer versão 9.0, AutoCAD versão estudante 2016 e Studio 3D da Datamine.

Para a construção da topografia do terreno foi necessária a criação de curvas de nível que representassem a superfície, as quais foram obtidas utilizando as cotas fornecidas pelo Google Earth e processadas no software Surfer, sendo em seguida georreferenciadas no software AutoCad. O Modelo Digital de Terreno ou DTM (Digital Model Terrain) foi obtido no Datamine Studio 3D, a partir da interpolação por triângulos (*wireframe*) de forma semiautomática.

A partir das informações obtidas na campanha de sondagens, foi realizada a modelagem do depósito de calcário. Para construção do modelo tridimensional do depósito utilizou-se o Método das Seções Verticais, onde foram desenhadas seções a partir dos furos de sondagem, as quais foram posteriormente unidas em uma única *wireframe*, compondo assim um sólido que representasse o calcário contido no depósito.

Neste contexto, o volume de recurso geológico medido de calcário foi obtido

mediante a avaliação do modelo geológico tridimensional obtido com a simulação computacional, possibilitando desta forma a modelagem espacial do corpo de minério através da visualização das camadas estratigráficas litológicas que compõem o depósito.

2.3 Modelagem geométrica da cava

O modelo da cava final foi elaborado no software Studio 3 da Datamine a partir do modelo geológico e do terreno. A modelagem da cava iniciou-se pelo projeto da bancada de estéril, a qual tem início no limite superior do minério.

Baseadas na espessura média da camada, foram projetadas três bancadas com altura média de 10 m cada para a porção de minério lavrada com inclinação de 80° e bermas com 3 m de largura.

Os aspectos geométricos da cava como altura de bancada, inclinação da face dos taludes, área da praça operacional, acessos (largura e inclinação), largura de bermas etc., foram determinados de acordo com os equipamentos disponíveis na empresa GRC Britagem Ltda., a qual será responsável pela extração mineral.

O cálculo da relação estéril-minério (REM), um dos parâmetros utilizados para verificar a profundidade máxima da cava, e a vida útil da mina foram realizados utilizando-se as equações 1 e 2, respectivamente.

$$REM(t/m^3) = \frac{\text{Volume de estéril}}{\text{Tonelagem de minério}} \quad (1)$$

$$\text{Vida útil} = \frac{R_m \times F_t}{P_m} \quad (2)$$

onde, R_l representa a reserva lavrável, F_t a recuperação na lavra e P_m a produção média.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem geológica

A figura 6 apresenta o mapa de planejamento para execução dos furos de sondagens, no qual a distribuição dos furos de sondagem é representada pelos pontos em vermelho. A região estudada estava compreendida em uma área retangular de 900 x 555 m (499.500 m²). Devido à presença de Áreas de Preservação Permanente (APP), cursos d'água e regiões com alta densidade arbórea na região (limite superior da área delimitada), destacadas na figura 6 (em azul), até o presente momento a execução de sondagens para pesquisa nestas localidades foi inviável.



Figura 6 - Mapa do planejamento de furos de sonda

Fonte: AMORIM (2018)

A partir das sondagens (furos de sonda, trincheiras e poços) (figura 7), observou-se que o material de recobrimento (capeamento) é composto por um solo areno-argiloso e uma camada de calcário intemperizado. Verificou-se, ainda, que a espessura do capeamento correspondente ao solo não superou 1 m, estando as camadas inferiores do material escavado pelas trincheiras e poços compreendidos na zona de alteração do calcário. Mediante a modelagem subsequente às sondagens, verificou-se que a espessura média medida da camada de calcário foi de 20 m. A figura 8 ilustra as curvas de nível e o Modelo Digital do Terreno processado no software Surfer, a partir dos pontos obtidos no Google Earth.



Figura 7 - Furo de sonda realizados em afloramento do minério, trincheira e poço escavados para descrição do material de recobrimento, respectivamente

Fonte: AMORIM (2018)

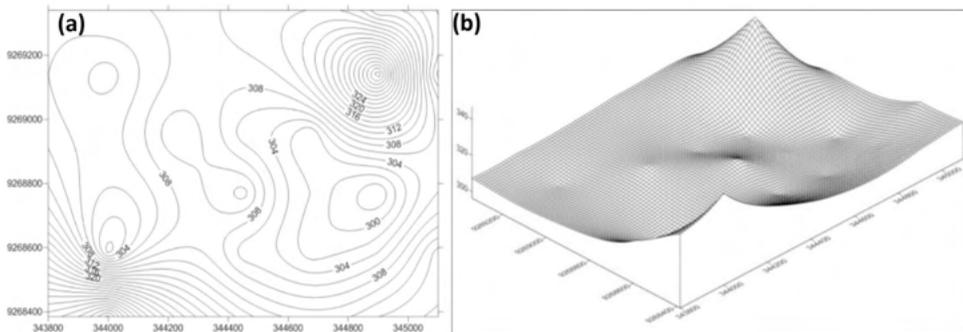


Figura 8 – (a) Curvas de nível e (b) modelo digital do terreno da área estudada

Fonte: AMORIM (2018)

A figura 9 ilustra o modelo tridimensional do material de recobrimento (vermelho) e do calcário (verde) após a interpolação das seções verticais por triângulos, as quais foram elaboradas a partir dos furos de sonda. A figura 10 apresenta o modelo tridimensional da reserva e o modelo digital do terreno com exagero vertical de 5 vezes, para melhor visualização das camadas.

A espessura média do capeamento corresponde à aproximadamente 0,5 m, enquanto a espessura média medida da camada de calcário corresponde à 25 m. Os recursos geológicos medidos do material de recobrimento e do calcário, calculadas pelos volumes contidos no interior das wireframes geradas pelo Studio 3D, foram 510.282,40 m³ e 3.762.767,20 m³ (ou 8.654.364,56 t), respectivamente. As massas específicas in situ do solo e calcário verificadas foram aproximadamente 1,8 g/cm³ e 2,3 g/cm³, respectivamente. Dessa forma, a REM global do depósito foi estimada em aproximadamente 0,06 m³/t.

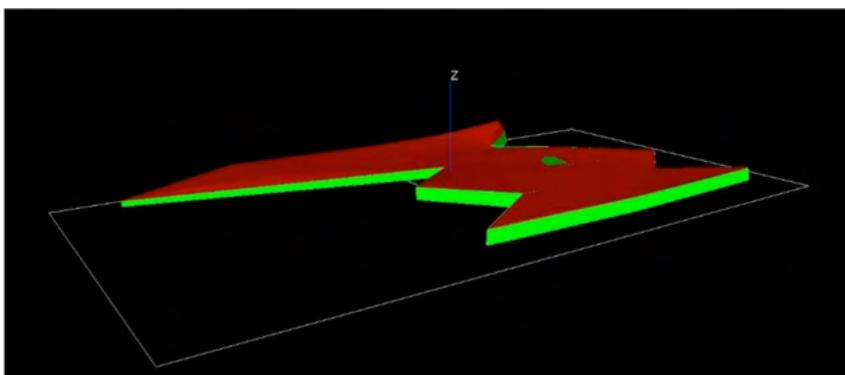


Figura 9 - Modelo tridimensional do capeamento (vermelho) e do calcário (verde)

Fonte: Adaptado de AMORIM (2018)

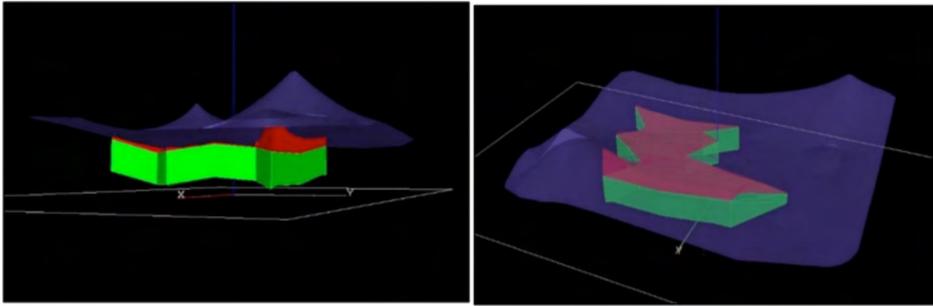


Figura 10 - Modelo geológico e modelo digital do terreno da área estudada com exagero vertical de 5 vezes (capeamento estéril em vermelho e minério em verde)

Fonte: Adaptado de AMORIM (2018)

3.2 Modelagem geométrica da cava

A figura 11 ilustra o modelo tridimensional da cava projetada a partir do modelo geológico, após a exclusão do material de recobrimento e calcário contidos em seu interior, com um exagero na vertical de 5 vezes. A reserva medida de material de recobrimento e reserva lavrável, calculadas pelos volumes contidos no interior da cava, foram 494.642,00 m³ e 2.670.667,50 m³ (ou 6.142.535,25 t), respectivamente.

A REM prevista para a exploração do calcário presente no depósito da fazenda Barrinha foi determinada pela reserva medida de calcário e corresponde a aproximadamente 0,08 m³/t.

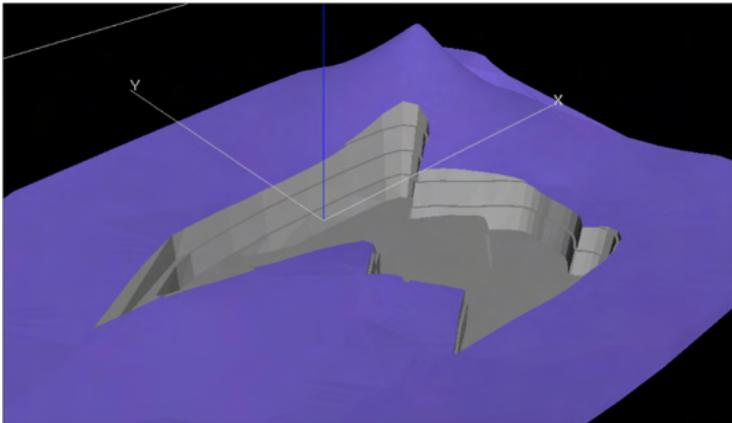


Figura 11 - Modelo tridimensional da cava projetada com exagero vertical de 5 vezes

Fonte: Adaptado de AMORIM (2018)

O cálculo para a definição da vida útil da mina foi baseado na produção de minério prevista e no valor da reserva de calcário obtida na modelagem geométrica da cava. Foi

considerada uma produção mensal de 19.565 m³ de minério, o que corresponde a de 234.780 m³/ano de minério. Do volume total cubado no recurso geológico da área estudada considerou-se apenas cerca de 90% do mesmo presente em áreas ideais para as atividades de lavra. Conforme a eq. (2), a vida útil do depósito em questão é dada por:

$$Vida\ útil = \frac{2.670.667,50 \times 0,90}{234.780} \approx 10\ anos$$

4 | CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou a viabilidade técnica de uma reserva de calcário calcítico localizada no município de Formosa da Serra Negra, no estado do Maranhão, destinado à produção de calcário agrícola e material para agregados do setor de construção civil.

