

Compósito de resíduos de mineração com cimento e cal para materiais de construção sustentáveis

Ricardo Eugênio Barbosa Ramos Filho ^[1], Jonatas Macêdo de Souza ^[2], João Batista Duarte ^[3], Vamberto Monteiro da Silva ^[4], Wilson Acchar ^[5]

[1] ricramosf30@ufrn.edu.br. [2] jonatasms2@hotmail.com. [3] jbduart961@gmail.com. UFRN/PPGCEM.

[4] vambertomonteirodasilva@yahoo.com.br. IFPB/Unidade Acadêmica I. [5] wacchar@gmail.com. UFRN/PPGCEM.

RESUMO

Alternativas sustentáveis vêm sendo desenvolvidas com a utilização de resíduos na construção civil, dentre os quais destacam-se os resíduos de mineração, devido a sua geração em grande quantidade e ao impacto ambiental causado. Esse trabalho consiste na aplicação conjunta de resíduo de scheelita e pó de pedra, com adição de cal e cimento, produzindo Corpos de Prova Cilíndricos (CPC), para avaliar possíveis utilizações em materiais construtivos. Após as caracterizações químicas e físicas, foi determinada a porcentagem de cada resíduo, por meio da análise de empacotamento entre as partículas, obtendo-se a formulação de 50% de cada resíduo, com adição de cimento e ou cal nos teores de 6% e 12%. Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), Absorção de Água (AA) e análise das fases químicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX) foram avaliados em períodos de cura determinados. Os resultados do ensaio de RCS das formulações com resíduos e cimento atingiram valores superiores a 1 Mpa, e o resultado do ensaio de AA com valor inferior a 20%, satisfazendo às normas técnicas brasileiras. Foram observadas fases cimentícias nas análises de MEV e DRX. Os resultados obtidos da mistura dos resíduos com o cimento mostram-se promissores para a fabricação de materiais de construção cimentícios.

Palavras-chave: Resíduos de mineração. Resíduo de scheelita. Pó de pedra. Materiais de construção sustentáveis. Aproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

Sustainable alternatives have been developed with the use of waste in construction, among which we can highlight mining waste due to its large amount generated and environmental impact caused. This work consists in the joint application of scheelite residue and stone powder with lime and cement addition, producing cylindrical specimens, to evaluate possible uses in constructive materials. After chemical and physical characterization, the percentage of each residue was determined through the analysis of packing between the particles, which resulted in a formulation of 50% of each residue with the addition of cement and / or lime in the contents of 6% and 12%. Essays for simple compressive strength (SCS), water absorption (WA) and chemical phase analysis by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were evaluated at determined cure times. The SCS essays results of formulations with residues and cement reached values above 1 MPa and WA essays results with value below 20%, according to the Brazilian technical standards. Cement phases were observed in SEM and XRD analysis. The results obtained from mixing the waste with the cement are promising for the manufacture of cement building materials.

Keywords: Mining waste. Scheelite waste. Stone Powder. Sustainable building materials. Harnessing residues.

1 Introdução

A indústria da construção e o extrativismo mineral representam segmentos importantes na geração de emprego e renda na economia brasileira, mas consomem uma quantidade massiva de recursos naturais e energia em seus processos produtivos, além de serem responsáveis pelo descarte de volumes significativos de resíduos que contaminam as águas subterrâneas, nascentes, lagos e solo, pois são depositados no meio ambiente ou em aterros sanitários, apesar de haver requisitos legais impostos pela Lei 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Essa legislação é baseada na seguinte premissa: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, juntamente com a Lei da estratégia econômica “Produção Mais Limpa”, cujo principal objetivo é aumentar a eficiência no uso de matérias-primas e insumos (BOHANA *et al.*, 2016 e JOHN; AGOPYAN, 2000).

Várias pesquisas foram realizadas com o uso de resíduos em materiais de construção para diversas aplicações, como: o uso de cinzas de bagaço de cana, para concreto (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009); alguns resíduos minerais, como resíduos de quartzo e escória de aço, para tijolos resistentes a ácidos (EL-MAHLLAW, 2008); resíduos de mármore, no concreto (HEBHOUB *et al.*, 2011); uso de agregados produzidos a partir de pedreiras de mármore, em pavimentos de asfalto (AKBULUT; GURER, 2007).

O Brasil possui um potencial mineral considerável e é responsável pela produção de toneladas de resíduos. Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), existem 10.841 minas de diferentes tipos e tamanhos, das quais 98,1% representam produtos (latão, areia, cascalho e argilas) bem como água mineral (SILVA *et al.* 2017).

O uso de resíduos minerais tem se intensificado nos últimos anos, com estudos científicos avaliando o comportamento de rejeitos minerais em matrizes de cimento (QUEIROZ *et al.*, 2016), na construção civil, através da produção de argamassa de assentamento e revestimento (MEDEIROS, 2016), dentre diversos outros trabalhos, visando ao aproveitamento de resíduos na indústria de construção.

A presente pesquisa tem como objetivo estudar as propriedades físicas e mecânicas de Corpos de Prova Cilíndricos (CPC), moldados a partir de resíduos

de scheelita e pó de pedra, com porcentagens pré-determinadas de cimento, cal e água, produzindo um material construtivo feito apenas com resíduos, servindo de base de estudo para uso em materiais de construção, como tijolos, concreto ou argamassas.

Uma das vantagens de se utilizar o CPC em pesquisas de materiais de construção é que, em uma avaliação da resistência à compressão simples e absorção de água em amostras cilíndricas, moldadas pelo método Proctor normal, é possível se determinar a quantidade de solvente (água) necessária no processo e selecionar as formulações mais promissoras a serem prensadas posteriormente para a produção de tijolos ecológicos (ROLIM; FREIRE; BERALDO, 1999 e KOLLING; ROGELLO; MODOLO, 2012).

2 Referencial teórico

2.1 Resíduo de scheelita

O resíduo de scheelita é encontrado em abundância na mina de Brejuí, Currais Novos / RN – Brasil, cuja produção é de cerca de 50 m³ por dia e 18.000 m³ por ano (PAIVA, 2013), sendo depositado em ambientes determinados pela indústria local. Existem dois tipos de resíduos obtidos pelo processo de beneficiamento de scheelita desta mina, sendo o primeiro de granulometria mais grosseira – decorrente da primeira separação da scheelita – e o segundo, de granulometria mais fina, obtido após secagem da água utilizada nas mesas vibratórias do processo de beneficiamento, que contém sheelita em suspensão.

