



II CONPESQ

Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação

Os novos rumos da ciência pós-pandemia

12 a 16 de abril de 2021 Universidade Federal do Cariri - UFCA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEDRA CARIRI EM AMOSTRAS DE GESSO TIPO β : CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, ESTRUTURAL E MECÂNICA DOS MATERIAIS

Marcela Cristine de Alencar Lira¹

Universidade Federal do Cariri
Centro de Ciência e Tecnologia
Engenharia de Materiais
marcela.alencar@aluno.ufca.edu.br

Maria Isabel Brasileiro²

Universidade Federal do Cariri
Centro de Ciência e Tecnologia
Engenharia de Materiais
isabel.rodrigues@ufca.edu.br

Laédna Souto Neiva³

Universidade Federal do Cariri
Centro de Ciência e Tecnologia
Engenharia de Materiais
laedna.neiva@ufca.edu.br

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de incorporação de resíduos de Pedra Cariri (RPC) em amostras de gesso. As amostras de gesso investigadas neste trabalho foram fornecidas por uma indústria localizada no município de Trindade – PE, e as amostras de RPC foram coletadas em uma mineração pertencente ao município de Nova Olinda - CE. Os materiais de estudo (gesso e RPC) foram beneficiados e posteriormente avaliados por meio de técnicas de caracterizações estruturais e químicas, sendo elas: difração de raios-X, fluorescência de Raios-X, análise termogravimétrica. Posteriormente foram confeccionados corpos de prova à base de gesso incorporados com resíduos de Pedra Cariri de dois diferentes tipos: amarela (RPCA) e cinza (RPCC). As proporções de incorporação utilizadas foram: 1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% em peso, para avaliação da propriedade mecânica de resistência à compressão. Os resultados obtidos se mostraram compatíveis com os previstos na literatura, afirmando assim a viabilidade da utilização dos materiais em atividades industriais devido aos seus elevados teores de pureza (gesso = 98,81%; RPCA = 91,27%; RPCC = 91,33%), evidenciando a qualidade compatível com a requerida pela indústria para a confecção de insumos para a construção

1 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.

2 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.

3 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.

civil. Foi constatado através dos resultados do ensaio de compressão que o percentual máximo de RPC como carga de incorporação para o gesso destinado à construção civil é de 5%, de modo que o aumento da carga de dopagem acima deste teor implica diretamente em uma fragilização gradativa da estrutura do material.

PALAVRAS-CHAVE: Gesso; Pedra Cariri; Sustentabilidade; Caracterização mecânica; Construção civil.

ABSTRACT: The present work aims to evaluate the capability of incorporation of Pedra Cariri (RPC) residues in plaster samples. The plaster samples investigated in this work were supplied by an industry located in the municipality of Trindade - PE, and the RPC samples were collected in a mining belonging to the municipality of Nova Olinda - CE. The study materials (plaster and RPC) were benefited and later evaluated using structural and chemical characterization techniques, namely: X-ray diffraction, X-ray fluorescence, thermogravimetric analysis. Subsequently, plaster-based specimens incorporated with Pedra Cariri residues of two different types were made: yellow (RPCA) and gray (RPCC). The incorporation proportions used were: 1%, 3%, 5%, 7%, 9% and 12% by weight, to evaluate the mechanical property of compressive strength. The results obtained were compatible with those predicted in the literature, thus affirming the feasibility of using the materials in industrial activities due to their high purity levels (plaster = 98.81%; RPCA = 91.27%; RPCC = 91.33%), showing the quality compatible with that required by the industry for the manufacture of inputs for civil construction. It was found through the results of the compression test that the maximum percentage of RPC as incorporation load for plaster for civil construction is 5%, so that the increase in the doping load above this content directly implies a gradual weakening of the material structure.

KEYWORDS: Plaster; Pedra Cariri; Sustainability; Mechanical characterization; Construction.

1 INTRODUÇÃO

O gesso em sua forma natural é um material constituído de sulfato de cálcio hemiidratado, que apresenta fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$, sendo um produto obtido através do processo industrial de calcinação sob condições controladas do mineral de Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Suas principais aplicações decorrem da capacidade que este produto apresenta de recuperar rapidamente sua água de cristalização através de uma reação exotérmica de reidratação, adquirindo assim consistência mecânica. Segundo Sobrinho et al., “O gesso encontra a sua maior aplicação na construção civil, embora também seja muito utilizado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos, em moldes artísticos, ortopédicos e dentários, etc.” (SOBRINHO et al, 2011, p.387). As propriedades dos produtos da calcinação da gipsita estão intimamente relacionadas a origem do mineral, podendo esta apresentar-se em variedades mineralógicas distintas. A fabricação de cada uma dessas variedades de gesso requer condições específicas em relação ao tipo de gipsita, para além do tipo de forno, das condições de calcinação e do tratamento posterior (BALTAR et. al., 2004).

A relevância desta pesquisa pode ser afirmada através da necessidade de contribuição acadêmica no tocante a produção científica que contemple estudos sobre a utilização do hemihidrato de sulfato de Cálcio dopado com resíduos sólidos, como a Pedra Cariri, devido à

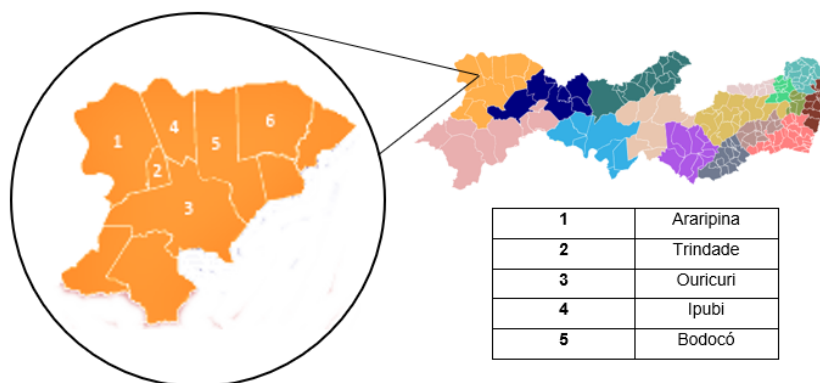
grande escassez de trabalhos nesta área, tornando evidente fatores como contribuição socioambiental e relevância econômica que podem ser obtidos através da possibilidade de implementação da proposta.