Através do levantamento topográfico e dados obtidos nas campanhas de sondagens foi possível determinar a reserva medida do depósito mineral e a sua vida útil. A reserva calculada para o depósito de calcário avaliado foi estimada em 2.670.667,50 m³, o que corresponde a 6.142.535,25 t. Como o volume estimado de material areno-argiloso da cobertura é de 494.642,00 m³, a REM da exploração é de 0,08 m³/t. Considerando uma produção desejada de 19.565 m³/mês, que correspondem a 234.780 m³/ano, foi estimada a vida útil da mina em aproximadamente 10 anos.

Neste estudo foram levados em consideração apenas os equipamentos disponíveis e parâmetros geométricos para a definição da cava final. Contudo, para uma otimização desta, seria necessário a consideração de outros critérios, dentre eles destacam-se critérios econômicos atualizados para uma remodelagem da cava e determinação da viabilidade econômica do empreendimento mineral.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. **Mapas do Maranhão revelam pressão da nova fronteira agrícola sobre o cerrado e o potencial hídrico subterrâneo do estado**. 2011. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agenciade-noticias/releases/14155-asi-mapas-do-maranhao-revelam-pressao-da-novafrenteira-agricola-sobre-o-cerrado-e-o-potencial-hidrico-subterraneo-doestado.html>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

AMORIM, N. A. **Projeto de Viabilidade Econômica da Jazida de Calcário Calcítico da Mina Barrinha em Formosa da Serra Negra – MA**. Projeto de Graduação – Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Engenharia de Minas, 2018.

CPRM. **Relatório diagnóstico do município de Formosa da Serra Negra**. 2011.

CURI, A., PEREIRA, M. A., SOUSA, W. T., SILVA, V.C. Final open pit design for Monte Raso phosphate mine. **International Journal of Modern Engineering Research**, vol. 3, pp 3780-3785, 2013

CURI, A. **Minas a Céu Aberto** – planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de textos, 2017.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília: DNPM, 1988.

LOCASONDA (Locação de Máquinas e Equipamentos de Sondagem). **Mach 920**. 2014. Disponível em: <<http://locasonda.com.br/plus/modulos/catalogo/verProduto.php?cdcatalogoproduto>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

ROCHA, S. S., SOUZA, J. C, CARMO, O. M., RODRIGUES, H. C., Estudo comparativo de ferramentas computacionais para modelagem geométrica e cubagem de maciços rochosos. **Holos**, ano 34, v. 02, n. 1, pp. 1-18, 2018.

SHISHVAN, M. S.; SATTARVAND, J. Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 211, p. 184-197, 2015.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e Classificação de Reservas Minerais**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

DESIGN OF A SELECTIVE FLOTATION SYSTEM FOR A CU-ZN ORE, ASSOCIATED TO HIGH PYRITE-PYRRHOTITE CONTENTS (>25%)

Data de aceite: 01/11/2021

Prieto-Díaz Ma. de J.

Grupo Minero la Concepción, Sin

Hernández-Salazar Ma. M.

Departamento de Ingeniería en Minas,
Metalurgia y Geología, UGTO

Corona-Arroyo M.A.

Departamento de Ingeniería en Minas,
Metalurgia y Geología, UGTO

Elorza-Rodríguez E.

Departamento de Ingeniería en Minas,
Metalurgia y Geología, UGTO

ABSTRACT: The scheme of selective flotation of a Cu-Zn ore, associated with a high iron concentration (>20.0%) in the form of pyrite and pyrrhotite, was established. In order to obtain commercial concentrates, a pre-aeration is required to oxidize the pyrrhotite, as well as an adequate depressor scheme: lime, sodium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) and a mixture of $\text{ZnSO}_4:\text{NaCN}$ (3:1). The acidity developed during the milling of the ore demands an excessive amount of lime, so that to concentrate the ore required to be mixed with tailing from an old dam, which contains 14-15% of limestone. The grades of concentrates obtained were acceptable: 25% Cu/Cu and 54.38% Zn/Zn, while recoveries should be improved. The activity of pyrrhotite during flotation, considers its removal taking advantage of its highly magnetic susceptibility.

KEYWORDS: Selective flotation Cu-Zn ore, high

pyrrhotite content.

1 | INTRODUCTION

In this paper we propose an alternative to a selective flotation for a copper-zinc ore located in the state of Sinaloa, with high concentrations of iron in pyrite and pyrrhotite forms. Volcanic originated copper-zinc ores show highly variable mineralogic compositions as well as alterations related to their depth.

The mineral deposit seems to correspond to a skarn, which is odd, given that these are common in lead-zinc ores with high concentrations of silver and gold. The ore contains chalcopyrite as copper mineral, reaching a 1% concentration. Zinc is present in high concentration as marmatite zinc. The iron concentration is as high as 25% in pyrite and pyrrhotite forms. The absence of secondary copper minerals like chalcocite or bornite solubilize during the grinding phase; activating the sphalerite, should facilitate the differential flotation of this ore, however, the high concentration of pyrrhotite interferes with it.

The presence of pyrrhotite in the Cu-Zn ore, which is fairly common (1–15%), affects flotation by consuming the necessary oxygen for the chalcopyrite flotation, therefore, it becomes necessary to pre-aerate the pulp.

Additionally, given the complexity of the ore, it was imperative to develop a system with

several depressor reagents like sodium metabisulfite, sodium cyanide and zinc sulfate, as well as a high amount of lime (> 6kg/ton in grinding) to float copper. These conditions increase the difficulty of activation and recovery of the blend.

2 | BACKGROUND

One of the main purposes of mineralogy is to control and keep the metallurgic conditions of processes, so that the grades and recoveries are the highest technically and economically possible. Also, offer solutions to problems arising in the processing plant. Mineralogy should not only identify species but it must also point out the: (a) nature and abundance of iron sulfides; (b) of oxidation degree of the ore; (c) gangue nature: basic or acidic and (d) presence or absence of copper minerals and their nature (*Pineda and Aragon, 2011*).

Polymetallic sulfide ores are classified in accordance to their iron sulfide (FeS_2/FeS) content: zero (0% FeS_2/FeS), low (7-10%), medium (15%) and high (>20%). Suggested floating conditions are shown in Table 1. An additional condition to be considered during flotation is the presence of iron sulfide. This compound tends to oxidize during the grinding stage creating ferric salts and increasing acidity. This is more noticeable if the mineral contains marcasite or pyrrhotite, which oxidizes faster than pyrite and increases the iron content. Such event forces to increase the dosing of depressors, but decreases selectivity in concentrates.

Iron Sulfides Content	pH modifier (g/ Ton)	Depressors (g/ Ton) (Mill)	Other Reagents (g/Ton)	Observed Contents
Zero Pb Circuit Zn Circuit	Na_2CO_3 0 CaO 0-200	NaCN 0-50	CuSO_4 250-500	Pb: 75-80 Zn: 0.5-3 Zn: 52-62 Pb: 0.5-0.1
Low Pb Circuit Zn Circuit	Na_2CO_3 0-100 CaO 0-750	NaCN 0-50 ZnSO_4 0-100	CuSO_4 300-600	Pb 60-78 Zn 0.7-5 Zn 52-60 Pb 0.65-3
Medium Pb Circuit Zn Circuit	CaO 0-500 CaO 500-2500	NaCN 30-100 ZnSO_4 0-350	CuSO_4 500-800	Pb 60-78 Zn 2.5-7 Zn 52-60 Pb 0.65-3
High Pb Circuit Zn Circuit	CaO 200-500 ^b CaO 500-2500	NaCN 150-300 ZnSO_4 0-900	Na_2SO_3 o NaHSO_3 (In grinder) 0-500 CuSO_4 600-1000	Pb 55-70 Zn 3-8 Zn 48-57 Pb 1-3

Table 1.- Suggested floating conditions depending on their iron sulfide content [5].

Bulatovic, 2007 proposes flotation systems for Cu-Zn ores with high iron contents as well. However, he points out that the selection of collectors and depressors depends on: a) the presence of gold in the ore; (b) pyrite-pyrrhotite proportion; (c) type of sphalerite and (d) used depressor system [2]. Table 2 shows the flotation system for a monocyclic ore with a 20% FeS₂-FeS content.

Iron Sulfides Content	Added Reagents		pH		Pre- treatment
	Cu Circuit (g/Ton)	Zinc Circuit (g/ Ton)	Cu	Zn	
Monocyclic ore with 20% Pyrite and Pyrrhotite.	Ca(OH) ₂ 400-800 Na ₂ SO ₃ 500-600 D _S 200 50-100 R3477 10-150 SIPX 5-10	Ca(OH) ₂ 600 CuSO ₄ 800-1500 SPX 10 R3894 10 MIBC 10	9.0-9.5	10.0	Long conditioning time for zinc, with lime and CuSO ₄ + Collector
<i>BHP, Les Mines Selbaie</i> , 5 to 15% pyrite, copper with patina, ore body weathered in some parts.	Na ₂ S 250 Na ₂ CO ₃ 600 R208 5-10 3418A 10-15 SO ₂ in cleanups MIBC 0-10	Ca(OH) ₂ 700-1000 CuSO ₄ 250 R3894 5 SIPX 5-10 DF1012 5-10	9.2	10.5-11.5	Zinc cleaners feed conditioning
Geco Mines, Canada, Sedimentary Deposit, Pyrite Sulfides, Pyrrhotite, Chalcopyrite, Sphalerite.	Na ₂ CO ₃ 600 NH ₄ OH 150 SO ₂ 200 NaEX 15 NaCN 12 PAX 15 R208 10	NH ₄ OH 480 CuSO ₄ 320	8.5	10.2	Aeration, could be 15 minutes or up to 30 minutes

Table 2.- Suggested flotation conditions depending on iron percentages in ore [2].

3 I METHODS

The studied sample was provided by the Geology Department of La Concepción Mine, Sinaloa, to the School of Mines, Metallurgy and Geology of the University of Guanajuato. It was prepared for metallurgical testing, and its chemical and mineralogical characterization is described below:

Chemical characterization

The gravimetric elemental chemical analysis of the sample shows the proportions of gold and silver, whilst the remaining elements were quantified with atomic absorption after digestion with HNO₃-HCl. Proportions are shown in Table 3.

g/Ton		Analysis (%)			
Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
1.0	55	0.13	1.33	5.68	26.84

Table 3. Elemental chemical analysis of the sample.

