



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

PAULO VICTOR NOBRE SILVA

**ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS**

FORTALEZA

2019

PAULO VICTOR NOBRE SILVA

ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S582a Silva, Paulo Victor Nobre.
Adequação dos resíduos de serragem da Pedra Cariri para a produção de argamassas. / Paulo Victor Nobre Silva. – 2019.
46 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira..
1. Calcário. 2. Pedra Cariri. 3. Argamassa. I. Título.

CDD 669

PAULO VICTOR NOBRE SILVA

ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Pedro Henrique Nogueira Garcia
Provecto Engenharia

A Deus.

Aos meus pais, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu saúde e sabedoria durante todos esses anos.

A meus pais Nilton e Venerables, irmão Diego e tia Salomé pelos ensinamentos e formação que sempre me deram.

À PRAE, pelo apoio por meio das bolsas de auxílio estudantil.

Ao Prof. Dr. Ricardo Emílio, pela orientação e dedicação.

Ao Eng. Pedro Nogueira, pela excelente ajuda na construção deste trabalho.

Ao Dr. Jorge Luiz Cardoso pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

A meus amigos Batista França, Bruna Sampaio, Diego Cesário, Douglas Castro Eila Souza, Eliana Dantas, Eva Morais, Emanuele Gonçalves, Emanuely Rodrigues, Fernando Lemos, Igor Souza, Inácio Montenegro, Lara Maia, Lívia Araújo, Lucas Castro, Melissa Gomes, Paulo Douglas, Priscila Chaves, Rafele Cunha, Sandy Montenegro, Sanny Montenegro, e Wesley Araújo por toda a amizade e paciência.

Às minhas amigas que me acompanham desde o CMCB, Hillane Mirelle e Maria Alice por todo o companheirismo e ajuda nos tempos difíceis.

Aos amigos que tive o privilégio de conhecer na UFC, em especial Alexia Jorge, Anderson Maia, Ângelo Bezerra, Bruno Fontenele, Cícero Targino, Danier Azevedo, Davi Duarte, Fabiano Lima, Felipe Pires, Geilson Martins, Gustavo Sabóia, Jeffeson Vieira, José Rogério, Josué Oliveira, Luís Antônio, Osélio Cândido, Raylene Ribeiro, Renato Evangelista, Rubson Guimarães e Vinícius Moraes por estarem comigo em todos esses momentos de conhecimento ao longo desses anos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, em especial Elineudo, Ênio, Hamilton, Hélio, Igor, Janaína, Jeferson, Marcelo José, Marcelo Motta, Marcondes, Ricardo e Walney por todo o aprendizado.

“Quando o desempenho é medido, ele aumenta. Quando o desempenho é medido e relatado, a taxa de progresso se acelera.”

Thomas S. Monson

RESUMO

Os recursos minerais são muito importantes para a economia do Ceará. As diversificadas jazidas de carbonatos de cálcio (calcários), atualmente, constituem uma grande potencialidade mineral do estado. Devido à exploração do calcário laminado, popularmente chamado de Pedra Cariri, nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, a região se transformou em um importante polo mineral. Utiliza-se a Pedra Cariri, composta basicamente por óxido de cálcio e de coloração variada, para fabricação de revestimentos de paredes e pisos. Sabendo que a atividade mineral é base da economia local e fonte de sustento de muitas famílias da região, esses bens minerais devem ser explorados no sentido de prover melhores condições de vida e de desenvolvimento humano. Todavia, os processos de mineração e beneficiamento de calcário sedimentar laminado produzem uma quantidade de rejeito responsável por danos ao meio ambiente. Diante disso, este trabalho tem como objetivo estudar a influência da adição de Resíduo de Serragem Pedra Cariri (RSPC) na fabricação de argamassas, proporcionando o possível uso dos rejeitos de calcário na formulação de argamassa. Para isso, realizou-se a adição do RSPC em duas etapas: como substituinte parcial da areia e também do cimento. Utilizaram-se os seguintes teores em massa: 15%, 25% e 35%, adotando-se o traço de 1:5, em massa com o índice de consistência de 260 ± 5 mm, com um fator de *a/c* de 0,5. Moldaram-se seis corpos de prova por traço ensaiado com tempo de cura de 7 e 28 dias. Em continuidade, analisaram-se as propriedades das argamassas no estado endurecido. Nesta pesquisa, pôde-se perceber que as propriedades da argamassa no estado endurecido melhoraram quando se substituiu o agregado natural pelo RSPC. Entretanto, a retração foi maior para as argamassas com RSPC. Pode-se concluir que há possibilidade de utilizar até 35% de RSPC em substituição ao agregado natural. Assim, a incorporação desse resíduo ao processo de fabricação das argamassas pode ocasionar uma redução nos impactos ambientais gerados a partir do descarte inadequado do resíduo.

Palavras-chave: Calcário. Pedra Cariri. Argamassa.