Alinhado a este contexto, o objetivo geral deste trabalho é investigar a capacidade de incorporação de resíduos da Pedra Cariri, utilizado como carga de incorporação, em corpos de prova a base gesso, avaliando a influência exercida pelas partículas do resíduo sobre as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova a base de gesso, de modo a estabelecer uma aplicação industrial rentável e viável para o material rochoso que seria descartado na natureza.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O Brasil conta com a maior reserva mundial de gipsita da ordem de 1,3 bilhões de toneladas, sendo que as principais jazidas em exploração se encontram na bacia sedimentar do Araripe/PE (figura 01), região que ficou conhecida como Polo Gesseiro do Araripe devido à grande atividade industrial voltada para a extração de gipsita e produção de gesso. (SOARES, 2005). Em 2017, o polo gesseiro do Araripe foi responsável por 79,7% de toda a produção nacional, o equivalente a 1.673.000 t. (FILHO, NETO & DANTAS, 2018). “O minério gipsífero da região é classificado como de excelente qualidade industrial, devido a uma consistente concentração de sulfatos, da ordem de 95% de pureza [...]” (OLIVEIRA et al., 2012, p.73).

Figura 1 - Microrregião do Araripe no estado do Pernambuco e municípios componentes do Polo gesseiro



Fonte: IBGE (Adaptado).

Apesar da grande abundância do minério de gipsita na região, suas propriedades não são devidamente exploradas, por vezes limitando seu emprego exclusivamente a construção civil e

para fins agrícolas. Por outro lado, verifica-se que uma matéria-prima com elevado teor de pureza e baixo custo, como o sulfato de cálcio hemiidratado produzido na região do Araripe, apresenta um grande potencial que deve ser avaliado visando o desenvolvimento de materiais e produtos mais nobres.

A Pedra Cariri, segundo objeto de estudo deste projeto, consiste em um Calcário sedimentar advindo da Bacia Sedimentar do Cariri, situada no sul do Estado cearense. Esse minério é formado essencialmente de carbonato de cálcio, é largamente utilizado na indústria de rochas ornamentais em formas de lajotas utilizadas principalmente em pisos, enquanto que o calcário considerado de maior cristalinidade proveniente dos municípios de Altaneira e Farias Brito (Sul Cearense), são empregados majoritariamente na indústria da cal.

A atividade mineira nos calcários da região de Nova Olinda e Santana do Cariri vem proporcionando, assoreamento de riachos, alteração do pH das águas e do aumento de zonas de erosão. Esse fato suscita certa urgência em medidas de preservação como a criação de parques temáticos, incrementando a economia regional com atividades eco turísticas (SILVA, 2008 apud LIMA, 2018, p.14).

Desta forma, considerando que a execução de toda e qualquer atividade extrativista causa impactos diversos ao meio ambiente, e, considerando o ritmo acelerado de consumo dos recursos naturais que outrora foram abundantes na terra, torna-se inadiável a mobilização de esforços no sentido de desenvolver novas tecnologias de obtenção de matérias-primas para a indústria, bem como de aplicações alternativas de seus produtos visando mitigar os impactos ambientais gerados por atividades extrativistas.

Segundo Luz e Lins (2008), com o aumento das populações, cada dia se necessita de maior quantidade de minerais para atender as crescentes necessidades do mundo globalizado, existindo assim uma estreita relação entre o padrão de vida de um país e seu consumo per capita de minerais. Esta relação culmina na busca constante pelo desenvolvimento de novas tecnologias que visam atender as demandas da civilização moderna tornando cada vez mais evidente a importância dos minerais para a humanidade, sendo estes, a fonte majoritária de matéria-prima necessária para a garantia da promoção de novos materiais, bem como da manutenção e aperfeiçoamento dos já existentes.

Seguindo este raciocínio buscou-se estudar e desenvolver meios alternativos de utilização dos materiais de estudo deste trabalho a partir da investigação de problemáticas ambientais, como por exemplo, a que consiste na estimativa de que 70% do minério de Pedra Cariri seja desperdiçado durante a sua extração em virtude da forma como as atividades de lavra são executadas. (LIMA, 2018) A lavra da Pedra Cariri é desenvolvida de forma aleatória,

resultando em um plano de aproveitamento com baixas taxas de recuperação, sendo a mesma desenvolvida em sua grande maioria, com métodos rudimentares. (CORREIA, 2005)

3 METODOLOGIA

A amostra de gesso β utilizada é procedente de uma mineração que integra o polo gesseiro do Araripe. O gesso foi obtido após o processamento da gipsita tipo Rapadura sob temperaturas na faixa entre 140 e 160°C, para formação do hemihidrato β . O processo de calcinação ocorreu em forno do tipo batelada sob pressão atmosférica, modelo esse que não exige alto rigor do controle das variáveis envolvidas no processo de calcinação. Após a coleta do material na indústria, este foi submetido à peneiramento em malha #200 mesh e armazenado em local seco devido ao seu caráter higroscópico.

Os resíduos de Pedra Cariri utilizados neste estudo foram coletados em uma mineração pertencente ao município de Nova Olinda - CE. O material foi coletado em seu estado bruto, na forma de lascas, sendo beneficiado posteriormente por meio dos seguintes procedimentos: britagem, moagem em moinho do tipo martelo e, peneiramento em malha de 2 milímetros. O beneficiamento dos resíduos de Pedra Cariri foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos pertencente ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri.

Visando maior compreensão e organização dos dados ao longo da etapa de caracterização físico-química, as amostras foram classificadas e serão abordadas da seguinte maneira:

Tabela 1 – Nomenclatura dos materiais a serem utilizados no trabalho

Material	Nomenclatura
Gesso comum	GC
Resíduo Pedra Cariri Amarela	RPA
Resíduo Pedra Cariri Cinza	RPC

Fonte: Os autores.

3.1 CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

A medida de fluorescência de raios X foi realizada buscando a identificação qualitativa e semiquantitativa das composições químicas em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, da marca Shimadzu, modelo EDX 7000/8000.

A análise de difração de Raios-X foi aplicada visando identificar as fases presentes nos materiais, bem como avaliar a pureza destes. A medida foi realizada em difratômetro da marca

Shimadzu, modelo XRD 7000, o qual é equipado com os seguintes parâmetros: alvo de cobre; voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. A identificação das fases foi realizada através do Software X'Pert HighScore Plus da Malvern Panalytical e o banco de dados ICDD (International Centre for Diffraction Data).