Mineralogical characterization

The sample is comprised of quartz material, showing a dark green color, with big metallic yellow spots and numerous metallic shades such as golden, brass, black and blue gray.

Microphotographs in Figure 1 show (a) massive pyrite associated to pyrrhotite, chalcopyrite and sphalerite, (B) the associations between species of economic interest and gangue minerals [4].



Fig. 1. (a) Massive pyrite, associated with chalcopyrite and sphalerite. (b) Big pyrite crystals with pitted appearance and associated with chalcopyrite and pyrrhotite through the contact edges [4].

Flotation tests

The lab flotation concentrations tests were performed as described by [3] and [7]. We performed the initial tests to establish the depressor reagents and only primary and scavenger concentrates of copper and zinc were floated [1,2]. Once we obtained acceptable levels of concentrates, we performed open tests with cleaners and, finally, we performed the industrial testing. Figure 2 shows the flow diagram as well as flotation conditions under which 500 tons of ore were processed in the plant.

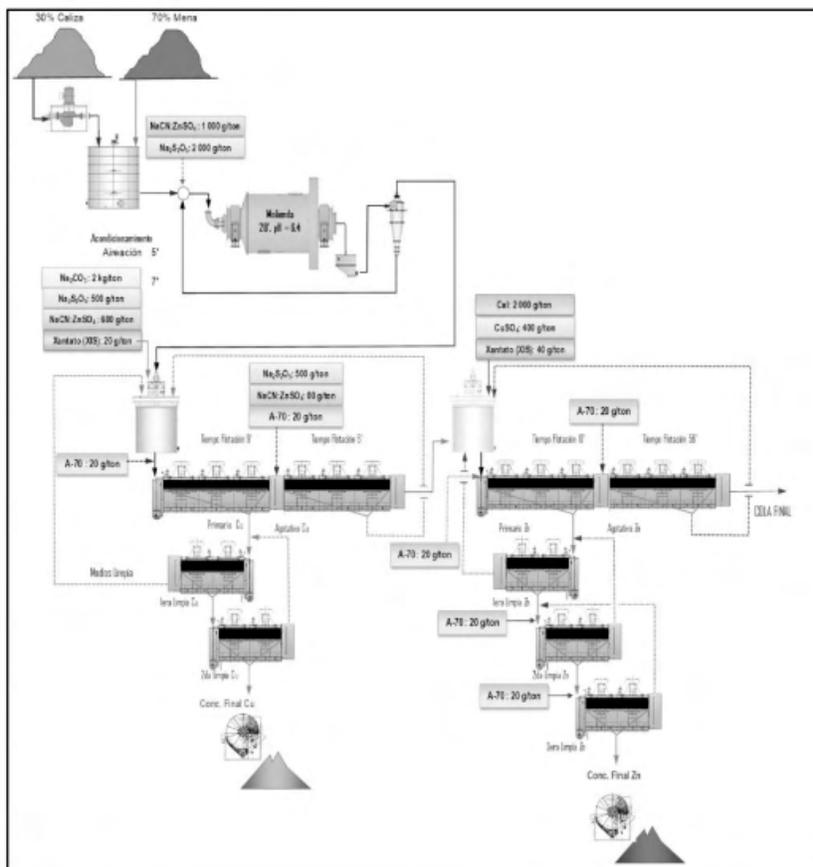


Figure 2. Flow diagram and flotation conditions in plant, Cu-Zn ore associated to high pyrite-pyrrhotite concentrations [6].

4 | RESULTS

Results of the initial tests in which only primary and scavenger concentrates floated are shown in Table 4.

After defining the depressors scheme, we performed an essay at the plant with a grinding set in 80%, less than 200 meshes. Subsequently, an increase in the acidity of the ore during the grinding, forced us to use limestone, therefore we decided to use material from an old tailing dam with a 14-15% content of lime stone. The selected proportions were 30% tailings and a 70% Cu-Zn ore. Table 5 sums up the results at the plant.

Test -1

PRODUCT	Weight (%)	STERLING (g/ Ton)		Essays %			
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Cu Primary	15.09	3.01	185.00	0.25	7.38	4.23	31.81
Cu Scavenger	2.89	1.16	115.00	0.13	2.78	9.17	31.88
Zn Primary	3.93	0.85	44.00	0.09	0.42	39.11	20.84
Zn Scavenger	3.07	0.88	59.00	0.13	0.43	17.01	25.72
Final Tails	75.02	0.60	26.00	0.09	0.14	3.68	26.43
Total	100.00	1.00	54.29	0.12	1.33	5.72	27.16

PRODUCT	Weight (%)	Distribution %					
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Cu Primary	15.09	45.5	51.4	32.4	83.8	11.2	17.7
Cu Scavenger	2.89	3.4	6.1	3.2	6.0	4.6	3.4
Zn Primary	3.93	3.3	3.2	3.0	1.2	26.9	3.0
Zn Scavenger	3.07	2.7	3.3	3.4	1.0	9.1	2.9
Final Tails	75.02	45.1	35.9	57.9	7.9	48.2	73.0
Total	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Test-3

PRODUCT	Weight (%)	STERLING (g/ Ton)		Essays %			
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Cu Primary	10.45	3.92	268.00	0.38	12.20	3.23	32.38
Cu Scavenger	2.24	1.28	67.00	0.18	1.49	7.24	30.29
Zn Primary	2.90	1.40	41.00	0.15	0.53	33.00	21.00
Zn Scavenger	1.74	1.29	49.00	0.19	0.56	9.94	27.44
Final Tails	82.68	0.79	13.00	0.10	0.14	4.50	27.70
Total	100.00	1.15	42.29	0.13	1.45	5.35	28.05

PRODUCT	Weight (%)	Distribution %					
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Cu Primary	10.45	35.5	66.2	29.6	88.0	6.3	12.1
Cu Scavenger	2.24	2.5	3.5	3.0	2.3	3.0	2.4
Zn Primary	2.90	3.5	2.8	3.2	1.1	17.9	2.2
Zn Scavenger	1.74	1.9	2.0	2.5	0.7	3.2	1.7
Final Tails	82.68	56.6	25.4	61.7	8.0	69.6	81.6
Total	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 4. Initial tests results, definition of depressor reagents system.

PRODUCT	Weight (Tonn)	Sterling (g/Ton)		Essays %			
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Essay Head	714.0	0.70	45.00	0.20	1.00	4.25	23.95
Cu Concentrate	24.5	8.46	404.00	0.52	25.00	5.78	27.42
Zn Concentrate	43.1	0.58	32.00	0.08	0.59	54.38	14.75
Final Tails	646.4	0.26	25.00	0.16	0.12	0.85	22.54
	714.0	0.56	38.43	0.17	1.00	4.25	22.24

PRODUCT	Weight (Ton)	Distribution %					
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Fe
Essay Head							
Cu Concentrate	24.5	51.8	36.1	10.7	85.6	4.7	4.2
Zn Concentrate	43.1	6.2	5.0	2.9	3.6	77.2	4.0
Final Tails	646.4	42.0	58.9	86.5	10.8	18.1	91.8
	714.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 5.- Selective flotation results of a Cu-Zn ore; 22.24% iron and an approximate 10.0% as pyrrhotite.

5 | CONCLUSIONS

The Cu-Zn ore from this locality in Sinaloa, given its high content of iron as pyrrhotite (10% Fe) develops high acidity during the grinding process; therefore, it's necessary to add high quantities of lime, 12kg/Ton, in order to avoid the flotation of iron minerals. The depressors scheme, besides the pre-aeration to oxidize the pyrrhotite, includes high doses of sodium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) and $\text{ZnSO}_4:\text{NaCN}$ (3:1) complex. It's convenient to float sphalerite in an alkaline pH of 9.0 in order to ensure an appropriate reactivation, together with the strong depressors to accomplish a good grade and recovery. The industrial flotation showed how easily pyrrhotite is activated; hence, we must consider its removal exploiting its highly magnetic susceptibility.

REFERENCES

- [1] Bulatovic, S. and D. M. Wyslouzil 1995. "Selection and evaluation of diferent depressants systems for flotation of complex sulphide ores." *Minerals Engineering* **8**(1-2): 63-67.
- [2] Bulatovic, S. M. 2007. *Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Oxford: Elsevier Science, Technology Books.
- [3] Crozier, R. D. 1992. *Flotation, Theory, Reagents and Ore testing*. Oxford: Pergamon Press.
- [4] Esponda, D. O. 2018. *Estudio Mineragráfico de una Muestra Enviada por El Ing. Jorge Morales Zacarias, del Departamento de Investigación Metalúrgica Aplicada, del Centro Experimental Oaxaca del Servicio Geológico Mexicano. Oaxaca, Oax, Centro Experimental Oaxaca del Servicio Geológico Mexicano report*.

[5] Pineda, M. T. M. and A. Aragon. 2011. *Técnicas de caracterización aplicadas a la concentración de minerales*. Diplomado de Mineralurgia. U. d. Guanajuato. Guanajuato, Gto.: pág.: 1-30.

[6] Prieto, M. D. 2019. *Reporte de pruebas, flotación selectiva de la mena Cu-Zn, La Concepción*. Sinaloa, Grupo Minero RJL S.A. de C.V. RJL Mining Group report.

[7] Prieto, M. J. y E. R. Elorza. 2013. *Cinética de flotación de la mena de Palmarejo y su aplicación industrial*. Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología. Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Licenciatura: pág.:1 -136.

COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE LIGAS DE AL-SI FUNDIDAS SOB GRAVIDADE, ALTA E BAIXA PRESSÃO

Data de aceite: 01/11/2021

Margarete Sabino de Moura

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas

Josiel Bruno de Oliveira

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/1440636625327539>

Debora Silva Costa

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/2500080101566635>

Roger Hoel Bello

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0479686945106210>

Adalberto Gomes de Miranda

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0031798088948641>

José Costa de Macêdo Neto

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/7868540287547126>

propriedades mecânicas, as ligas de Al-Si são bastante utilizadas na indústria automotiva e aeroespacial. Amatriz da microestrutura do material é um fator decisivo para o alcance das propriedades mecânicas desejadas. Com isso, o processo de fundição influencia de forma decisiva, já que determina o grau de finura e a homogeneidade da microestrutura, assim como a porosidade do material. Foram avaliadas a microestrutura e microdureza de amostras fundidas sob gravidade, alta e baixa pressão através de ensaio metalográfico de acordo com a norma NBR 30284. A microestrutura da liga processada por alta pressão apresentou-se mais refinada que a fundida por baixa pressão, sendo que esta não apresentou porosidade caracterizando continuidade de propriedade mecânica. A dureza da peça fundida sob gravidade e tratada termicamente foi maior dentre as amostras estudadas devido ao silício eutético da sua microestrutura apresentar morfologia esferoidizada no contorno do grão dendrítico.