A produção de scheelita do Brasil corresponde a apenas 0,5% da produção mundial (DNPM, 2017). O Brasil, entretanto, possui as maiores reservas da América Latina, que se encontram na Província Scheelífera do Seridó, nos Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba.

A geração de resíduos por meio do processo de beneficiamento de scheelita da mina Brejuí representa uma elevada quantidade, gerando 99,2% de resíduos, restando apenas 0,8% do concentrado de tungstênio (minério de scheelita beneficiado). Esses resíduos vão sendo acumulados a céu aberto. A título de referência, em 2014 foram produzidos 7 milhões de toneladas desse material (GERAB, 2014).

A utilização do resíduo de scheelita em materiais de construção tem apresentado resultados satisfatórios, conforme os trabalhos de: Machado (2012), em adição à massa cerâmica; Gerab (2014) e Medeiros (2016),

na substituição à areia em argamassas; Santandrea, Meira e Oliveira (2017), em tijolos solo-cimento para pisos.

2.2 Pó de pedra

Em 2016, a produção bruta de brita e cascalho declarada pelo Relatório Anual de Lavoura (RAL) foi de 202,2 milhões de toneladas, com a produção beneficiada alcançando 185 milhões (DNPM, 2017), acumulando grandes quantidades de pó de pedra. Esse resíduo é o rejeito da produção de brita e responde por 15 a 20% dos materiais obtidos no processo de britagem, devido à trituração de rochas (DUARTE, 2013).

O pó de pedra tem sido bastante utilizado como substituição à areia para concretos e argamassas, conforme pesquisado nos trabalhos de Campos (2015) e Duarte (2013), sendo necessário, em alguns casos, adicionar plastificante ao concreto devido à morfologia lamelar do pó de pedra que dificulta a trabalhabilidade. Esse resíduo já é vendido como areia industrial, evitando-se, assim, seu acúmulo no meio ambiente.

2.3 Empacotamento de partículas

Segundo Oliveira *et al.* (2000), o estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos espaços serão preenchidos com partículas ainda menores, e, assim, sucessivamente.

Outro fator que poderá alterar a condição de empacotamento é a morfologia das partículas, pois quanto menos esférica for a partícula, mais dificuldade haverá no “encaixe” entre elas, ou seja, dependendo de como estiverem arranjadas, estas partículas podem até formar mais vazios.

2.4 Reações químicas dos resíduos com os aglomerantes.

Os argilominerais que contêm pozolanas presentes nos resíduos podem reagir com a cal, formando silicatos de cálcio hidratados, conforme estudado por Góis (2012), em seu trabalho com incorporação de cal em solo e solo-cimento, no qual constatou que a sílica e alumina com maior reatividade, ou seja, com baixa cristalinidade, reagem com o óxido de cálcio da cal.

Segundo Góis (2012) e Silva (2013), pode-se concluir que, assim como ocorrem reações de pozolanas com a cal, também podem ocorrer reações com o óxido de cálcio presente no cimento.

O óxido de cálcio contido no resíduo de scheelita, conforme verificado nos trabalhos de Gerab (2014) e Medeiros (2016), podem reagir com os silicatos anidros do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados.

Além da parte mais fina dos resíduos de scheelita e pó de pedra poderem atuar como um efeito filler ao cimento, podem ocorrer reações cimentícias com esses resíduos, como constatado no trabalho de Chatterjee (2008), que verificou reatividade nas partículas mais finas do calcário com a adição do silicato do cimento, formando monocarboaluminato de cálcio hidratado que possui propriedades aglutinantes.

3 Metodologia

O resíduo de scheelita foi coletado em um estoque aberto da mina Brejuí, em Currais Novos-RN, Brasil, sendo utilizado apenas o resíduo fino. O pó de pedra foi adquirido de uma mineração em Itapevi-Bahia, Brasil, sendo obtido pela britagem de rochas graníticas.

O cimento Portland utilizado foi o cimento compósito CP II F-32, que apresenta propriedades recomendadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), para produzir composições de solo-cimento. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Natal / RN.

A cal hidratada, do tipo CH-II (ABNT, 2003), conhecida comercialmente como Rebocal, é fabricada na cidade de Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil.

A água potável utilizada foi a do sistema público de abastecimento da cidade de Natal / RN, Brasil, fornecido pela concessionária local, a CAERN – Empresa de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte.

O procedimento experimental iniciou-se com a caracterização dos materiais, seguida de sua homogeneização, compactação e moldagem, para serem realizados os ensaios tecnológicos de absorção de água e resistência à compressão simples, sendo verificadas, após rompimento dos CPC, a morfologia microestrutural e as fases formadas, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX).

As matérias-primas aplicadas foram selecionadas pelo método estatístico de quarteamento, utilizando-se as técnicas de análise granulométrica, seguindo os padrões brasileiros (ABNT, 2016a). Para caracterização,

foram utilizados dispositivos de Difração de Raios-X (DRX), o SHIMADZU XRD 7000, e Fluorescência de Raios- X, o EDX-720 (XRF), disponíveis no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFRN.

O ensaio de compactação seguiu a Norma NBR 7182 (ABNT 2016b), sendo realizado no laboratório de solos da UFRN. Esse ensaio é normalmente utilizado para caracterização de solos, sendo utilizado neste trabalho para também determinar os teores ideais de resíduos a serem utilizados nas formulações.

O teor dos resíduos de scheelita e pó de pedra, com relação à massa total de resíduos, é aquele que produz o melhor empacotamento, uma vez que possuem baixa reatividade, não influenciando em suas propriedades.

Esse melhor empacotamento é obtido pela verificação da curva presente no gráfico do ensaio de compactação, gerada a partir da análise da massa específica aparente seca e da umidade. É necessário que essa curva seja simétrica, tendo, ainda, a maior massa específica e menor umidade que as demais curvas de outras combinações de resíduos analisadas.

Todas as formulações aplicadas estão descritas na Tabela 1. Para tais formulações, foi aplicada a combinação de 50% de resíduo de scheelita e 50% de pó de pedra, devido ao fato de ser esta a combinação com melhor empacotamento entre as partículas. A partir dessa combinação, foram moldados os corpos de prova, de acordo com a Norma NBR 12024 (ABNT 2012a), tendo 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura.