A avaliação de perda de massa das amostras em função da temperatura foi realizada através da técnica de termogravimetria utilizando um analisador térmico da marca Shimadzu, modelo TGAA-50/50H, utilizando os seguintes parâmetros: atmosfera dinâmica de ar, 50 mL.min⁻¹ e taxa de aquecimento de 15°C.min.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

O hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) quando em contato com água gera o dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A reação de hidratação do gesso sofre interferência de diversos fatores, entre eles: a relação água/gesso (a/g); a energia de mistura do gesso com a água; a temperatura da água de amassamento; a umidade relativa do ar no ambiente de trabalho; a presença de impurezas e pontos de nucleação; e ainda a presença de aditivos. (PADEVET, TESAREK & PLACY, 2011)

Devido às limitações instrumentais não foi possível realizar o ensaio de consistência da pasta segundo a norma ABNT NBR 12128 (Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta), procedimento que determina a relação de água/gesso ideal, na qual se obtém uma fluidez da pasta de gesso adequada para manipulação. Entretanto, a relação água/gesso de 0,5, utilizada neste trabalho, foi determinada com base nos resultados obtidos em análises presentes na literatura, sendo este, um valor utilizado para confecção de corpos de prova à base de gesso empregado na construção civil, como analisado por NOGUEIRA (2012). De acordo com CARVALHO (2018), a quantidade de água normalmente utilizada na produção de pastas com gesso comercial varia entre 50% e 70%, devendo ser ainda evitadas taxas acima de 80%. Os corpos de prova confeccionados seguindo a relação a/g de 0,5 apresentaram plasticidade suficiente para moldagem.

Outro fator que se apresenta como determinante nas propriedades mecânicas finais dos corpos de prova à base de gesso é a idade, sabendo-se que a resistência é um fator de extrema importância, de modo que “[...] a resistência aumenta com tempo, alcançando níveis máximos entre os 14 e 28 dias de idade, dependendo das condições ambientais.” (PINHEIRO, 2011,

p.54). Os corpos de prova confeccionados neste trabalho foram ensaiados mecanicamente após 14 dias de idade.

Os corpos de prova utilizados foram moldados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 12129 – Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas. Entretanto, para a realização da confecção foi utilizado molde para corpos de prova cúbicos com arestas de 50 mm, feito de silicone.

Com base em experimentos preliminares realizados pela equipe proponente do trabalho, bem como a partir de pesquisas na literatura, constatou-se que os corpos de prova a base de gesso podem ser conformados a partir de moldes de diferentes materiais tais como aço, acrílico, gesso, silicone entre outros; no entanto, foi observado também que a utilização do molde de silicone facilitou sobretudo o procedimento de desmoldagem dos corpos de prova conformados em termos de praticidade e rapidez além do que este tipo de molde dispensou a aplicação de substância desmoldante em suas paredes internas. O procedimento utilizado com a finalidade de cumprir o objetivo geral, pode ser dividido em três etapas, as quais seguem de acordo com a NBR 12129, referente aos ensaios mecânicos e preparação de corpos de prova de gesso para construção civil. A primeira etapa do procedimento consistiu em:

- Secagem do gesso em estufa por 2 horas a 80°C.
- Peneiramento do gesso e do resíduo de pedra Cariri em peneira 30# (abertura de 0,595mm), com auxílio de um pincel.
- Pesagem da massa de gesso a ser utilizada para moldagem dos corpos de prova, calculada através da seguinte relação, apresentada pela equação (1):

$$Mg = \frac{480}{0,4 + C} \quad (eq. 1)$$

Onde: M_g = Massa de gesso;
 C = Relação água/gesso

A massa de água destilada foi determinada pela relação da equação (2):

$$Ma = Mg \times C \quad (eq. 2)$$

Onde: M_a = Massa de água;
 M_g = Massa de gesso (da eq. 1);
 C = Relação água/gesso

- Adição de água em um recipiente com volume de 2L ou superior.

- Na etapa de incorporação de Pedra Cariri na série, misturar-se-ia o gesso com a massa de Pedra Cariri pré-estipulada por no mínimo 20 min, visando máxima homogeneidade.

O preparo da mistura ocorreu conforme estabelecido pela ABNT NBR 12129, polvilhando-se o pó sobre a água destilada durante 1 minuto, deixando a mistura em descanso durante 2 minutos e realizando o amassamento por 1 minuto (evitando grumos e montes na deposição do gesso). A pasta obtida foi transferida para o molde, batendo com uma espátula, evitando o aprisionamento de bolhas de ar, rasando e nivelando os corpos de prova. Foram moldados 3 corpos de prova para cada amostra.

Os corpos de prova foram desmoldados com o início do aquecimento destes. Foram identificados pela face rugosa (superior), e deixados secando sob ar circulante por um tempo mínimo de 14 dias. (Figura 02.a e 02.b)

Figura 02: Vista superior dos corpos-de-prova acabados. a) Camada superior - Corpos de prova puro e corpos de prova dopados com pedra Cariri amarela (1% RPCA, 3% RPCA e 5% RPCA). Camada inferior - Corpos de prova puro e corpos de prova dopados com pedra Cariri cinza (1% RPCC, 3% RPCC e 5% RPCC). b) Camada superior - Corpos de prova puro e corpos de prova dopados com pedra Cariri cinza (7% RPCC, 9% RPCC e 12% RPCC). Camada inferior - Corpos de prova puro e corpos de prova dopados com pedra Cariri amarela (7% RPCA, 9% RPCA e 12% RPCA)



Fonte: Os autores.