PALAVRAS-CHAVE: liga Al-Si; fundição; microestrutura; microdureza.

COMPARISON OF THE MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF AL-SI ALLOYS CASTED UNDER GRAVITY, HIGH AND LOW PRESSURE

ABSTRACT: Due to their excellent mechanical properties, Al-Si alloys are widely used in the automotive and aerospace industries. The matrix of the material's microstructure is a decisive factor in achieving the desired mechanical properties. Thus, the casting process has a decisive

RESUMO: Devido às suas excelentes

influence, as it determines the degree of fineness and homogeneity of the microstructure, as well as the porosity of the material. The microstructure and microhardness of samples cast under gravity, high and low pressure were evaluated through metallographic testing according to the NBR 30284 standard. The microstructure of the alloy processed by high pressure was more refined than the cast by low pressure, and this did not show porosity characterizing continuity of mechanical property. The hardness of the casting under gravity and heat treated was higher among the studied samples due to the eutectic silicon of its microstructure presenting a spheroidal morphology like dendrite grain structure.

KEYWORDS: Al-Si alloy; foundry; microstructure; microhardness.

1 | INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento mais abundante na crosta terrestre, da ordem de 8,05% da crosta terrestre sólida (ZANGRANDI, 2008), encontrado na forma de óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), sendo o minério mais importante a bauxita ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), com teor aproximado de óxido de alumínio entre 35 a 45% (ABAL, 2007).

O alumínio possui ponto de fusão de 660°C e densidade de 2,70 g/cm³ quando na pureza de 99,80%. A resistência à corrosão é outra característica importante do alumínio que o faz adquirir maior durabilidade a ambientes agressivos (LIMA, 2011)

Muitos elementos metálicos podem ser combinados com o alumínio para formar as suas ligas, sendo os mais utilizados: cobre, magnésio, manganês, silício e o zinco (MOREIRA, 2011; FURLAN, 2008). Dentre esses elementos, destaca-se o silício que é bastante útil na produção das ligas de alumínio em fundição (LIMA, 2012)

Devido a sua excelente fluidez, as ligas Al-Si proporcionam um ótimo preenchimento de moldes para fundição, permitindo a produção de peças de elevada complexidade dimensional, sendo selecionadas como material ideal à fabricação de rodas de ligas leves (MANENTE & TOMELLI, 2011). As ligas Al-Si são, portanto, excelentes materiais para componentes estruturais da indústria automotiva e aeroespacial pela elevada relação resistência/peso.

A fundição é o processo em que se dá forma geométrica adequada ao metal, vertendo-o no estado fundido dentro de uma cavidade feita no interior de uma moldação (conjunto de elementos em materiais apropriados que definem o molde), para após solidificação se obter a peça moldada (FERREIRA, 1999).

Os processos de fundição realizados neste trabalho foram em molde permanente (coquilha) sob gravidade, alta e baixa pressão, sendo que na amostra fundida por gravidade houve posterior tratamento térmico de precipitação.

Na fundição por gravidade em moldações permanentes o metal líquido é vazado por pressão gravítica num molde metálico, constituído por duas ou mais partes, o qual é usado repetidamente para a produção de peças com a mesma forma. Para definir as cavidades das peças vazadas são usualmente feitos machos simples removíveis em metal,

mas alguns mais complexos são feitos em areia ou cerâmica. (TORRES, 2000).

Na fundição sob pressão o metal líquido é forçado a penetrar na cavidade do molde (coquilha), chamado matriz e assim como na fundição por gravidade a mesma é de natureza permanente podendo ser usada por inúmeras vezes. Devido à pressão e à conseqüente alta velocidade de enchimento da cavidade do molde, o processo possibilita a fabricação de peças de formas bastante complexas e de paredes finas que os processos por gravidades não permitem (BRITO *et. al*, 2010). No processo de fundição por baixa pressão o alumínio toma a forma da cavidade do molde por ação de baixa pressão externa de ar ou nitrogênio da ordem de 0,3 kgf/cm². Neste processo, o alumínio líquido fica armazenado em forno a temperatura da ordem de 750° C, ar externo é introduzido no forno e o alumínio líquido é forçado a tomar a cavidade do molde (MILLER, MAIJER, 2006).

As peças brutas de fusão possuem baixa resistência mecânica devido a sua microestrutura dendrítica grosseira. A sua resistência mecânica poderá ser aumentada por meio de adição de nucleantes, altas taxas de extração de calor e tratamento de solubilização e envelhecimento artificial ou natural, produzindo precipitação de fase intermetálica (BRITO *et. al*, 2010).

As ligas Al-Si-Cu respondem a esse tratamento térmico de solubilização aumentando sua resistência mecânica. Primeiramente, o metal é aquecido uniformemente até cerca de 500 °C, sendo que a temperatura exata depende da liga em particular. Isto ocasiona a dissolução dos elementos de liga na solução sólida (tratamento de solução). Então, segue-se um resfriamento rápido, geralmente em água, que previne temporariamente que estes constituintes se precipitem. Esta condição é instável e, gradualmente, os constituintes precipitam-se de maneira extremamente fina (somente visível através de potentes microscópios), alcançando, assim, o máximo efeito de endurecimento (envelhecimento). Em algumas ligas isto ocorre, espontaneamente, depois de alguns dias (envelhecimento natural), enquanto que em outras ocorre através de reaquecimento por algumas horas a cerca de 175 °C (tratamento de precipitação) (CALLISTER, 2020)

O desenvolvimento das ligas de alumínio com alta resistência térmica também é prioridade no direcionamento estratégico das atividades de pesquisa e desenvolvimento, para que as propriedades do material sejam adequadas à aplicação desejada. A matriz da microestrutura do material é decisiva para o alcance das propriedades mecânicas. Desta forma, por exemplo, o processo de fundição tem um papel decisivo, já que ele determina o grau de finura e a homogeneidade da microestrutura, assim como a porosidade. A microestrutura da liga de alumínio obtida por meio, por exemplo, de fundição por gravidade deve alcançar as propriedades desejadas adicionando elementos de liga e/ou por via tratamento térmicos (SJOLANDER, 2010; SEIFEDDINE *et al.*, 2010; AZEVEDO, 2014; ROMETSCH, *et al.*, 2003). Portanto, objetivo do trabalho foi realizar um estudo a cerca da microestrutura e microdureza de Al-Si fundidas sob diferentes processos.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras para análise microestrutural e de microdureza é o fabricado por ligas de Al-Si. Foram analisadas ligas processadas em coquilha sob gravidade, alta e baixa pressão. A amostra processada sob gravidade foi submetida após a fundição ao tratamento térmico de precipitação.

Para o ensaio metalográfico as amostras foram embutidas, lixadas e polidas, seguindo a norma NBR30284. Foram utilizadas lixas com granulometria de 400, 600, 800, 1000 e 1200. A variedade da granulação é para evitar arranhões permanentes ao fim do lixamento. Durante o processo de lixamento a posição da amostra foi alternada mudando em 90° a cada lixa, evitando a predominância de arranhões em apenas uma direção. Durante este processo houve fluxo constante de água para resfriar a peça. Para o polimento foi utilizado alumina de 1μ , $0,3\mu$ e $0,05\mu$, como elemento polidor. Após ser polida a amostra foi submetida a um ataque químico com nital 2% com 2 ml de HNO₃ e 98 ml de álcool (95% ou absoluto), agindo durante 20 segundos na superfície da amostra. Após a microestrutura passar pelo processo de revelação foi utilizado um microscópio metalúrgico Olympus de modelo BX51M com aumento de 100X até 1000X. As imagens das microestruturas foram analisadas usando o Motican 100 software.

Para o ensaio da microdureza utilizou-se um microdurômetro Mitutoyo modelo HM-100 versão 5.0 com uma carga de 0,5kgf. Três medidas foram realizadas da superfície até o centro da amostra em medidas distantes 1mm.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições da microdureza das amostras estão mostradas na Tabela 1 e também na Figura 1. De acordo com a Tabela 1 e Figura 1 pode-se observar que a dureza das amostras diminuiu desde a superfície até o centro, pois a maior extração de calor na superfície da peça durante a fundição resultou em grãos mais refinados nessa região (Brito *et. al*, 2010)

Amostra	Posição (mm)	Microdureza (HV)	Média (HV)
Fundida sob baixa pressão	1	91,3	87,9
	2	86,4	
	3	86,1	
Fundida sob alta pressão	1	86	84
	2	85,6	
	3	80,4	

Fundida sob gravidade e tratada termicamente	1	100,5	99,23
	2	101,7	
	3	95,5	

Tabela 1. Microdureza das amostras processadas por diferentes fundições.

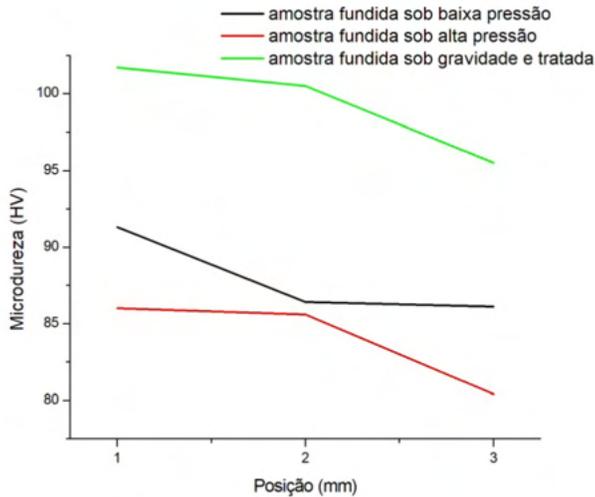


Figura 1. Gráfico das microdurezas das amostras fundidas sob diferentes processos.

As microestruturas das amostras fundidas sob baixa e alta pressão foram semelhantes ao trabalho de NETO *et. al* (2015). Na Figura 2 pode ser visualizada a microestrutura da amostra fundida sob baixa pressão onde a mesma é formada pelos dendritos de α -Al (fase clara) e um eutético binário Al-Si (fase escura) entre os ramos dendríticos.

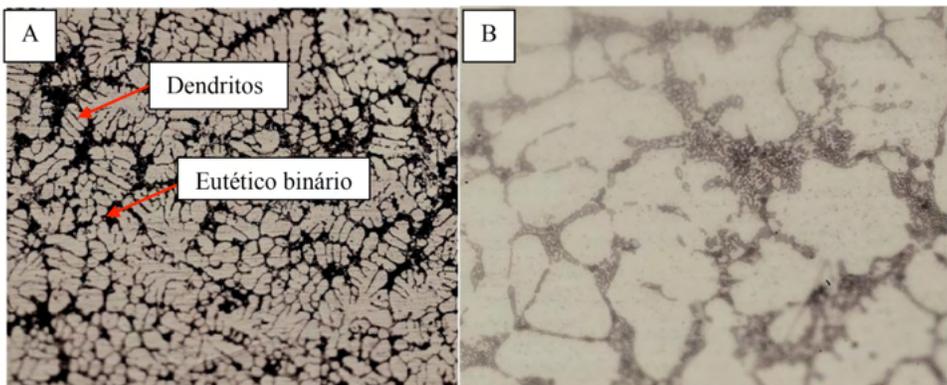


Figura 2. Microestrutura da peça fundida sob baixa pressão com aumentos em: A) 100X e B) 400X.