Tabela 1 – Nomenclatura das formulações produzidas

Código	Adição de cimento ou cal.	Porcentagem aproximada (total)
R6CH	6% de cal	85% de resíduos, 5% de cal e 10% de água
R12CH	12% de cal	80% de resíduos, 10% de cal e 10% de água
R6C	6% de cimento	85% de resíduos, 5% de cimento e 10% de água
R6CH6C	6% de cal e 6% de cimento	80% de resíduos, 5% de cimento, 5% de cal e 10% de água
R12C	12% de cimento	80% de resíduos, 10% de cimento e 10% de água

Legenda: R – compósito com 50% de cada resíduo; C – cimento; CH – cal hidratada

Fonte: Elaboração Própria.

No ensaio de resistência uniaxial, foram usadas 3(três) amostras para cada tempo de cura e 3(três) amostras para o ensaio de absorção de água. A moldagem foi realizada utilizando-se o equipamento Proctor Normal, com aplicação de 26 golpes, com auxílio de um pistão, em 3 (três) camadas no material inserido no molde cilíndrico.

Os corpos de prova cilíndricos foram curados por 90, 120, 150 e 210 dias para as formulações com cal, considerando algum efeito pozolânico, conforme pesquisado por Mehta e Monteiro (2014), que indicaram reações pozolânicas em 90 dias ou mais de cura.

Para as formulações com cimento, a referência é de pelo menos 28 dias, para se ter a maior quantidade de reações cimentícias (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Foram realizadas, portanto, formulações com menores tempos de cura, sendo para 28, 56, 120 e 480 dias.

Os CPC foram colocados em ambiente apropriado, com umidade, e protegidos da atmosfera, visando amenizar os efeitos da carbonatação pelo CO₂.

O Ensaio de Absorção de água foi realizado no laboratório de solos da UFRN. As amostras foram pesadas e colocadas em estufa apropriada até atingirem constância de massa, sendo novamente pesadas e imersas em água, em tanque adequado, pelo período de 24 horas, retiradas da imersão e pesadas novamente (os instrumentos tanque e estufa seguiram a NBR 13555 (ABNT, 2012d)).

O Ensaio Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, utilizando-se uma máquina universal AMSLER, seguindo a Norma Brasileira NBR 12025 (ABNT, 2012b). Antes do ensaio, foi feito o capeamento dos CPC através do nivelamento da superfície de cada amostra – que recebeu uma pasta de cimento bastante plástica, de modo a tornar mais plana a área de contato entre a prensa e o corpo de prova, possibilitando a uniformidade da carga aplicada.

Após a ruptura, as amostras foram enviadas para análise da microestrutura da superfície de fratura, utilizando-se equipamentos de MEV e DRX do Laboratório de Caracterização de Materiais. A análise dos picos de DRX foi realizada com auxílio da ferramenta X'pert da PANalytical, que possui um banco de dados do ICDD (*International Centre for Difraction Data*), um centro internacional com cartas de DRX de vários materiais.

4 Resultados e discussões

4.1 Caracterização

De acordo com os resultados da Fluorescência de Raios-X (FRX), tendo os principais elementos apresentados na Tabela 2, foi constatada alta quantidade de óxido de cálcio (66,49%) no resíduo de scheelita, sendo superior às porcentagens aplicadas em outros estudos que utilizaram esse resíduo, a exemplo das pesquisas de Almeida *et al.* (2016), com 15%, e de Godeiro *et al.* (2010), com 36%, indicando certa variabilidade, reforçando a necessidade da caracterização.

Tabela 2 – Resultados do FRX dos materiais

Material / Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Resíduo de scheelita	23,97	8,1	13,51	46,49
Pó de pedra	60,45	24,26	3,05	1,3
Cimento CII F-32	19,03	4,6	3,22	60,84
Cal hidratada	2,31	0,75	0,47	88,3

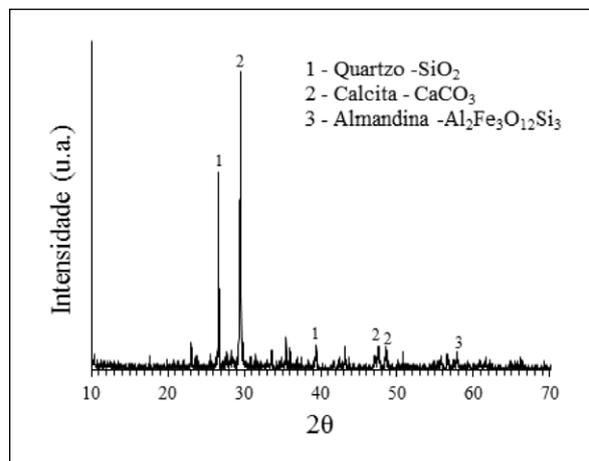
Fonte: Elaboração Própria.

O pó de pedra apresentou teor significativo de sílica (60,45%), pois é extraído de rochas graníticas as quais, de acordo com as pesquisas de Vargas, Motoki e Neves (2001), possuem bastante quartzo. Em relação ao cimento, os resultados indicam uma porcentagem de óxido de cálcio na ordem de 60,84%, o que confirma a adição do fíler de calcário indicado pelo fabricante. A cal hidratada apresenta uma porcentagem de óxido de cálcio (CaO) em 88,3% e de óxido de magnésio (MgO) em 6,43%. Com base nas disposições da NBR 7175/03 (ABNT, 2003), o material é classificado como cal tipo CH-II.

No DRX da Figura 1, verifica-se que o resíduo de scheelita possui picos definidos de calcita, quartzo e grossular, sendo o primeiro em maior quantidade de picos, uma vez que o minério de scheelita está associado ao minério de calcário, que é encontrado em maior quantidade na mina.

Na caracterização por DRX deste resíduo, extraído da mesma mina, realizada por Machado *et al.* (2012), Medeiros *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2019), também foram encontrados vários picos com calcita, quartzo e alguns minerais argilosos, como a mica.

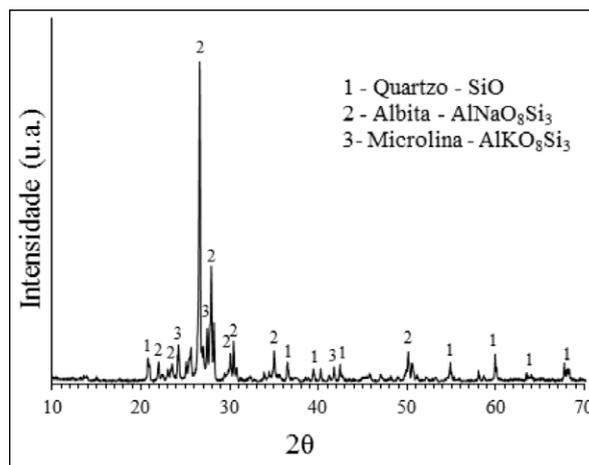
Figura 1 – DRX do resíduo de scheelita



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 2 mostra o DRX de resíduo de pó de pedra com alguns outros minerais, como anortita, e argilominerais, como biotita, albita e microlina, sendo semelhantes aos resultados encontrados por Acchar *et al.* (2017) e Machado *et al.* (2016).