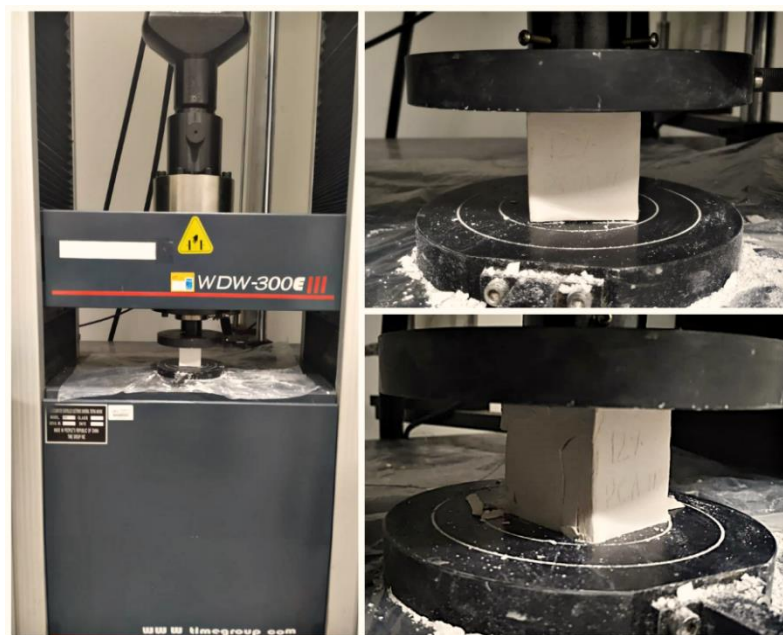
Após a secagem, foram colocados na dessecadora por 24h, removendo-os apenas para realização dos ensaios mecânicos. Tal cuidado é necessário para evitar absorção de água nos corpos de prova (são hidrofílicos), e a água é uma substância que apresenta capacidade de redução significativa da resistência mecânica do gesso.

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

A segunda etapa do procedimento consistiu na caracterização mecânica a qual foi realizada com base no ensaio de compressão dos corpos de prova de gesso puro e dos corpos de prova incorporados com diferentes percentuais de resíduos de Pedra Cariri. A resistência à compressão foi determinada utilizando-se da máquina eletrônica universal de ensaios (Time GroupInc/WDW-300E, série 319), pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais – LCM do Centro de Ciência de Tecnologia da Universidade Federal do Cariri – UFCA. O ensaio foi realizado nos corpos de prova sobre as duas faces laterais opostas sobressalentes, até a ruptura dos mesmos.

Os corpos de prova foram submetidos à aplicação de carga contínua com velocidade de aplicação de 250 N/s, como determina a ABNT NBR 12129, até obtenção da tensão de ruptura (Figura 03).

Figura 03 - Aplicação de cargas de compressão



Fonte: Os

autores.

O cálculo da resistência à compressão dos corpos de prova foi feito segundo a equação:

$$R = \frac{P}{S}$$

Onde P é a carga de ruptura em Newton, S é a área da seção transversal em milímetros quadrados, e R é a resistência à compressão, em MPa.

A ABNT NBR 13207 na sua versão de 2017 não fixa valores de resistência mínima à compressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Através da realização da técnica de fluorescência de Raios X foram obtidos os resultados das composições químicas, qualitativas e quantitativas, das amostras analisadas neste trabalho.

A Tabela 02 apresenta a composição química da amostra GC, indicando elevados teores de CaO e SO₃, totalizando em 98,81% da composição total da amostra. Apesar da identificação de espécies contaminantes é possível observar que, em geral, a amostra apresentou teor muito baixo de impurezas, limitando-se a um total 1,19%. Segundo Barbosa, Ferraz e Santos (2014), o minério de gipsita obtido na região de Araripe possui percentual de impureza menor até que 5%, fator este que contribui diretamente para a certificação da pureza do gesso, produto da calcinação do minério supracitado.

Tabela 02 - Composição química da amostra GC obtida por Fluorescência de Raios X

Analito	Teor (%)
CaO	53,579
SO ₃	45,231
Al ₂ O ₃	0,451
SiO ₂	0,421
SrO	0,223
Fe ₂ O ₃	0,076
TiO ₂	0,010
Ce ₂ O ₃	0,005
Yb ₂ O ₃	0,003
ZrO ₂	0,001

Fonte: As autoras

A tabela 03 apresenta as amostras de resíduo de pedra Cariri sendo estas compostas majoritariamente por CaO, apresentando teores baixos de outros óxidos, como o MnO e ZnO semelhante. Ambos os resíduos apresentaram pequenas contaminações com SiO₂ e Fe₂O₃, entretanto a amostra RPCC apresentou um maior teor de ferro. Tal fato pode estar associado à coloração mais escura desse resíduo. A amostra de RPCC apresenta a ocorrência de óxidos contaminantes como o ZrO₂ e SrO, que não são identificados na amostra RPCA.

Tabela 03 - Composição química das amostras de RPCA e RPCC obtidas por Fluorescência de Raios X

RPCC		RPCA	
Analito	Teor (%)	Analito	Teor (%)
CaO	91,270	CaO	91,33
SiO ₂	2,500	MgO	2,42
Fe ₂ O ₃	2,087	SiO ₂	2,08
Al ₂ O ₃	1,558	SO ₃	1,46
MgO	1,513	Fe ₂ O ₃	1,32
SO ₃	0,492	Al ₂ O ₃	0,60
MnO	0,481	MnO	0,45
ZnO	0,099	SrO	0,22
		ZnO	0,11
		ZrO ₂	0,01

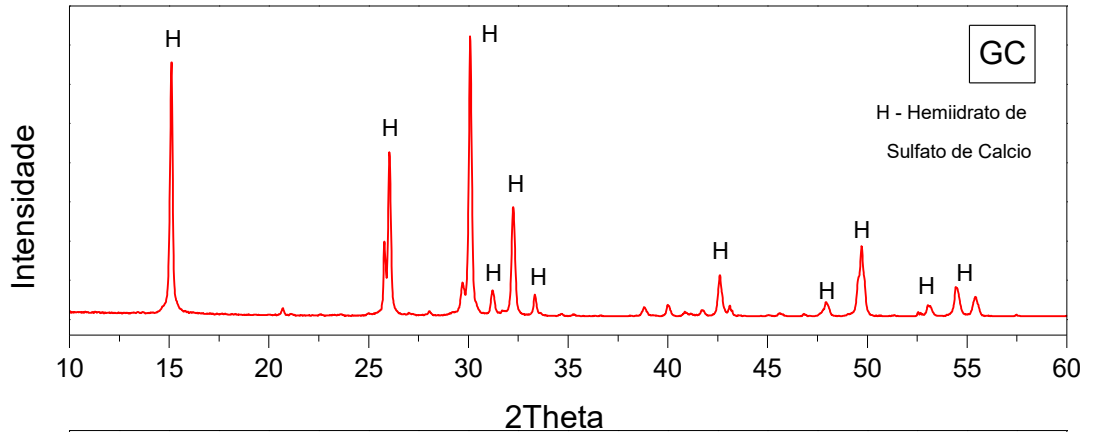
Fonte: Os autores.