Na figura 3 estão mostradas as micrografias da amostra fundida sob alta pressão.

Sua microestrutura consiste da fase α -Al (fase clara) possuindo um aspecto mais globular em contraste com a amostra obtida a baixa pressão. Além do eutético (fase escura), há presença de porosidade devido à falha de preenchimento do material ou microrechupe semelhante ao encontrado no trabalho de BRITO *et. al* (2010). Essa falha de preenchimento ocorre durante a solidificação do metal que se inicia pelas partes que estão em contato com as paredes do molde ou na parte superior, onde o metal está exposto ao ar.

Comparando-se a microestrutura da amostra fundida sob baixa e alta pressão constata-se que os grãos da segunda diminuíram. Quanto menor tamanho de grão, maior a área da superfície do grão, maior a densidade de discordância e menor será o movimento das discordâncias, resultando também numa maior resistência mecânica (HILL, 1973). No entanto, há uma contradição, pois pela Tabela 1 a microdureza da amostra sob alta pressão diminuiu em comparação com a fundida sob baixa pressão. De acordo com NETO *et. al* (2015) isso se deve possivelmente às diferentes quantidades dos elementos químicos presentes nas amostras da qual não foi possível determinar neste trabalho.

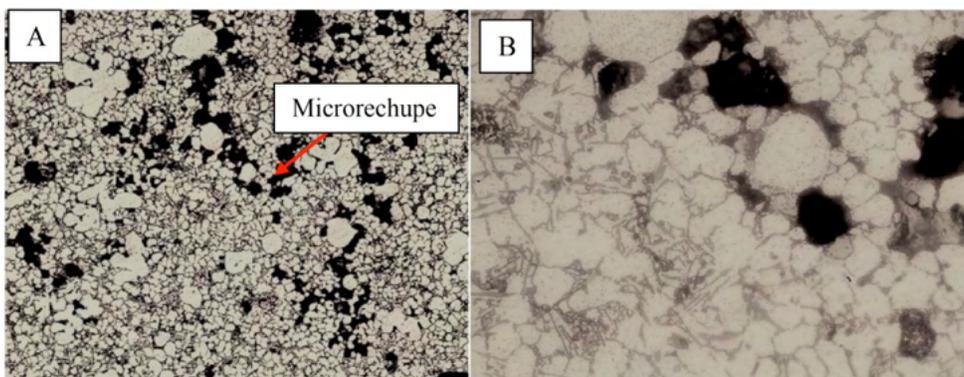


Figura 3. Microestrutura da peça fundida sob alta pressão com aumentos em: A) 100X e B) 400X.

E na Figura 4 está mostrada a micrografia da peça fundida sob gravidade e tratada termicamente. A microestrutura desta amostra foi semelhante à encontrada em LOPES (2008). Em comparação com os outros processos de fundição a microestrutura desta apresentou partículas do silício eutético mais esferoidizadas e menores devido ao coalescimento destas partículas promovidas pelo tratamento térmico T6 e consequente aumento dos dendritos, o que explica o alto valor de microdureza em relação às outras amostras conforme a Tabela 1.

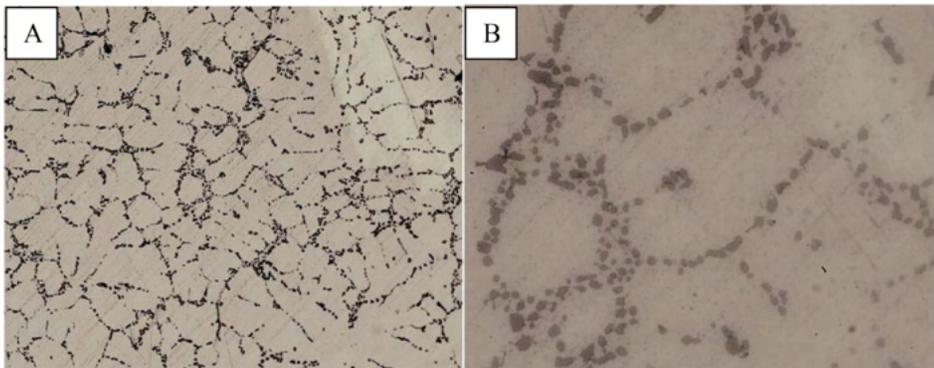


Figura 4. Microestrutura da amostra fundida sob gravidade e tratada termicamente com aumentos em: A) 100X e B) 400X.

4 | CONCLUSÃO

A microdureza para as três amostras sofreu uma redução desde a superfície até o centro da peça. A microestrutura da liga processada por alta pressão apresentou-se mais refinada que a fundida por baixa pressão, no entanto com uma microdureza inferior devido às amostras possuírem composição química diferente. A microestrutura da liga processada por baixa pressão não apresentou porosidade caracterizando continuidade de propriedade mecânica. Já na liga processada por alta pressão surgiram poros que podem ser falhas de preenchimento ou microrechupe, defeitos estes que tendem a diminuir a resistência mecânica. A amostra fundida por gravidade e tratada termicamente apresentou o silício eutético com morfologia esferoidizada no contorno do grão dendrítico e que houve o surgimento do eutético no interior da dendrita, influenciando assim decisivamente na sua alta microdureza sendo a maior dentre as amostras estudadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **ABAL**: Fundamentos e Aplicações do Alumínio. São Paulo: ABAL, 2007. 68 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

AZEVEDO, T. L. F. **Modificação e tratamento térmico T6 na liga Al7Si,3Mg**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2014. 98f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais).

BRITO, R.; QUEIROGA, S.; MACEDO, J. Caracterização Microestrutural e de uma liga de Al-Si processada por fundição sob alta e baixa pressão. In: Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Maceió, 2010. **Anais...**Maceió: IFAL, 2010. Disponível em: <http://www.congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNepi2010/paper/viewFile/1188/706>. Acesso em: 21 jan. 2020.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 10ª ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2020.

FERREIRA, J.M.G. **Tecnologia da Fundição**. 1ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

FURLAN, T. S. **Influência do teor de estrôncio na modificação da liga A356**. São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.

HILL, R. E. R. **Princípios de Metalurgia Física**. 2 ed. Rio de Janeiro 1973. Editora Guanabara Dois, 775 p.

LIMA, A. D. A. **Análise da curva de resfriamento e refino de grão da liga de alumínio AA 356**. 2011, 66p. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

LIMA, N. A. G. **Tratamento térmico de envelhecimento da liga de fundição AlSi10Mg(Fe)**. Porto, 2012. Dissertação de Mestrado - Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

LOPES, C. F. T. **Estudo do tratamento de solubilização da liga de Al- 354.0**. Porto, 2008. Dissertação de Mestrado-Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

MANENTE, A., TOMELLI, G. **Optimizing the Heat Treatment Process of Cast Aluminium Alloys**, Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys, Zaki Ahmad, IntechOpen, DOI: 10.5772/21659, 2011.

MILLER, A.E.; MAIJER, D.M. **Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356**. Materials Science and Engineering, v. 435–436, p. 100–11, 2006.

MOREIRA, P. S. **Efeito da taxa de resfriamento e dos tratamentos térmicos sobre as propriedades mecânicas da liga Al-Si-Mg (A356.0)**. Minas Gerais, 2011. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais-REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2011.

NETOS, J. C. M. et al. **Estudo comparativo da microestrutura e microcureza da liga Al-5%Si0,3%Mg antes e após o tratamento térmico T6**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC), 2015, Fortaleza. Estudo comparativo da microestrutura e microcureza da liga Al-5%Si0,3%Mg antes e após o tratamento térmico T6, 2015. v. 1.

ROMETSCH, P. A.; ZHANG, Y.; KNIGHT, S. **Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al-Si-Cu-Mg cast alloys**. Materials Letters, v.57, p. 4083-4087, 2003.

SJOLANDER, E.; SEIFEDDINE, S. **The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys**. Journal of Materials Processing Technology, v.210, p. 1249-1259, 2010.

TORRES, J. **Manual Prático de Fundição e Elementos de Prevenção da Corrosão**. 1. ed. São Paulo: Hemus, 2004.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas Ligas: Fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. 1ª.ed. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, QUÍMICA E MORFOLÓGICA DAS FIBRAS DE CIPÓ TITICA (*Heteropsisriedeliana Schott*) E POLIPROPILENO RECICLADO, VISANDO A APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Data de aceite: 01/11/2021

Talisson Sousa Oliveira

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0503115851532364>

Josiel Bruno de Oliveira

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/1440636625327539>

Roger Hoel Bello

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0479686945106210>

Adalberto Gomes de Miranda

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0031798088948641>

José Costa de Macêdo Neto

Universidade do Estado do Amazonas
Departamento de Engenharia de Materiais
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/7868540287547126>

RESUMO: A caracterização das fibras de Cipó Titica e Polipropileno reciclado tem por motivação a busca por fontes alternativas para o desenvolvimento de novos materiais, que causam menor impacto na produção, utilização

e disposição final. Os principais pontos dizem a respeito ao meio ambiente, já que as fibras naturais são fontes renováveis, recicláveis e biodegradáveis; à economia, uma vez que as fibras possuem preços muito mais acessíveis quando comparadas as fibras sintéticas. Dessa forma, devido a tantas vantagens, faz-se jus a estudos mais aprofundados utilizando o uso de fibras naturais em substituição às fibras sintéticas como reforço em compósitos. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de tração, identificação dos componentes orgânicos a partir da Espectroscopia na Região de Infravermelho (FTIR), análise dos constituintes químicos, e análise morfológica na superfície das fibras na fratura a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados obtidos demonstraram que as fibras de cipó titica apresentaram valores significativos de lignina, que lhe confere resistência a compressão. Além disso, as mesmas mostraram uma rugosidade superficial e a presença protuberâncias superficiais, que podem auxiliar na ancoragem das fibras na matriz.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras Lignocelulósicas; resistência mecânica; composição química; compósitos.