Figura 2 – Difração de Raios-X do pó de pedra

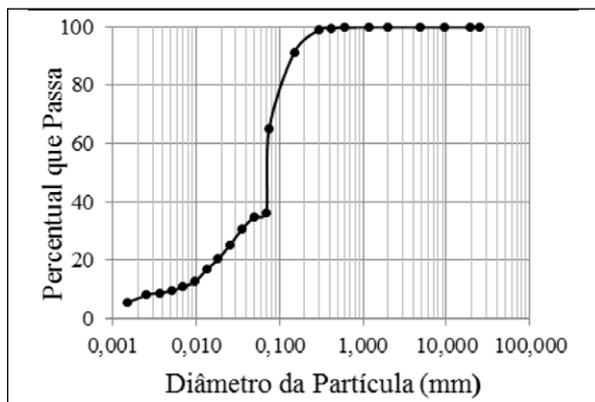


Fonte: Elaboração Própria.

As fases cristalinas verificadas nos difratogramas dos resíduos corroboram os resultados apresentados em suas respectivas análises de Fluorescência de Raios-X. Alguns elementos, porém, não foram encontrados em fases, como no caso do resíduo de scheelita, uma vez que fases mais intensas, como a da calcita, sobrepõem as fases de menores percentuais.

A Figura 3 apresenta a granulometria do resíduo Scheelita, classificado como agregado miúdo, com módulo de finura calculado em 0,10 mm, com diâmetro máximo de 0,15 mm.

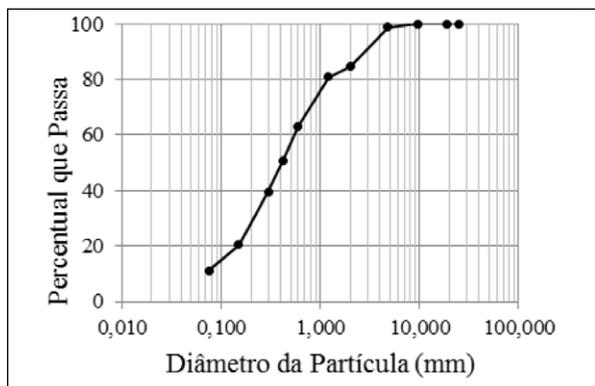
Figura 3 – Granulometria do resíduo de scheelita



Fonte: Elaboração própria.

O pó de pedra, com granulometria observada na Figura 4, pode ser classificado como agregado miúdo, com módulo de finura de 2,6 e diâmetro máximo de 4,8 mm.

Figura 4 – Granulometria do pó de pedra



Fonte: Elaboração Própria.

4.2 Análise do Empacotamento

O resíduo scheelita e o pó de pedra apresentam uma diferença marcante no tamanho das partículas, o que facilita o processo de interação entre elas. Além disso, existem variações na morfologia: as partículas dos resíduos de scheelita apresentam uma estrutura esférica, enquanto o pó de pedra apresenta uma estrutura lamelar, em sua maior parte. Essa diferença permite o preenchimento de vazios entre as partículas de pó de pedra por resíduos de scheelita.

Essas premissas foram confirmadas nos ensaios de compactação realizado com a mistura dos resíduos de scheelita, o pó de pedra e água, conforme verificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de compactação para teores de resíduo de scheelita e resíduo de britagem

Resíduo de scheelita (%)	Pó de pedra (%)	$\gamma_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	H _{ot} (%)
60	40	1,8	12,8
50	50	1,94	11,5
40	60	1,89	11,8

Legenda: $\gamma_{m\acute{a}x}$ – massa específica máxima; H_{ot} (%) percentagem de umidade ótima.

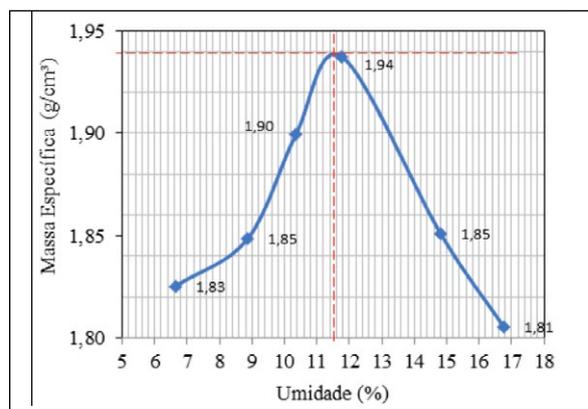
Fonte: Elaboração própria.

Na formulação com 60% de resíduo de scheelita, ou seja, com uma maior quantidade de partículas finas, deve ter ocorrido um maior preenchimento dos espaços vazios entre as partículas do pó de pedra. De acordo com Silva (2013), em seu estudo com solo-cimento, o aumento da proporção de finos promove, porém, um aumento médio da superfície específica das partículas presentes na mistura, resultando em um acréscimo na quantidade de água necessária para agregação das partículas inertes do solo.

Com a diminuição da quantidade de finos, como no caso da formulação de 40% de resíduo de scheelita, também ocorre um aumento na quantidade de vazios, pois deve haver espaços entre as partículas maiores do pó de pedra que não são preenchidos pelas partículas menores do resíduo de scheelita.

Dessa forma, o melhor grau de empacotamento foi obtido na formulação de 50% de resíduo de scheelita e 50% de pó de pedra, formando uma curva simétrica normal, com adição de 11,5% de água, conforme se mostra na Figura 5.

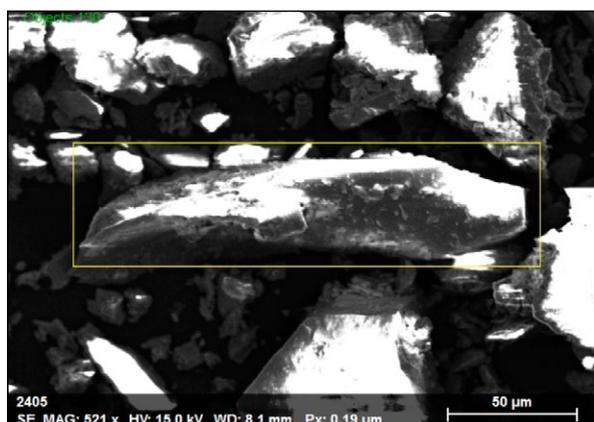
Figura 5 – Gráfico de compactação da mistura de 50% de resíduo de scheelita e 50% de pó de pedra



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 6, observa-se, por meio do MEV, uma partícula lamelar de pó de pedra, com partículas de scheelita ou pó de pedra fino ao redor, indicando o elevado empacotamento entre a mistura.