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de difração de raios-X de alta resolução foi utilizada com a finalidade de identificar com precisão a presença de diferentes fases do Sulfato de Cálcio presentes na amostra de gesso. O difratograma da amostra GC (gráfico 1) aponta que o material é composto essencialmente pelo Hemihidrato de Sulfato de Cálcio, tendo como referência os picos de alta intensidade característicos da fase Hemihidrato (H) (CaSO₄·½H₂O) (ICDD 00-033-0310). A presença exclusiva do Hemihidrato confirma a elevada pureza da amostra, evidenciando a viabilidade da aplicação do gesso como insumo na construção civil. A pureza da amostra também é reforçada pela ausência de ocorrência da Gipsita (evidenciando que o minério foi totalmente convertido em sua fase parcialmente desidratada), e também da Anidrita, visto que essa fase é a principal contaminante no produto da calcinação controlada da gipsita para obtenção do gesso (BALTAR, 2008). A Anidrita pode ocorrer associada ao mineral *in natura*, bem como apresentar-se na forma de subproduto da calcinação industrial da gipsita.

Gráfico 1 - Perfil gráfico representativo dos dados de difração de raios x para a

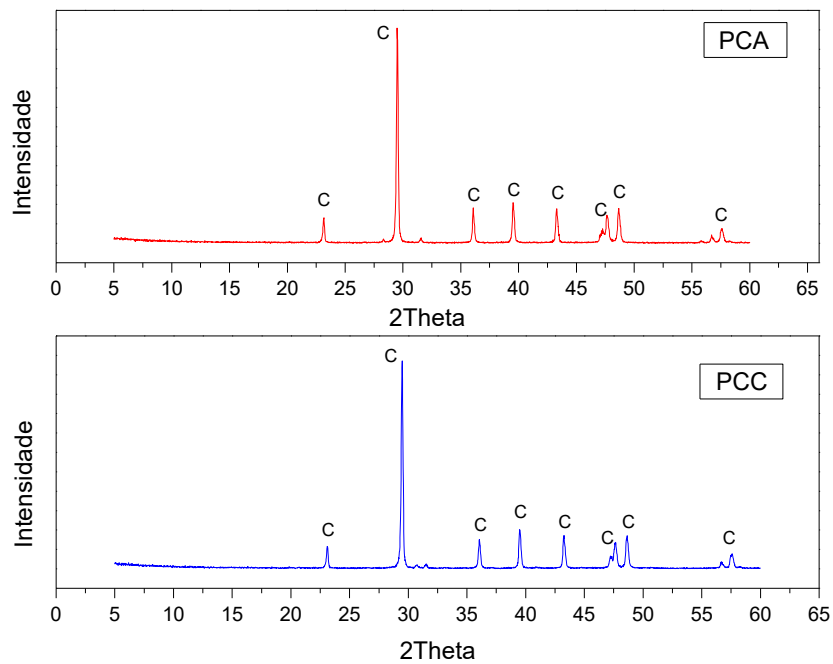
amostra GC



Fonte: Os autores.

A técnica de difração de raios-X também foi utilizada com a finalidade de identificar com precisão a espécie mineralógica predominante presente nos resíduos de pedra Cariri. Com base no gráfico 2, relacionada as amostras RPCA (a) e RPCC (b), respectivamente, verifica-se a ocorrência exclusiva de picos bem definidos constituídos por calcita, CaCO_3 (JCPDS 05-0586), caracterizando assim uma estrutura monofásica, tal como inferido a partir da composição química majoritariamente composta pelo CaO , presente na tabela 3.

Gráfico 2 - Perfis gráficos representativos dos dados de difração de raios x para as amostras RPCA (a) e RPCC (b)

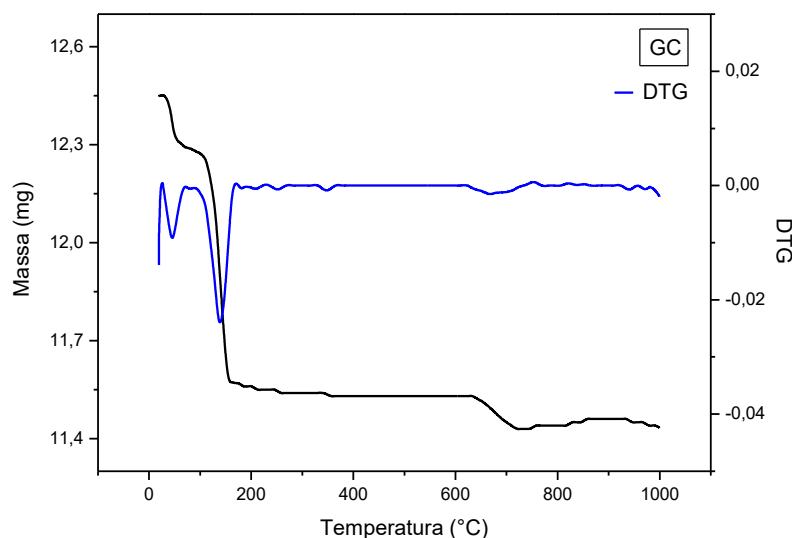


Fonte: Os autores.

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

O perfil termogravimétrico para a amostra GC ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) indicado no gráfico 3 apresenta um primeiro decaimento de massa a aproximadamente 40°C , evidenciando o início da perda da massa de água livre remanescente do processo de calcinação industrial ao qual foi submetida a amostra. Este processo foi realizado em ambiente industrial de modo controlado para que não ocorresse a formação de subprodutos além do hemihidrato. A aproximadamente 100°C ocorre o início do processo de calcinação total da amostra, derivando em um produto de baixo valor comercial, denominado Anidrita. A partir da temperatura de 200°C , o hemihidrato perde toda sua água e obtém-se uma anidrita solúvel (instável), denominada anidrita III, com baixo teor de água de cristalização. Quando se calcina o minério de gipsita pouco acima de 700°C , o produto é similar à anidrita natural encontrada em minérios de gipsita e conhecida como anidrita I, de hidratação difícil. (MELO, 2012, p.29).