MECHANICAL CHEMICAL AND
MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION
OF FIBERS OF VINEPOLY
(*Heteropsisriedeliana Schott*) AND
RECYCLED POLYPROPYLENE, AIMING
THE APPLICATION IN POLYMERIC
COMPOSITES

ABSTRACT: The characterization of the fibers of

Cipó Titica and recycled polypropylene is motivated by the search for alternative sources for the development of new materials, which cause less impact on production, use and final disposal. The main points concern the environment, since natural fibers are renewable, recyclable and biodegradable sources; to the economy, since the fibers have much more affordable prices when compared to synthetic fibers. Thus, due to so many advantages, more in-depth studies are carried out using the use of natural fibers to replace synthetic fibers as reinforcement in composites. In this research, tensile tests were carried out, identification of organic components from Infrared Spectroscopy (FTIR), analysis of chemical constituents, and morphological analysis on the surface of fibers in the fracture using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results obtained showed that the titica vine fibers presented significant lignin values, which gives it resistance to compression. Furthermore, they showed a surface roughness and the presence of superficial protuberances, which can help in anchoring the fibers in the matrix.

KEYWORDS: Lignocellulosic fibers; mechanical strength; chemical composition; composites.

1 | INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações da atualidade tem sido com as questões ambientais, o que tem motivado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais provenientes de recursos renováveis e ambientalmente amigáveis.

Além da necessidade de conservação do meio ambiente, as fibras vegetais apresentam uma série de vantagens sobre as fibras de origem sintéticas, que são elas: baixo custo, baixa densidade, resistência específica e módulo elevados, não são abrasivas (portanto não desgastam os equipamentos de processo), não são tóxicas, podem ser facilmente modificadas por agentes químicos, são um material de fonte renovável e sua disponibilidade é praticamente ilimitada (PRASAD, PAVITHRAN e ROHATGI, 1983).

As fibras naturais, também chamadas de fibras lignocelulósicas ou vegetais, morfologicamente são células esclerenquimatosas de forma tipicamente prosenquimatosas, ou seja, de comprimento igual a muitas vezes a largura (JOSEPH, MEDEIROS e CARVALHO, 1999).

As fibras naturais são um recurso renovável por excelência, onde absorvem a mesma quantidade de dióxido de carbono que produzem. Durante seu processamento, geram resíduos essencialmente orgânicos e deixam escórias que podem ser utilizados na geração de energia elétrica e, ao final de seu ciclo de vida, são 100% biodegradáveis (BRITO, AGRWAL e ARAÚJO, 2011; ARAÚJO, 2009;).

O reforço tipo fibra tem despertado grande interesse em aplicações na indústria de diversos setores como automotiva, da construção mecânica, metalúrgica, farmacêutica, naval, aeronáutica, aeroespacial entre outras. Uma vez que a forma fibrosa de um material possui elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade. Assim, este tipo de material vem sendo usado como material de engenharia em combinação com uma matriz que, além de envolver e proteger a fibra deforma sob a ação de uma força e lhe distribui a

tensão, impedindo a propagação de falhas (CARMONA, 2011).

Há uma tendência mundial em buscar recursos naturais alternativos, que sejam ecologicamente corretos, gerando emprego e renda, além de promover o desenvolvimento de novas tecnologias (FERRANTE, 2002).

A constante implementação de melhorias e de otimização do processo produtivo avançou também para o uso de métodos que reduzam o desperdício, melhorem o uso de insumos, o reaproveitamento de resíduos, a reciclagem, a conservação e o aumento da eficiência energética (SANTOS, ANDREOLI e SILVA, 2009).

A obtenção de compósitos reforçados com fibras naturais tem como objetivo o aproveitamento de recursos renováveis na obtenção de novos materiais (ARAÚJO, 2009). A adesão entre esses componentes é tal que as cargas são transferidas para os elementos com maior resistência mecânica, como as fibras que estão geralmente dispersas no componente que atua como matriz (FERRANTE, 2002).

As fibras celulósicas por possuírem baixo custo, baixa densidade, não serem abrasivas, não serem tóxicas, por serem facilmente modificadas por agentes químicos, além de abundantes e provenientes de fontes renováveis tornam seu uso vantajoso como reforço em compósitos (JOSEPH, MEDEIROS e CARVALHO, 1999).

No Brasil, o cipó-titica é uma planta típica da Floresta Amazônica que ocorre em áreas de terra-firme. Trata-se de uma trepadeira que, apesar de iniciar sua vida como plântula terrestre, projeta-se na busca de luz, utilizando, como apoio os troncos e as copas das árvores. Esta planta se alimenta por meio das raízes aéreas que são emitidas em direção ao solo, também conhecidas por raízes alimentares adventícias, e quando atingem o solo são grossas, lenhosas, resistentes e duráveis. Assim, em relação a outras plantas, as raízes do cipó-titica são atrativas para fins econômicos pelo fato de serem fortes e também porque sua epiderme e córtex escuros são facilmente removidos, permitindo a confecção de peças resistentes (PLOWDEN, UHL e OLIVEIRA 2003).

A maior parte de produtos poliméricos comercialmente encontrados hoje são sintéticos, sendo que na maioria das vezes são derivados de fontes não renováveis, como o petróleo. A utilização dessa fonte é explicada pelas suas excelentes propriedades mecânicas e térmicas juntamente com a sua grande versatilidade (CALABRIA, 2010).

Os polímeros sintéticos podem ser considerados como uma inovação tecnológica, devido às propriedades, como: resistência química e mecânica, leveza e por serem utilizados em diversas aplicações como, por exemplo, em embalagens, próteses, peças automotivas, tintas, entre outras. Esses polímeros são encontrados hoje em quase todos os produtos comerciais (ALMEIDA, 2012).

Em termos gerais, esses tipos de polímeros são geralmente hidrocarbonetos, portanto as ligações químicas encontradas apresentam apenas átomos de carbono e hidrogênio, podendo possuir ramificações ou não (linear). Esse tipo de ligação química nos materiais oferece resistência à degradação, pois são mais difíceis de serem quebradas

(CARR, 2012).

Neste trabalho o objetivo principal foi abordar a caracterização mecânica (resistência a tração), química, e morfológica de duas fibras naturais (cipó titica) e uma fibra sintética (polipropileno reciclado), além de fazer uma análise comparativa entre as fibras e avaliar a viabilidade da utilização das fibras naturais em compósitos poliméricos.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

As fibras utilizadas neste trabalho foram o Cipó Titica (*Heteropsisriedeliana* Schott), oriundas dos municípios de Novo Airão-AM e Paritins-AM. A fibra sintética de PP reciclado é um monofilamento ondulado de PP 0,80 que segundo a norma ABNT NBR 12744 é classificada como uma fibra têxtil manufaturada sintética. A mesma é composta de Polipropileno (PP), Polietileno tereftalato (PET) e Polietileno (PE) fabricada pela empresa Duplás, Piracicaba-SP.



Figura 1: Fibras:a) cipó titica de Novo Airão; b) cipó titica de Paritins, e polipropileno reciclado, respectivamente.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração

Para a preparação dos corpos de prova, primeiramente, as fibras foram secas à temperatura ambiente por três meses e seguida foram cortadas com dimensões de 2,0 mm de largura e 120 mm de comprimento. O ensaio de tração seguiu a norma ASTM D 3822-07. Os testes de tração das fibras foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal de ensaios mecânicos (5982, Instron) com célula de carga 1 kN e velocidade de ensaio em 5,0 mm/min em cinco testes de tração em cada fibra. A confecção dos corpos de prova foi baseada na literatura (FONSECA, 2012).

2.2.2 Espectroscopia na região do infravermelho – FTIR

Foi utilizado um equipamento de espectrofotômetro na faixa do infravermelho (IR Affinity - 1S, Shimadzu). As medidas foram efetuadas na faixa de 4000-400 cm^{-1} e resolução nominal de 4 cm^{-1} . Os dados foram obtidos utilizando o software IR solution. A medição do espectro de infravermelho das amostras foi obtida pelo método reflexão total atenuada (ATR) utilizando um acessório (MIRACLE-10, Shimadzu) acoplado ao equipamento.

2.2.3 Análise dos constituintes químicos

As partículas foram submetidas ao método de Van Soest (1963) para a identificação dos teores dos constituintes celulares - Celulose e Lignina, onde as partículas foram filtradas e lavadas.

2.2.4 Morfologia superficial

Para a obtenção das imagens foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (IT500 HR, Jeol, Japão). Para a obtenção das imagens as amostras vindas do ensaio tração foram levadas ao metalizador de alto vácuo (DII-29010SCTR Smartcoater, JEOL) por cinco minutos para tornar a amostra condutora e obter uma melhor imagem no MEV.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios mecânicos, isto é, de tração das fibras estão ilustrados na Tabela 1.

Fonte	Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Autor	Polipropileno reciclado	38,90	1,39	4,50
Autor	Titica (Novo Airão)	12,74	1,66	1,40
Autor	Titica (Parintins)	24,15	2,21	2,50
Faruk et al., (2012)	Sisal	511-635	9,4-22	2,0-2,5
Faruk et al., (2012)	Carauá	500-1150	11,8	3,7-4,3
Faruk et al., (2012)	Juta	393-773	26,5	1,5-1,8
Pereira (2012)	Coco verde	65	NC	10,2

NC: Nada consta.

Tabela 1. Comparação das propriedades obtidas no teste de tração das fibras de polipropileno reciclado, cipó titica e outras fibras vegetais.

Os resultados obtidos de resistência à tração do cipó titica de Novo Airão (12,74) e Parintins (24,15) foram inferiores ao polipropileno reciclado (38,39). Os mesmos também estão abaixo dos valores obtidos por outras fibras vegetais demonstradas na tabela como o sisal, carauá, juta e coco verde, que pode ser explicado pelos teores superiores de celulose contidas nas fibras comparadas. O módulo de elasticidade obtido pelas fibras vegetais também foi inferior ao das demais fibras comparadas. Pelo resultado obtido na deformação das fibras, conclui-se que a fibra de polipropileno reciclado (4,50) apresenta maior ductilidade que fibras vegetais, com uma deformação superior as demais fibras. No entanto nas demais propriedades estudadas, como química e morfológica, o cipó titica obteve resultados satisfatórios para uma possível aplicação em compósitos poliméricos.

As Figuras 1,2 e 3 apresentam as bandas espectrais de infravermelho das fibras de Cipó Titica (Novo Airão e Parintins) e Polipropileno reciclado.