Figura 6 – Imagem por MEV-FEG da morfologia das partículas de uma amostra do CPC



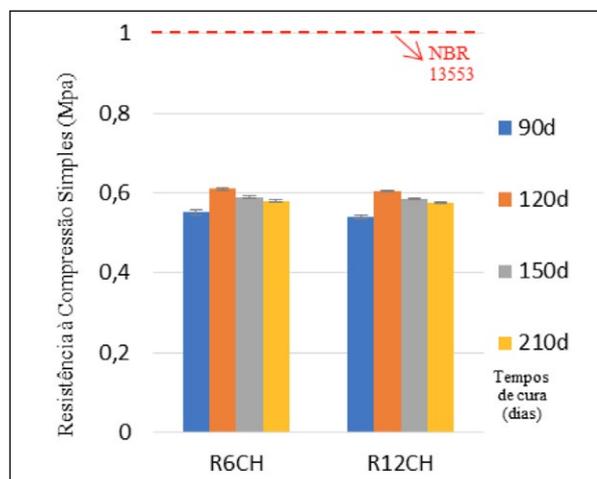
Fonte: Elaboração Própria.

4.3 Ensaio Tecnológicos

4.3.1 Resistência à compressão simples

A Figura 7 apresenta a Resistência à Compressão Simples, para os resíduos com cal em tempos de cura de 90 a 210 dias, seguindo o trabalho de Silva (2013), pois as amostras com cal necessitam de pelo menos 90 dias de cura para produzirem reações pozolânicas.

Figura 7 – Resistência à compressão simples para os CPC de resíduos com cal

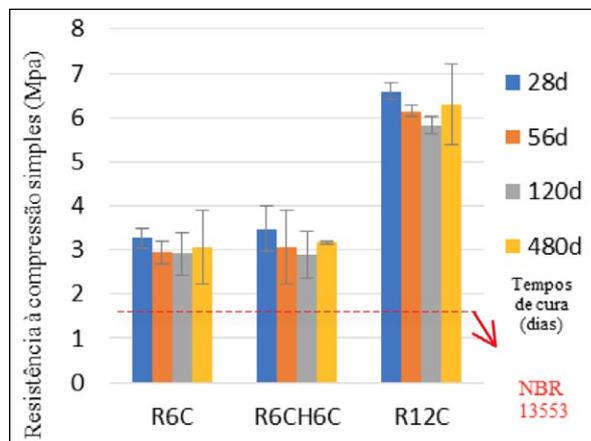


Fonte: Elaboração Própria.

Comparando-se as resistências das formulações R6CH e R12CH, observou-se que não houve variação significativa, mesmo com o aumento da quantidade de cal na mistura, indicando valores abaixo da Norma para solo-cimento para alvenaria de vedação, que é de 1 MPa (ABNT, 2012c). Este fenômeno deve estar relacionado com a carbonatação da cal e baixa reatividade entre as partículas dos resíduos com a cal hidratada.

Os resultados do ensaio de RCS para os resíduos com cimento são apresentados na Figura 8, para tempos de cura de 28 a 480 dias. Para todas as formulações com cimento (R6C, R6CH6C e R12C), foram obtidos valores acima de 1 MPa, com um aumento proporcional nos valores de resistência mecânica da formulação com 6% (R6C) para 12% (R12C) de adição de cimento, estando relacionado a um aumento das reações cimentícias.

Figura 8 – Resistência à compressão simples para os CPC de resíduos com cimento



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados da resistência para a formulação R6CH6C, quando comparados aos valores apresentados pela formulação R6C, não indicam variações significativas, apesar da inclusão da cal na formulação, o que permite um aumento no pH, facilitando a solubilização dos elementos existentes na combinação do resíduo de scheelita e pó de pedra.

Silva (2013) utilizou uma formulação de solo com uma adição de cimento de 12% em um CPC, alcançando a Resistência à Compressão Simples em de 1,73 MPa para 28 dias de cura e de 3,34 MPa para 56 dias de cura, representando um aumento significativo do valor da resistência.

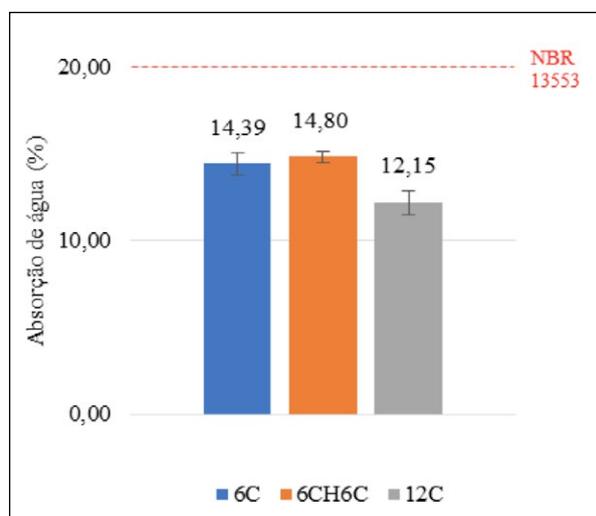
Essa elevação nos valores de resistência à compressão de 28 a 56 dias está associada à formação de silicatos hidratados e aluminatos de cálcios hidratados, pois a composição do solo contém vários minerais argilosos de estruturas menos organizadas, favorecendo uma maior formação de reações cimentícias, incluindo reações pozolânicas.

Na presente pesquisa, não houve alteração significativa nos valores de resistência mecânica com o aumento no tempo de cura para as formulações avaliadas. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são, no entanto, superiores aos valores de Silva (2013), indicando a influência do empacotamento entre as partículas dos resíduos, na resistência mecânica satisfatória dos CPC de resíduos-cimento.

4.3.2 Absorção de água

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água após 7 dias de cura, mostrados na Figura 5, apresentam valores médios inferiores a 20%, estando de acordo com a Norma Brasileira NBR 13553 (ABNT, 2012b). Pode-se destacar que o elevado grau de empacotamento entre os resíduos reduz os espaços vazios, diminuindo a porosidade do sistema.