Gráfico 3 - Perfil gráfico representativo dos dados da análise termogravimétrica da amostra GC

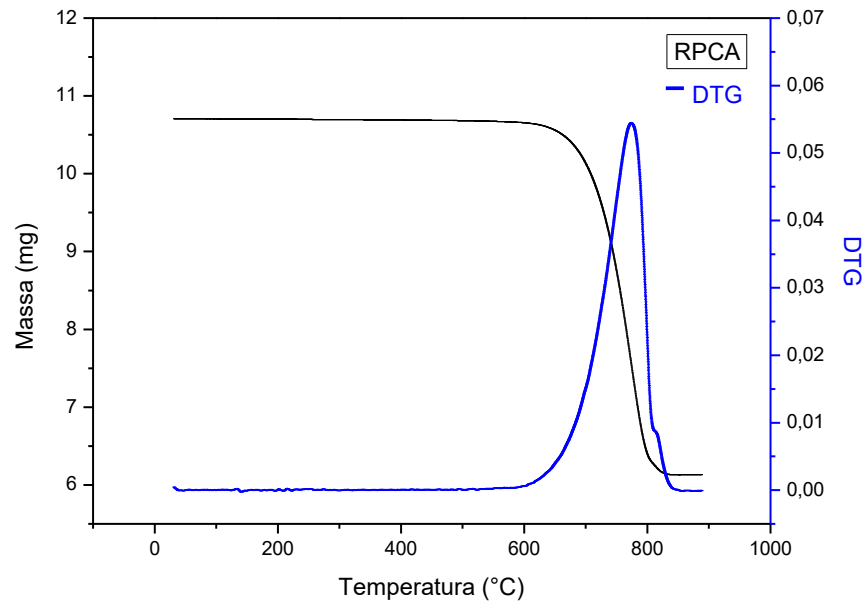


Fonte: Os autores.

Os gráficos 4 e 5 apresentam as curvas de análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada primeira (DTGA) para as amostras RPCA e RPCC. Conforme os perfis representativos da análise termogravimétrica para as amostras de RPCA e RPCC é possível constatar a semelhança do comportamento das curvas de perda de massa associada a temperatura, nos quais ambas as amostras apresentam um único pico acentuado (DTG) por volta de 750°C , provavelmente associado à decomposição do carbonato de cálcio presente no resíduo. Pequenos ruídos verificados nas curvas em ambas amostras podem estar relacionados a queima de matéria orgânica, podendo ser necessária a realização de uma análise de Calorimetria diferencial

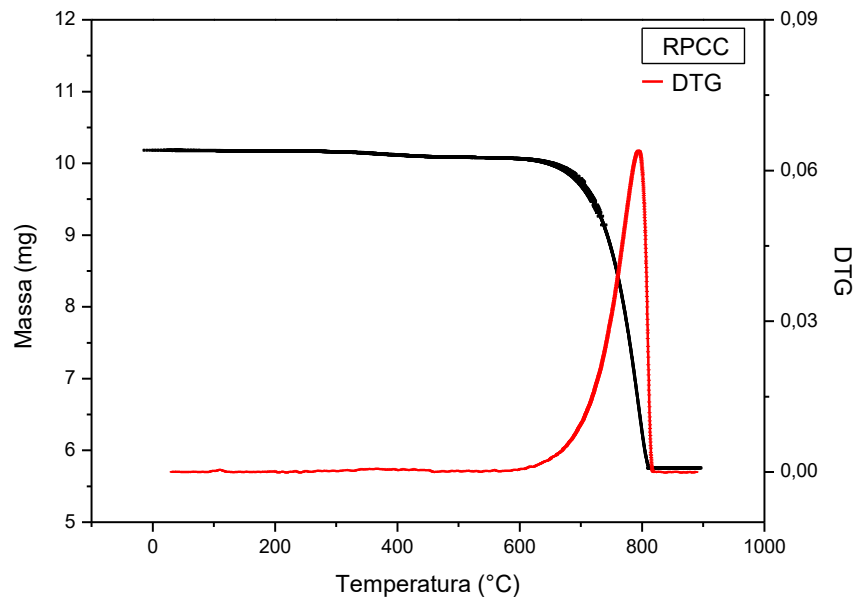
exploratória a fim de estudar a ocorrência desse contaminante.

Gráfico 4 - Perfil gráfico representativo dos dados da análise termogravimétrica da amostra
RPCA



Fonte: Os autores.

Gráfico 5 - Perfil gráfico representativo dos dados da análise termogravimétrica da amostra
RPCC.



Fonte: Os autores.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

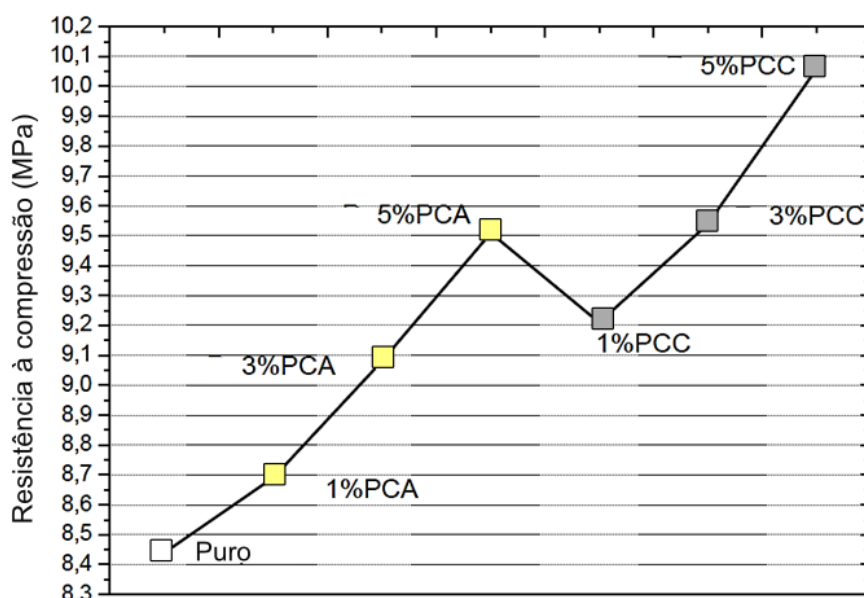
4.4.1 Ensaio de resistência à compressão

Os resultados coletados no ensaio de caracterização mecânica de compressão para os corpos de prova confeccionados contendo o RPCA e RPCC estão exibidos nos perfis gráficos

a seguir.