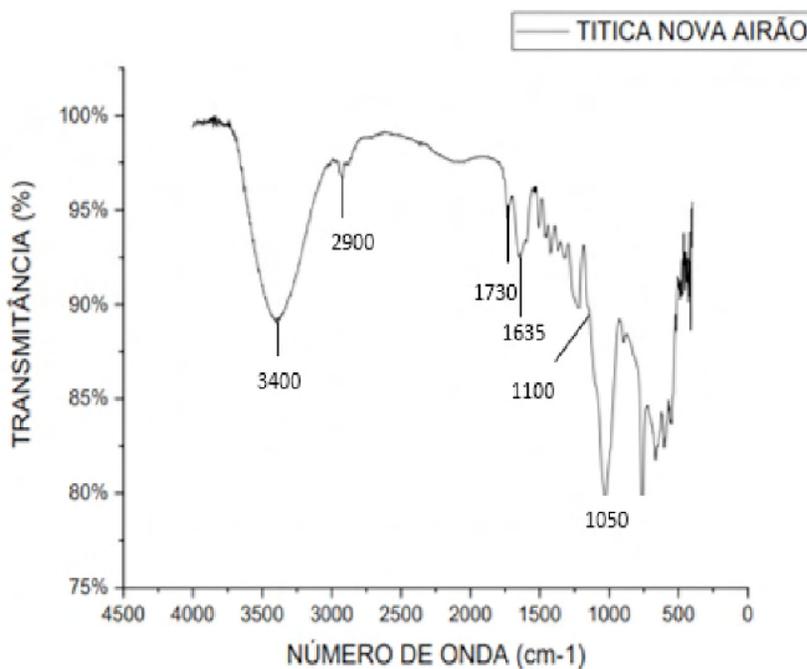


Figura 1 – Infravermelho da fibra de Cipó Titica (Novo Airão).

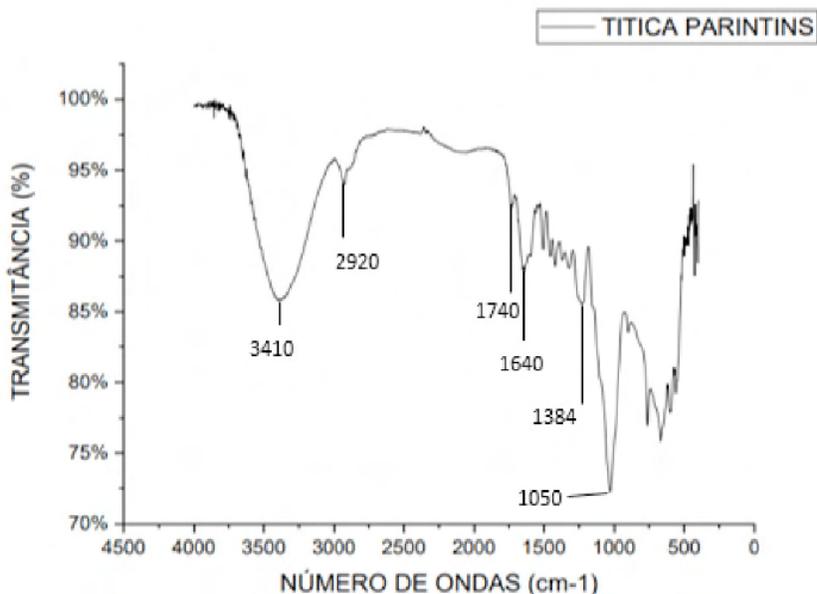


Figura 2 – Infravermelho da fibra de Cipó Titica (Parintins).

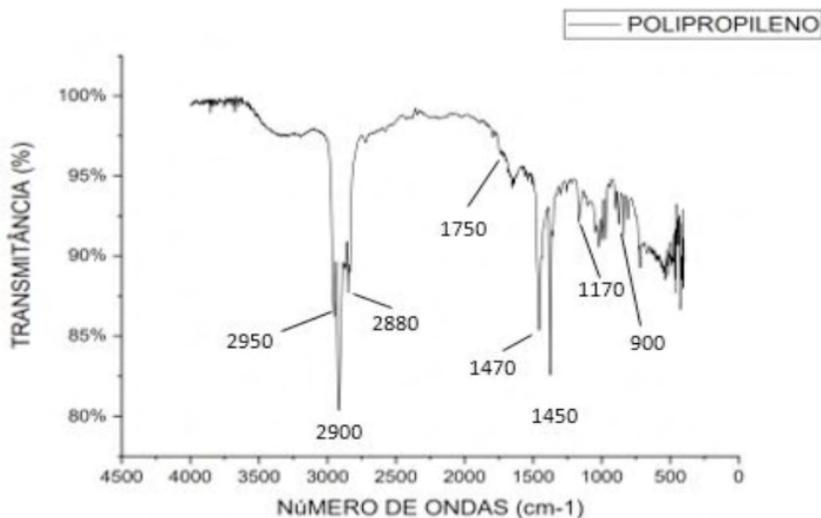


Figura 3 – Infravermelho da fibra de Polipropileno reciclado.

Com os valores da Espectroscopia na Região do Infravermelho-FTIR, obteve-se valores de espectros nas fibras a partir das bandas como 3400 cm^{-1} da fibra de Cipó Titica (Novo Airão), 3410 cm^{-1} da fibra de Cipó Titica (Parintins), referente ao estiramento vibracional dos grupos OH presentes na celulose. As bandas de 2900 cm^{-1} e 2920 cm^{-1} das fibras naturais estão relacionadas ao estiramento C-H alifático dos grupos metila (CH_3) e

metileno (CH_2), respectivamente. Observa-se que os valores $1635,1640 \text{ cm}^{-1}$ refere-se ao estiramento dos grupos carbonílicos ($\text{C}=\text{O}$) presentes na lignina. Já as bandas 1383 cm^{-1} , 1384 cm^{-1} estão relacionadas ao estiramento do grupo álcool $\text{C}-\text{OH}$ da celulose presente nas fibras vegetais. As bandas em 1100 cm^{-1} da vibração de $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ e $\text{C}-\text{OH}$ a $1060 - 1050 \text{ cm}^{-1}$ são referentes à cadeia da celulose surgem de componentes polissacarídeos. Esses resultados são semelhantes às fibras vegetais já conhecidas (TOMCZAK, 2010).

No Polipropileno reciclado os valores de espectros obtidos foram $2950, 2900 \text{ cm}^{-1}$, que estão relacionadas ao estiramento $\text{C}-\text{H}$ alifático dos grupos metila (CH_3) e metileno (CH_2), respectivamente presentes no polipropileno e polietileno; 2880 cm^{-1} estão relacionados ao grupo CH (carbono terciário) presente no polipropileno; 1750 cm^{-1} estão relacionados aos grupos carbonílicos ($\text{C}=\text{O}$) presentes nos ésteres do PET; 1470 cm^{-1} e 1450 cm^{-1} ao CH_2 presente no PET; 1170 cm^{-1} ao $\text{C}-\text{O}$ do éster alifático do PET. E finalmente a 900 cm^{-1} ao anel aromático presente no PET (TOMCZAK, 2010).

Na Tabela 2 encontram-se as composições químicas das fibras submetidas ao método de Van Soest para a identificação dos teores dos constituintes celulares.

Fonte	Fibra	Lignina (%)	Celulose (%)
Autor	Titica (<i>Heteropsisriedeliana</i> Schott) Novo Airão-Am.	NC	NC
Autor	Titica (<i>Heteropsisriedeliana</i> Schott) Parintins-Am.	28,63	49,96
Caetano et. al (2018)	Juta (<i>Corchoruscapsularis</i>)	6	89,57
Caetano et. al (2018)	Periquiteira (<i>Cochlospermumorinocense</i>)	12,03	60,15
Caetano et. al (2018)	Piaçava (<i>Attaleafunifera</i>)	53,47	34,65
Mesquita (2013)	Açaí (<i>Euterpe oleraceae</i> Mart)	30,35	46,51
Fonseca et.al (2013)	Jacitara (<i>Desmoncus polyacanthos</i> Mart.)	14,20	66,10
Faruk et. al (2012)	Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	9,90	65
Faruk et. al (2012)	Carauá	7,50	73,60
Dias et. al (2017)	Piaçava (<i>Leopoldiniapissaba</i>)	60,16	26,05

NC: Nada consta.

Tabela 2. Dados experimentais da composição química das fibras de cipó titica (*Heteropsisriedeliana* Schott) de Novo Airão e Parintins e dados comparativos de algumas fibras vegetais.

É amplamente conceituado que os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como a celulose, a hemicelulose e a lignina, com menores proporções de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. A composição química da fibra varia ligeiramente de acordo com a região extraída (caule, fruto ou folha), da região de cultivo, do tipo de solo e das condições climáticas

(MESQUITA, 2013).

A composição química de fibras lignocelulósicas influencia suas propriedades mecânicas e estrutura física, sendo que o conteúdo de lignina e hemicelulose presente em fibras têm efeito sobre a resistência à tração [15,29]. A resistência a tração e a rigidez das fibras dependem também do conteúdo de celulose e do ângulo da espiral de microfibrilas da parede celular secundária interna faz em relação ao eixo da fibra (BISANDRA & ANSELL, 1992).

Em um estudo feito por Fonseca et al.,(2013), concluiu-se que as propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas da fibra de jacitara são positivas para seu futuro desenvolvimento tecnológico e aproveitamento como reforço em compósitos. Os autores afirmaram que o elevado teor de celulose pode contribuir para a resistência à tração das fibras e que as microfibrilas de celulose (estrutura da parede celular da planta) da jacitara exercem grande influência sobre as propriedades físicas e mecânicas da mesma. Além disso, a lignina confere resistência à compressão e rigidez à parede celular (HORTAL, 2007).

Neste trabalho verificou-se que o teor de celulose na fibra do cipó titica é 49,96% e lignina 28,63%. Dessa forma comparando os resultados com de outros trabalhos efetuados sobre fibras lignocelulósicas, sua resistência à tração é baixa, mas a mesma poderá apresentar boa resistência e grande proteção ao esforço compressivo em compósitos poliméricos devido a ao percentual razoável de lignina. Dessa forma tais valores são relevantes, e sua aplicabilidade como reforço em compósitos é satisfatório.

As Figuras 4 (a-c) são da microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtidas da superfície de fratura das fibras de cipó titica (Novo Airão e Parintins) e do polipropileno reciclado após o ensaio de tração. De acordo com as Figuras 4(a-c), as fibras de cipó titica (Novo Airão e Parintins) apresentaram uma rugosidade superficial, o que pode auxiliar a ancoragem das fibras na matriz. Também é possível notar as diversas microfibrilas que compõe a fibra e que se encontram aglomeradas pelas lamelas intercelulares (lamela média) e, também, suas lacunas (cavidades) (PEREIRA, 2012).