Figura 9 – Ensaio de absorção de água para formulações com cimento



Fonte: Elaboração Própria.

O menor valor de absorção de água foi obtido para a formulação R12C, indicando que o aumento no teor de cimento leva a uma maior densificação na microestrutura da amostra, estando relacionado ao

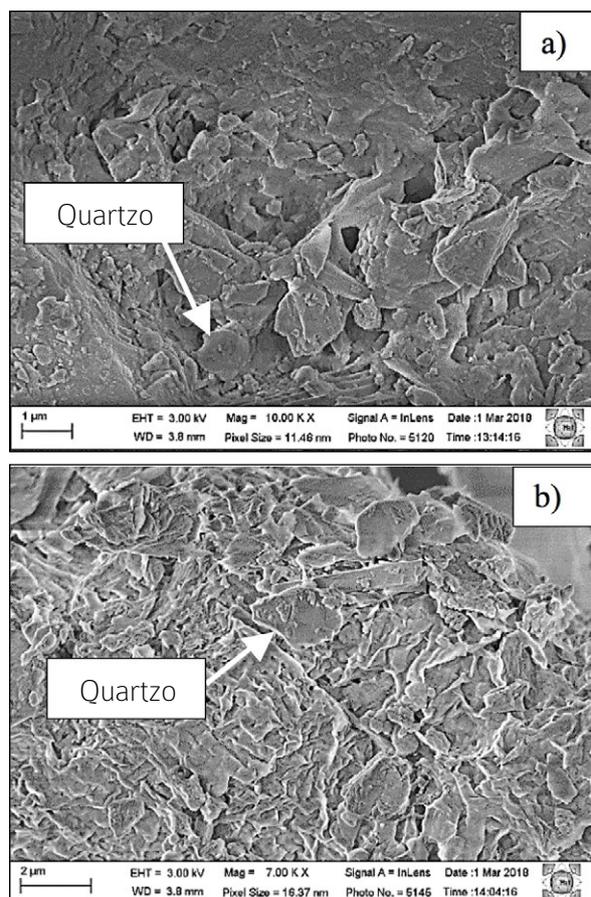
fenômeno físico de refinamento de poros resultante do efeito fíler, reduzindo, assim, a absorção de água.

O ensaio de absorção de água foi também realizado para as composições de cal, entretanto, devido aos efeitos de recarbonatação da interação da cal com o gás carbônico do ar, as amostras não resistiram à pressão hidrostática e sofreram um processo de desagregação de seus componentes,.

4.3.3 Microestrutura da superfície de fratura das formulações.

Na Figura 10, observam-se formações semelhantes a cristais, encontradas em ambos os resíduos, com alguns poros localizados. Não houve variação significativa na morfologia para as formulações R6CH e R12CH. Esse fenômeno está associado à reduzida interação química entre os resíduos e a cal hidratada ao longo do tempo.

Figura 10 – MEV das formulações de resíduos com cal em 90 dias de cura. (a) R6CH com magnitude de 10.000X e (b) R12CH com magnitude de 7.000

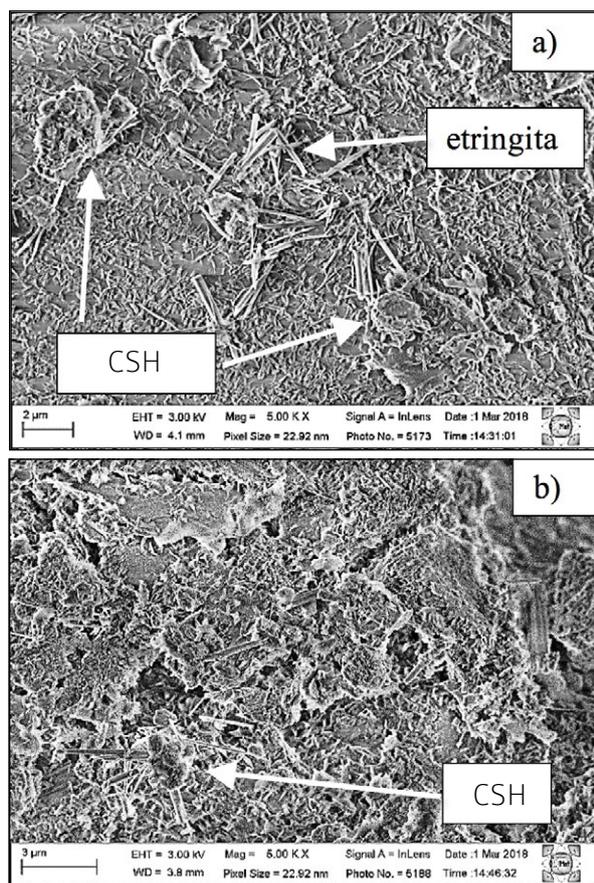


Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 11, verificam-se imagens obtidas pelo MEV de formulações rompidas em 28 dias para composições de cimento, não sendo observadas diferenças significativas nas formulações R6C e R12C. As microestruturas formadas apresentam uma porosidade reduzida quando comparadas àquelas com cal.

Podem-se encontrar alguns flocos esponjosos e ramos fibrosos, semelhantes à etringita e aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), conforme identificados por Mehta e Monteiro (2014). Estruturas semelhantes que utilizavam cimento como agente estabilizador em solos também foram encontradas na literatura, tendo como exemplos os trabalhos de Suganya e Silvapullaiah (2016) e de Rocha e Rezende (2017).

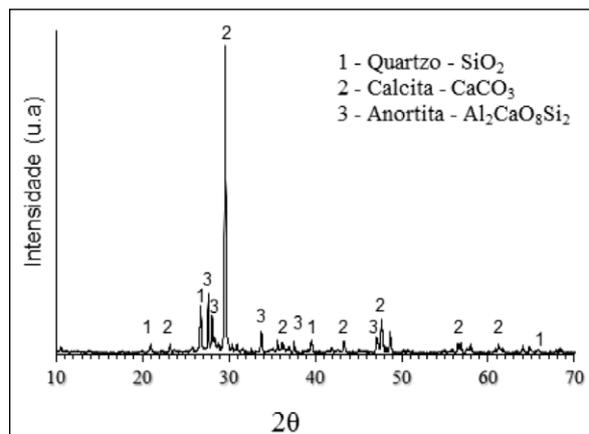
Figura 11 – MEV das formulações de resíduos com cimento para 28 dias de cura com magnitude de 5.000 X. a) R6C e b) R12C



Fonte: Elaboração Própria.