Todos os corpos de prova incorporados com os percentuais de RPC de 1, 3 e 5% apresentados no gráfico 8 indicaram maior resistência do que os corpos de prova puros, apresentando aumento proporcional ao incremento do teor do RPC, tendo destaque os corpos de prova incorporados com Pedra Cariri cinza, os quais apresentaram maior resistência à compressão em relação às demais, como previsto de acordo com os resultados de FRX, devido à composição da mesma ser menor em compostos silicosos, o que de acordo com a literatura fragiliza o gesso.

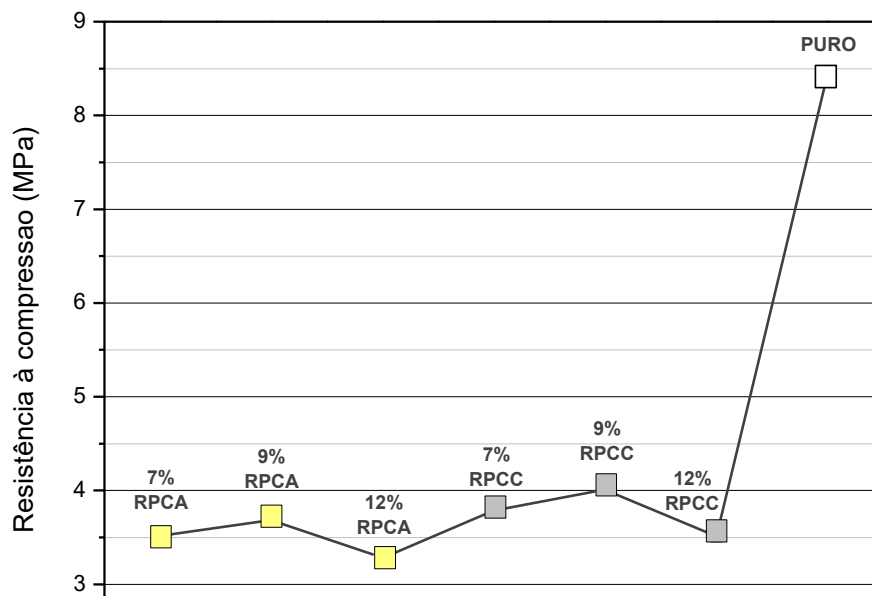
Gráfico 6 - Perfil gráfico comparativo da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados e caracterizados neste trabalho - Corpos de prova de gesso puro e corpos de prova de gesso rapadura incorporado com resíduos de Pedra Cariri nos teores de 1%, 3% e 5%



Fonte: Os autores.

Os resultados do ensaio de caracterização mecânica de compressão para os corpos de prova confeccionados contendo o RPCA e RPCC nos teores de 7, 9 e 12% estão exibidos no perfil do gráfico 7. Analisando os resultados pode-se observar que os corpos de prova incorporados com RPC apresentaram menor resistência em relação aos corpos de prova puros, e conseqüentemente inferior à resistência relatada pelos corpos de prova dopados com os teores de 1, 3 e 5%. Foi possível inferir que a resistência máxima à compressão dentro do intervalo analisado no perfil gráfico da figura 10 foi de 9%, apresentando a partir de então uma redução expressiva da resistência mecânica. Seguindo o padrão observado para os teores de 1, 3 e 5%, os corpos de prova incorporadas com RPCC, apresentaram maior resistência à compressão em relação aos dopados com RPCA.

Gráfico 7 - Perfil gráfico comparativo da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados e caracterizados neste trabalho - Corpos de prova de gesso puro e corpos de prova de gesso incorporado com resíduos de Pedra Cariri nos teores de 7%, 9% e 12%



Fonte: Os autores.

A redução expressiva da resistência à compressão observada na transição entre os teores de 5% e 7% de carga de incorporação de pedra Cariri no gesso é possivelmente decorrente da diferença de granulometria apresentada pelos pós dos materiais utilizados, como pode ser observada na tabela 06 a seguir:

Tabela 04 - Granulometria média dos materiais utilizados (gesso e RPCA / RPCC)

Gesso	RPCA e RPCC
$\leq 0,210\text{mm}$	$\leq 0,595\text{ mm}$

Fonte: Os autores.

Segundo os dados apresentados anteriormente, fica evidente que devido a carga de reforço utilizada (RPC) apresentar granulometria muito superior em relação a observada para o gesso, os aglomerados de partículas de RPC incorporados à massa do gesso introduziram distorções muito acentuadas no retículo cristalino do material, que por sua vez promoveram tensões residuais internas severas que culminaram na fragilização da estrutura do gesso.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos na etapa de caracterização físico-química das amostras de gesso e resíduos de Pedra Cariri, foi possível concluir que a correlação entre os seguintes fatores: (i) predominância da fase Hemihidrato (amostra GC) observada na análise de

DRX, (ii) baixo teor de espécies contaminantes verificados na análise de FRX para as amostras GC, RPCA e RPCC são indicadores do elevado teor de pureza das amostras, evidenciando a viabilidade da utilização do gesso e da pedra cariri para a confecção de materiais para aplicação na cadeia produtiva de insumos para a construção civil.

A análise de TGA desempenhou papel fundamental na análise do comportamento térmico, resultando em perda da massa de água (livre/cristalização) do hemihidrato (na reação de calcinação), confirmando a consonância entre os padrões dos eventos térmicos obtidos e os observados na literatura para este material. A análise de TGA apresentou elevada importância na constatação da ausência de espécies contaminantes de natureza orgânica possivelmente presentes na amostra invisíveis à análise de DRX.

De acordo com os resultados obtidos para a caracterização mecânica de compressão ficou constatado que a incorporação dos percentuais de 1, 3 e 5% de pedra cariri promoveram o incremento das propriedades mecânicas dos corpos de prova de gesso. Por outro lado, à medida que a incorporação da carga de reforço de pedra Cariri foi sendo aumentado nas concentrações de 7, 9 e 12% mostraram que tais concentrações foram altas o suficiente para fragilizar os corpos de prova de gesso.