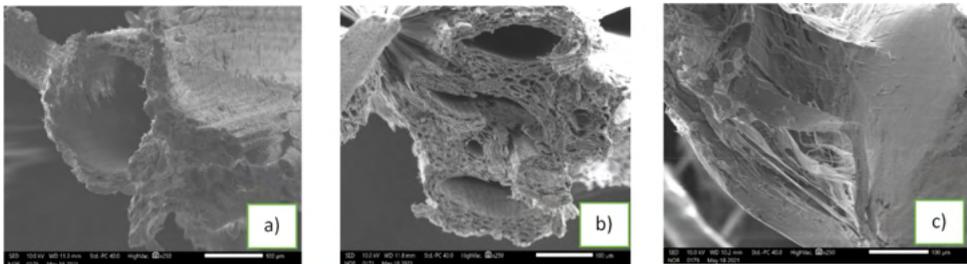


Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura da superfície da fibra na fratura, a) Cipó titica (Novo Airão), b) Cipó titica (Parintins), c) Polipropileno reciclado.

Savastano Junior et al. (2000), ao pesquisar compósitos reforçados com fibra de coco maduro, relatou a existência de protuberâncias superficiais, que provavelmente auxiliam a ancoragem da fibra nas matrizes reforçadas. Essas mesmas protuberâncias podem ser observadas nas fibras de cipó titica aqui estudadas. É possível observar a presença do lúmen, da parede celular e da interface das microfibrilas, formações típicas das fibras lignocelulósicas. O lúmen é um pequeno orifício de formato circular, responsável pelo transporte de água e nutrientes na planta [8]. Na fibra de polipropileno reciclado é possível verificar que após o ensaio de tração fica nítida a ductilidade (deformação mais elevada que as demais fibras comparadas) da mesma, pelos feixes fibrosos bem alongados até a ruptura.

4 | CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos das análises feitas nas duas fibras lignocelulósicas e na fibra de polipropileno reciclado, pode-se concluir que as fibras vegetais confirmam-se como potenciais reforços em compósitos poliméricos. Quando observado o ensaio de tração (12,74 e 24,15) as mesmas apresentaram resultados (resistência à tração) relativamente reduzidos, que pode estar relacionado ao teor inferior de celulose em relação as demais fibras comparadas. Entretanto as fibras de cipó titica apresentaram valores de lignina bem maiores que as outras fibras (sisal, carauá, jacitara), que confere uma boa resistência a compressão, ótima propriedade quando pensamos em reforçadores de compósitos poliméricos. Com relação a Espectroscopia na Região de Infravermelho, obteve-se as bandas características de cada componente orgânico. Quanto a morfologia na fratura, as fibras de cipó titica apresentaram uma rugosidade superficial e protuberâncias superficiais, que podem auxiliar na ancoragem das fibras na matriz.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12744**: Fibras têxteis: Classificação. Rio de Janeiro: 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3822 – 07**. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fiber, 2007.

ALMEIDA, L. L. de. **Síntese e propriedades do copolímero anfílico poli(3- hidroxibutirato)-Bloco-poli(óxido de Etileno) e preparação de nanopartículas**. 2012, 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

ARAÚJO, J. R. **Compósitos de Polietileno de Alta Densidade reforçados com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas Instituto de Química, Campinas, 2009.

BARBOSA A. DE P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes – RJ Dez, 2011.

BISANDRA, E. T. N.; ANSELL, M. P. **Properties of sisal-CNSL composites**. Journal of Material Science, New York, v. 27, p. 1690-1700, 1992.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, E. M.; ARAÚJO, T. A. J. **Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes**. Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande. REMAP – Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.6.2, p. 127- 139, 2011.

CAETANO N.M. et al., **Fibras vegetais branqueadas para aplicações em reforços de materiais compósitos poliméricos**. In: 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018, Foz do Iguaçu - PR. Fibras vegetais branqueadas para aplicações em reforços de materiais compósitos poliméricos, 2018.

CALABRIA, L. **Blendas de biopolímeros para liberação controlada de agroquímicos**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2010.

CARMONA, V. B. **Desenvolvimento de compósitos bidegradáveis a partir de amido termoplástico e fibras vegetais**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São paulo, p.22. 2011.

CARR, L. G. **Desenvolvimento de embalagens biodegradável tipo espuma a partir de fécula de mandioca**. 2007. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHAND, N. TIWARY, R. K., ROGHATI, P. K. **Resource structure properties of natural cellulosic fibres**. Journal of Materials Science, v.23, p. 381-387, 1988.

DIAS W.S. et al., **Caracterização Termoquímica da fibra de Piaçava para uso em compósitos poliméricos**. In: 14º Congresso Brasileiro de Polímeros – Águas de Lindóia, SP, 2017. Caracterização Termoquímica da fibra de Piaçava para uso em compósitos poliméricos, 2017.

FARUK, O. et al. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010**. Progress in Polymer Science, London, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2ª Ed. São Carlos. 2002.

FONSECA, A. S. **Caracterização tecnológica das fibras do estipe de *Desmoncuspolyacanthos Mart***. Dissertação (mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais, 2012.

FONSECA, A.S. et al. **Properties of na Amazonian vegetable fiber as a potencial reinforcing material. Industrail Crops and products**. V.47, p 43 – 50, 2013.

HORTAL, J. A. G. **Fibras papeleras**. Barcelona UPC, 243p, 2007.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E.S.; CARVALHO, L.H. **Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal**, Polímeros: Ciência e Tecnologia, v 9 n 4, 136-141p. 1999.

MEDINA, J. C. **Plantas Fibrosas da Flora Mundial**. Instituto Agronômico de Campinas, p. 787-792, 1959.

MESQUITA, A. L. **Estudos dos processos de extração e caracterização de fibras do fruto do açai (*Euterpe oleracea* MART.) da Amazônia para a produção de ecopainel de partículas de média densidade (MDP)**. Dissertação (Faculdade de Engenharia Química – Instituto de Tecnologia). Universidade Federal do Pará, Pará, 2013.

PEREIRA, L.C. **Aproveitamento do resíduo do coco verde para produção de compósitos destinados a construção rural**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. 137 f. Pirassununga, 2012.

PLOWDEN C.; UHL, C.; OLIVEIRA, F. A. **The ecology and harvest potential of titica vine roots (*Heteropsis flexuosa*: Araceae) in the eastern Brazilian Amazon**. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 182, n. 1-3, p. 59–73, 2003.

PRASAD, S. V.; PAVITHRAN, C.; ROHATGI, P. K. **Alkali treatment of coir fibres for coir-polyester composites**. Journal of Materials Science, v.18, p.1443-1454, 1983.

ROWELL, R. **Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities**. In: LEÃO, A.; CARVALHO, F. X.; FROLINI, E. (Eds.). Lignocellulosic: Plastic Composites São Paulo: USP, UNESP, p. 23-25. 1997.

SANTOS, S.E.; ANDREOLI, C.V.; SILVA, C.L. **O desempenho ambiental das empresas do setor automotivo na região metropolitana de Curitiba. Planejamento e Políticas públicas**, v.32, p.149-172, 2009

SAVASTANO JUNIOR, H., WARDEN, P. G.; COUTTS, R.S.P. **Brazilian waste fibre as reinforcement for cement based composites**. Cement and Concrete Composites, v. 22, p. 379-384, 2000.

TOMCZAK, Fabio. **Estudo Sobre A Estrutura e Propriedades de fibra de Coco e Curauá do Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

VAN SOEST, P.J. **Use of detergents in the analysis of fibrous foods. II. A rapid method for the determination of fibre and lignin**. Journal of the Association of the Official Analytical Chemists, v.46, p.829-835, 1963.

SOBRE O ORGANIZADOR

MICHAEL JOSÉ BATISTA DOS SANTOS - Entusiasta da mineração desde a adolescência, recebeu o título de bacharel em engenharia de minas pela Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), com graduação sanduíche pelo programa ciências sem fronteiras, estudante de Engenharia de Minas pela Universidade de Adelaide (The University of Adelaide) por 18 meses na Austrália. Realizou estágios em mineradoras multinacionais durante a graduação nas áreas de operação, planejamento estratégico e geotecnia de mina. Tornou-se palestrante Internacional no 24º congresso mundial da mineral em 2016 onde palestrou em inglês sobre simulação (carregamento e transporte) e produtividade de mina. Concluiu especialização em segurança do trabalho pela Universidade Cruzeiro do Sul no mesmo ano que defendeu o mestrado em engenharia com área de concentração em tecnologia mineral, ambiental e metalurgia extrativa pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2019). Neste mesmo programa de pós-graduação, deu início em seus estudos de doutorado (UFRGS) no ano de 2020. Durante a pandemia de COVID-19 tem se dedicado ao ensino online, à publicação relevantes relacionadas a lavra mineral, segurança e geotecnia de mina, além de desenvolver projetos de pesquisa em planejamento minerário e trabalho extensionista de ensino da língua inglesa aplicada ao conhecimento técnico em mineração, projeto de extensão vencedor do 2º lugar do prêmio de comunicação dos sindicatos das indústrias minerais do Pará (SIMINERAL) na categoria conteúdos para redes sociais, desenvolvido em seu canal “Prof. Michael Will Santos” na plataforma YouTube, em dezembro de 2020. Atualmente é professor efetivo de magistério superior em engenharia de minas pela Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) onde atua ativamente na função de coordenador do curso de bacharelado em engenharia de minas da instituição, além de compor o conselho do Campus Regional de Juruti.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise microestrutural 38

Avaliação de estabilidade 1

B

Biopolímeros 53

C

Carajás 1, 2, 7, 12, 13

Cipó titica 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52

E

Engenharia de Materiais 35, 42, 43, 53

Engenharia de Minas 14, 25, 55

Engenharia geotécnica 1

Engenharia Química 54

F

Fator de segurança 2, 3, 4, 5, 10, 11

Fibras Lignocelulósicas 43, 44, 51, 52

Fibras sintéticas 43

Fundição 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42

G

Geologia de engenharia 12

Geotecnia 55

H

Heteropsisriedeliana Schott 43, 46, 50

L

Lavra 2, 10, 14, 15, 18, 21, 25, 26, 55

Lignina 43, 47, 50, 51, 52

M

Magnetic susceptibility 27, 33

Materiais 4, 16, 35, 36, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 53

Meio ambiente 12, 43, 44
Metalurgia extrativa 55
Mineração 1, 3, 11, 12, 15, 19, 55

N

NBR 13029 12
NBR 30284 35, 36

P

Pilha de disposição de estéril 1, 2, 3, 6, 7
Polímeros Verdes 53
Poropressão 5, 9, 10, 11
Prevenção da corrosão 42
Propriedades mecânicas 35, 37, 42, 45, 51
Pyrite-Pyrrhotite 27, 29, 31

R

Reaproveitamento de resíduos 45
Recursos naturais alternativos 45

S

Selective flotation 27, 33

T

Teoria do equilíbrio limite 4
Tratamento térmico de precipitação 36, 38

W

Waste dumps 12

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS

- 
- 🌐 www.atenaeditora.com.br
 - ✉ contato@atenaeditora.com.br
 - 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 - 📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br