O gráfico de DRX de uma amostra da formulação R6CH (Figura 12) mostra as fases calcita e quartzo – que são as principais fases presentes no resíduo de scheelita (calcita) e pó de pedra (quartzo e anortita), comprovando que, mesmo com a adição do ligante de cal hidratado na água, não ocorreram reações químicas significativas.

Figura 12 – DRX da formulação R6CH

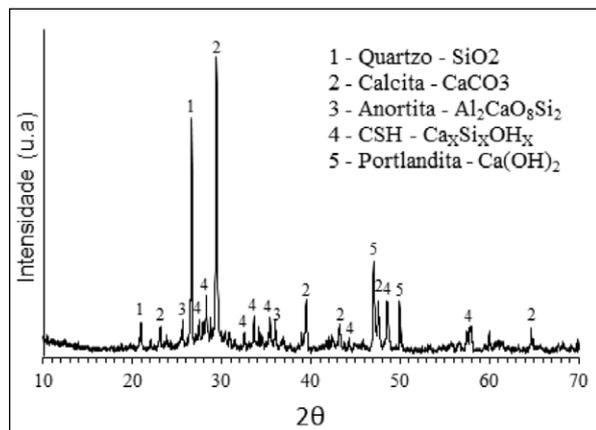


Fonte: Elaboração Própria.

Costa e Pachêco (2018) verificaram a carbonatação da Portlandita (Ca(OH)_2) em pasta de cálcio para vários tempos de cura, indicando a facilidade da formação de calcita (CaCO_3) devido ao contato da portlandita com o ar. No caso do presente trabalho, os ensaios dos corpos de prova com cal foram realizados após 90 dias de cura, para que se pudessem promover reações pozolânicas, caso houvesse pozolanas na mistura, conforme orientado por Mehta e Monteiro (2014). Um maior tempo de exposição ao ar, contribui, porém, para o aumento da carbonatação, justificando a desagregação dos materiais no ensaio de absorção de água por imersão e a baixa resistência à compressão simples.

De acordo com a Figura 13, na formulação R6C, foram constatados vários picos semelhantes aos silicatos de cálcio hidratados, encontrados nas cartas de espectros de raios-X catalogadas como clinotobermorita e tobermorita $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$.

Figura 13 – DRX da formulação R6C



Fonte: Elaboração Própria.

Como verificado na pesquisa de Ipavec *et al.* (2010), em que fases de carboaluminato de cálcio hidratado aparecem como produtos da reação entre vários hidratos de aluminato de cálcio do cimento hidratado e carbonato de cálcio proveniente de calcário adicionado, é provável que uma parte de argilominerais e óxido de cálcio presentes nos resíduos, especialmente o resíduo de scheelita tenha reagido com o cimento, formando silicatos de cálcio hidratados.

A fase de silicato de cálcio hidratado semelhante à clinotobermorita também foi identificada por Braz *et al.* (2018), em sua argamassa, após hidratação do cimento em um composto de resíduos de alumínio, cinzas de bagaço-de-cana e zeólita. A fase tobermorita foi observada no trabalho de Fernández, Ruiz e Cuevas (2015), comprovando que essas fases mineralógicas são idênticas a algumas fases cimentícias.

As propriedades físicas e mecânicas satisfatórias das formulações dos CPC está associada ao alto grau de empacotamento do sistema e das reações químicas de hidratação do cimento e reações com os resíduos, pois, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), o C-S-H contribui significativamente para a resistência do material, uma vez que possui fortes ligações em sua estrutura atômica, além de propriedades aglutinantes, promovendo aumento da resistência mecânica e densificação do material cimentício.

5 Considerações

Com base nas análises dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, análise microestrutural e verificação de fases formadas, pode-se concluir que:

- O elevado grau de empacotamento obtido entre os resíduos contribuiu para baixa porosidade e, conseqüentemente, melhor resistência mecânica;
- As formulações com cal não obtiveram resultados significativos para os ensaios de absorção de água e resistência mecânica;
- As formulações com cimento, mesmo com adição de apenas 6%, apresentaram valores compatíveis com os padrões técnicos atuais do solo-cimento, tendo baixa absorção de água (menor que 20%) e Resistência à Compressão Simples acima de 1 Mpa.
- As reações cimentícias formadas, confirmadas por meio de MEV e DRX, aliadas ao elevado grau de empacotamento, justificam a elevada resistência à compressão e baixa absorção de água quando comparadas com as Normas brasileiras.

Esses resultados promissores incentivam a aplicação conjunta, em melhores combinações, desses resíduos, na fabricação de tijolos e blocos construtivos, possibilitando o uso racional na cadeia produtiva da indústria da construção civil, além de contribuir para a redução de impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ACCHAR, Wilson; DUARTE, João B.; Da SILVA, Vamberto M. Study of the Substitution of Natural Fine Aggregates by Stone Dust in the Concrete of the Portland Cement. **Materials Science Forum**, Vol. 881, p. 331-335. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.881.331>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- AKBULUT H.; GURER C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**, 42 (5), p. 1921-1930.

2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.012>. Acesso em: 05 mar. 2019.

ALMEIDA, A. B. D. de; SOUZA, M. M.; MENDES, L. B.; FARIAS D. S. U. de; LIMA, T. C. de; NÓBREGA, L. F. P. de. Adição de resíduo de scheelita da mina bodó em Cerro Corá/RN na composição de materiais cerâmicos. **Anais do 22º CBECIMAT**, Natal, RN, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio**. Estudo Técnico 35. 63p. São Paulo - SP: ABCP, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7175: Cal Hidratada para argamassa – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12024: Solo Cimento – Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12025: Solo Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos – Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13553 – Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13555 – Solo Cimento – Determinação da absorção de água – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182 – Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica**, 2016c.

BOHANA, M. C. R.; SILVA, F. F. B.; GUIMARÃES, J. C. E MARCHI C. Redução dos resíduos da construção civil: uma tendência para as novas 24 construções.

IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental-COBESA, Cruz das Almas. 2016.

BRAZ, I.G.; SHINZATO, M.C.; MONTANHEIRO, T.J.; DE ALMEIDA, T. M.; DE SOUZA CARVALHO, F.M. Effect of the addition of aluminium recycling waste on the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash and zeolite. **Waste and Biomass Valorization**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0342-6>. Acesso em: 05 mai. 2019.

CAMPOS, HELOISA FUGATTI. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: estudo experimental**. 2015. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.