Foi constatado que o percentual máximo de incorporação de resíduos de pedra cariri como carga de incorporação para o gesso destinado para a construção civil é de 5%. Desta forma, foi observado que quando o teor de RPC incorporado ao gesso atingiu o nível de 7%, concluiu-se que quanto maior a incorporação da carga dopante, mais fragilizada ficaria a estrutura do material.

A incorporação do resíduo de Pedra Cariri cinza nos teores 1, 3 e 5% não exerceu influência sobre a coloração dos corpos de prova a base de gesso. Entretanto, ao ser adicionada a carga de incorporação de 7, 9 e 12% pôde ser observada uma leve variação na tonalidade do material acabado.

A incorporação do resíduo de Pedra Cariri amarela exerceu influência perceptível, porém discreta, sobre a coloração dos corpos de prova a base de gesso nos teores de 1, 3 e 5%. Foi observada uma variação expressiva na coloração ao ser adicionada a carga de incorporação de 7, 9 e 12%.

Foi possível observar que em alguns casos, os corpos de prova romperam-se em um valor muito abaixo do normal. Verificou-se que as fissuras que estes corpos de prova se originaram a partir de pequenos grumos e rugosidades, fatores que caracterizam pontos

concentradores de tensão na estrutura do material. Alguns corpos de prova apresentaram tais imperfeições na superfície devido ao molde utilizado (feito de silicone). O silicone é um material com baixa estabilidade dimensional, quando comparado a materiais como aço, acrílico, plásticos, entre outros, também usados para confeccionar moldes para a preparação de peças de gesso. Desse modo alguns corpos de prova apresentaram defeitos de instabilidade dimensional e irregularidades superficiais, fato este que pode ter comprometido a resistência mecânica dos mesmos. Para contornar esta situação, recomenda-se, portanto, a utilização de moldes que ofereçam maior estabilidade dimensional aos corpos de prova conformados.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Cariri, à Pro Reitoria de Pesquisa e Inovação e ao CNPq pelo suporte financeiro e infraestrutural dispensados em favor do desenvolvimento deste trabalho bem como à indústria do Polo Gesseiro do Araripe que disponibilizou as amostras do gesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. NBR 12128: **Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 12129: **Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13207: **Gesso para construção civil – Especificação**. Rio de Janeiro, 2017.

BALTAR, Carlos Adolfo Magalhães; BASTOS, Flávia de Freitas; LUZ, Adão Benvindo da. **Rochas e Minerais industriais: Gipsita**. 2ª edição. Rio de Janeiro: CETEM-MCT. c.23, p. 505-526, 2008.

BALTAR, Carlos Adolfo Magalhães; FREITAS, Erick José Gomes de. Produção de gesso no Brasil: mineração e processamento. **Revista Digitalis**. Universidade de Coimbra, Portugal. 2012. Disponível em: https://digitalis.uc.pt/es/livro/produ%C3%A7%C3%A3o_de_gesso_no_brasil_minera%C3%A7%C3%A3o_e_processamento>. Acesso em: 05 fev 2021.

BARBOSA, Amanda Alves; FERRAZ, Andréa de Vasconcelos; SANTOS, Geciane Alves. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do polo do Araripe, PE. **Revista Cerâmica**, n.60, p.501-508. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400007>. Acesso: em 10 fev 2021.

CARRISSO, Regina Coeli C.; CORREIRA, Júlio César G.. **Tratamento de minérios: Classificação e peneiramento**. CETEM. 4ª edição. Rio de Janeiro.2010.

CARVALHO, Igor Gabriel Gomes. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente dos resíduos gerados da produção do gesso acartonado na cidade de Juazeiro do Norte**. 71 f. Monografia – Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Cariri. Juazeiro do Norte – CE. 2018.

CORREIA, Júlio César Guedes. **Caracterização tecnológica dos calcários do cariri do Ceará**. CETEM. 2005.

FILHO, Adhelbar Albuquerque Queiroz; NETO, Antônio Alves Amorim; DANTAS, José Orlando Câmara. **Sumário mineral Brasileiro: Gipsita**. v.18, 2018.

LIMA, Pedro Henrique Pinheiro. **Avaliação da capacidade de incorporação de resíduos de pedra cariri em amostras de gesso oriundas do polo do Araripe**. Universidade Federal do Cariri. Juazeiro do Norte – CE. Trabalho de conclusão de curso. 2018.

LINS, Fernando Antônio Freitas; LUZ, Adão Benvindo da. **Panorama das Rochas e Minerais Industriais no Brasil**. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2a Edição.

LIRA, Marcela Cristine de Alencar; NEIVA, Laédna Souto. Investigative study of the potentialities of noble applications for the Brazilian calcium sulfate α -hemihydrate. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 4. 2020.

MELO, Daniele de Castro Pessoa. **Processo de calcinação da gipsita/resíduo em um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável**. 177 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2012.

MENEZES, Romualdo Rodrigues, et al. Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, 63(4): 667-672, out. dez. 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/564/56416594011.pdf>. Acesso em: 10 fev 2021.

NOGUEIRA, Jesus Charles do Amaral. **Melhoria das propriedades do gesso com aditivo sintético e com látex de *Euphorbia Tirucalli* e de *Hevea Brasiliensis* para uso na construção**

de habitações de interesse social. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2012.

OLIVEIRA, Felisbela Maria da Costa, et al. Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. **HOLOS**, 28, v.5, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2012.1140>. Acesso em 10 fev 2021.

PADEVET, Pavel; TESAREK, Pavel; PLACY, Tomáš. Evolution of Mechanical properties of gypsum in time. **International Journal of Mechanics**. v.5. 2011. Disponível em: <https://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/19-1160.pdf> . Acesso em 06 fev 2021.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes.** 2011. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Arquitetura e Construção), Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2011.

SOARES, Joelma da Penha. **Estudo Microestrutural do gesso- α produzido pelo processo hidrotérmico e calcinação a seco e sua influência nas propriedades mecânicas pós hidratação.** *Dissertação de mestrado* – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2005.

SOBRINHO, A. C. et al. **Gipsita: Balanço Mineral Brasileiro.** *DNPM/PE*. 2001.