CHATTERJEE, A. K. **Special Cements**. Chapter 6. In: J. Bensted and P. Barnes. Structure and Performance of Cements. Taylor & Francis e-Library. Second Edition. 2008.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**. 23. 3352-3358. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030>. Acesso em: 15 jun. 2019.

COSTA, M. do R. de M. M. da; PACHECO, A.P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Matéria** (Rio de Janeiro), 23(1), e-11950. Epub. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0286>. Acesso em: 07 jun. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **DNPM. Sumário Mineral 2017**. DNPM, 131 p. 2017.

DUARTE, JOÃO BATISTA. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de cimento Portland**. 2013.86 f. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Centro de Ciências Exatas e da Terra. UFRN, Natal. 2013.

EL-MAHLLAWY M.S. Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. **Construction and Building Materials**, 22 (8), p. 1887-1896. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.007>. Acesso em: 17 jul. 2019.

FERNÁNDEZ, R.; RUIZ, A. I.; CUEVAS, J. Formation of C-A-S-H phases from the interaction between concrete or cement and bentonite. **Clay Minerals**; 51 (2), p. 223–235. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1180/claymin.2016.051.2.09>. Acesso em: 27 jul. 2019.

GERAB, André Tabosa Fernandes de Santa Cruz. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias**. 2014. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014

GODEIRO, M. L. da S.; BORGES JÚNIOR, J. P.; FERNANDES, B. R. B.; LEITE, Y.P. Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina brejuí em concentrador centrífugo. **Holos**, Publicação online do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), Ano 26, Vol. 5. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2010.557>. Acesso em: 25 mar. 2018.

GÓIS, Luciano Costa de. **Estudo da incorporação da cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos.) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2012.

HEBHOUH H., AOUN H., BELACHIA M., HOUARI H., GHORBEL E. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, 25 (3), p. 1167-1171. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>. Acesso em: 20 nov. 2019.

IPAVEC, A., GABROVSEK, R., VUK, T., KAUCIC, V., MACEK, J. AND MEDEN, A. (2010), Carboaluminate Phases Formation During the Hydration of Calcite Containing Portland Cement. **Journal of the American Ceramic Society**, 94, p.1238-1242. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04201.x>. Acesso em: 11 nov. 2019.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário reciclagem de resíduos sólidos domésticos, São Paulo. 2000.

KOLLING, E.M; TROGELLO, E.; MODOLO, A.J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7.3. 2012. p. 185-191. ISSN 1809-8797.

MACHADO, R. V.; ANDRADE, F. V.; PASSOS, R. R.; RIBEIRO, R. C. DA C.; MENDONÇA, E.

S. & MESQUITA, L. F. 2016. Characterization of Ornamental Rock Residue and Potassium Liberation Via Organic Acid Application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40, e0150153. Epub. April 26, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20150153>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MACHADO, T. G.; GOMES, U. U.; MONTEIRO, F. M.; VALCACER, S. M.; DA SILVA, G. G. Analysis of the Incorporation of Scheelite Residue in Kaolinitic Clay of Boa Saúde-RN. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 844-849, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.844>. Acesso em: 15 jan. 2019.

MACHADO, Tercio Graciano. **Study of the addition of residue of scheelite in ceramic matrix: formulation, physical properties and microstructure**. 2012. 144 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MEDEIROS, B. A.; NEVES, G. A.; BARBOSA, N. P.; MENEZES, R. R. E FERREIRA, H. C. Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue. **Cerâmica**, v. 65 (375), p. 443-451. Epub August 15, 2019. Avaliável em: <https://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752571>. Acesso em: 7 ago. 2019.

MEDEIROS, Mauriceia. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. 2016. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016

MEHTA; MONTEIRO, P. K. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Pini. São Paulo, ISBN 978-85-98576-21-3. Português. 751 p. IBRACON. 2014.

OLIVEIRA I. R. DE; STUDART A. R.; PILEGGI R. G.; PANDOLFELLI V. C., **Dispersão e empacotamento de partículas** – princípios e aplicações em processamento cerâmico. Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP: 2000.

PAIVA, Emanuel Henrique Gomes. **Avaliação do concreto de cimento portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica das Estruturas, Estruturas de Concreto e Alvenaria e Materiais e Processos Construtivos) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

QUEIROZ NETO; MEDEIROS, M. K. S.; FLORÊNCIO, F. D. C. e SOUZA JÚNIOR, P. L. **Uso de resíduos**

da mineração de scheelita em argamassas de assentamento e revestimento. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campina Grande/PB, 2016.

ROCHA, M.T.; REZENDE, L.R. DE. Laboratory study of a granular tropical soil chemically stabilized for pavement purposes. **Matéria** (Rio Janeiro). 2017. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0229>. Acesso em: 17 dez. 2019.

ROLIM, M. M.; FREIRE, W.J; BERALDO, A. L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos de prova, tijolos e painéis de solo-cimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Universidade Federal da Paraíba, UFPB, v.3, n-1, p. 89-92. Campina Grande, PB, Brasil. 1999.

SANTANDREA, T. C. S.; MEIRA, F. F. D. A.; OLIVEIRA, J. V. V. **Utilização do resíduo da concentração da scheelita da mina Brejuí na fabricação de tijolos maciços e estudos de recuperação da scheelita residual.** XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belém-PA, 23 a 27 de outubro de 2017.

SILVA, L. C. S.; MARINHO, D. Y.; SILVA FILHO, C. M.; SILVA, E. C. S.; ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 9, 2017, São Cristóvão. **Anais eletrônicos.** São Cristóvão: DEPRO/UFS, 2017, p. 260-274.

SILVA, L. M.; BARROS, S. V. A.; DANTAS, G. C. B.; PIMENTEL, P. M. Caracterização de resíduos minerais visando aplicação como agregado para materiais de matriz cimentícia. **Revista Construindo,** Belo Horizonte, v. 11, n. 01, p. 21-30, jan-jul, 2019.

SILVA, Vamberto Monteiro. **Estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s).** 2013. 117f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SUGANYA, K; SIVAPULLAIAH, P. V. Role of sodium silicate additive in cement-treated Kuttanad soil. **Journal of Materials in Civil Engineering,** v. 28, n. 6, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001538). Acesso em: 17 nov. 2019.

VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J. L. P. Rochas ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência

geológica variedade tipológica, exploração comercial e utilidades como materiais nobres de construção. **Revista de Geociências,** v. 2-2, p. 119-132. Instituto de Geociências – UFF. 2001.