ABSTRACT

Mineral resources are very important for Ceará's economy. The diversified deposits of calcium carbonate (limestone) currently constitute a great mineral potential of the state of Ceará. Due to the exploitation of laminated limestone, popularly called Stone Cariri, in the municipalities of Nova Olinda and Santana do Cariri, the region has become an important mineral hub. The Cariri Stone, basically composed of calcium oxide and of various colors, is used to manufacture wall and floor coverings. Knowing that mineral activity is the basis of the local economy and a source of livelihood for many families in the region, these mineral assets must be exploited to provide better living and human development conditions. However, the mining and beneficiation processes of rolled sedimentary limestone produce an amount of waste that is responsible for environmental damage. Therefore, this work aims to study the influence of the addition of Cariri Stone Sawdust Residue (RSPC) in the manufacture of mortars, providing the possible use of limestone tailings in the mortar formulation. For this, RSPC was added in two steps: as a partial substitute for sand and also for cement. The following mass contents are used: 15%, 25% e 35%. The adopted trait was 1: 5, in mass with a consistency index of 260 ± 5 mm, with an a/c factor of 0.5. Six specimens were molded per tested stroke with curing time of 7 and 28 days. In continuity, the properties of the mortars in the hardened state were analyzed. In this research, it was observed that the properties of the hardened mortar improved when the natural aggregate was replaced by RSPC. However, the shrinkage was higher for mortars with RSPC. It can be concluded that up to 35% of RSPC can be used in place of the natural aggregate. Thus, the incorporation of this waste in the mortar manufacturing process can lead to a reduction in the environmental impacts generated from the inappropriate disposal of the waste.

Keywords: Limestone. Stone Cariri. Mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Praça Capitão Plácido: Nova Olinda, CE	16
Figura 2 - Floresta nacional do Araripe	17
Figura 3 - Mapa do estado do Ceará localizando o Geoparque Araripe.....	18
Figura 4 - Libélula fóssil (Santana do Cariri)	18
Figura 5 - Geossítio Pedra Cariri na Chapada do Araripe	19
Figura 6 - Pedra Cariri	20
Figura 7 - Local de exploração do calcário laminado	22
Figura 8 - Casa de Pedra	24
Figura 9 - Pedra cariri para processo de moagem.....	25
Figura 10 - Esquema de moinho de bolas	26
Figura 11 - Moinho de bolas (Q298)	26
Figura 12 - Jarro de bolas em rotação no moinho	27
Figura 13 - Pedra Cariri no interior do jarro após ciclo de moagem	27
Figura 14 - Aspecto do resíduo passante	28
Figura 15 - Pó resultante do processo de moagem	28
Figura 16 - Curva granulométrica da areia natural	30
Figura 17 - Quarteador Jones	31
Figura 18 - Corpo de prova durante processo de cura	32
Figura 19 - Corpos de prova para ensaio de retração	33
Figura 20 - Difratômetro	36
Figura 21 – Difratograma do RSPC	36
Figura 22 – Resistências à tração na flexão (7 e 28 dias)	37
Figura 23 - Resistências à compressão (7 e 28 dias)	39
Figura 24 - Retração por secagem	40
Figura 25 - Comportamento das argamassas: absorção de água	41
Figura 26 - Comportamento das argamassas: índice de vazios	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do RSPC.....	21
Tabela 2 – Reservas medidas dos rejeitos do calcário da pedra cariri.....	23
Tabela 3 – Propriedades do cimento CP II Z-32	29
Tabela 4 – Distribuição de dimensões do cimento utilizado	29
Tabela 5 – Propriedades do agregado natural utilizado na pesquisa	30
Tabela 6 – Resultados da caracterização física do RSPC	34
Tabela 7 – Composição mineralógica do resíduo da Pedra Cariri	35
Tabela 8 – Resistência à tração na flexão	37
Tabela 9 – Resistências à compressão	38
Tabela 10 – Absorção por imersão e Índice de vazios	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Aspectos históricos e culturais	16
3.2	O Geoparque	17
3.3	O Geossítio	18
3.4	Mineração na região	19
3.5	Pedra Cariri	20
3.5.1	Caracterização química e mineralógica	21
3.5.2	Extração e impactos ambientais	21
3.5.3	Utilização na construção civil	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Materiais	25
4.1.1	Resíduo de Serragem de Pedra Cariri – RSPC	25
4.1.2	Cimento Portland	28
4.1.3	Agregado natural	29
4.1.4	Água	31
4.2	Métodos	31
4.2.1	Propriedades das argamassas no estado endurecido	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Caracterização física do RSPC	34
5.2	Caracterização química do RSPC	35
5.3	Análise das propriedades das argamassas no estado endurecido	37
5.3.1	Resistência à tração na flexão	37
5.3.2	Resistência à compressão	38
5.3.3	Retração por secagem	39
5.3.4	Absorção por imersão e índice de vazios	40
6	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

As primeiras referências sobre rochas ornamentais, no Estado do Ceará, são creditadas ao “Projeto Pedras Ornamentais nas Regiões Norte-Nordeste, Leste e Oeste do Estado do Ceará”, executado pela CEMINAS, no ano de 1982. (MELO; CASTRO *apud* CARVALHO, 2004).

Localizados na Chapada do Araripe, os municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri possuem grandes concentrações de calcário sedimentar laminado, comercialmente conhecido por Pedra Cariri.

A “Pedra Cariri” é um calcário disposto em finas camadas de sedimentos pertencentes ao membro Crato (Formação Santana), depositados há aproximadamente 112 milhões de anos (Período Cretáceo), quando neste local existia um lago de águas calmas, com brejos nas suas margens, onde uma biodiversidade abundante se desenvolvia (LIMA *et al*, 2012).

Desde o século XIX as lavras de calcários são utilizadas na construção civil principalmente na aplicação em pisos, calçadas e revestimentos de paredes. O calcário começou a ser extraído na região, na década de 1940, a partir da exploração de gipsita. A partir de 1970, começou, efetivamente, sua exploração comercial (CASTRO; MELLO; VIDAL, 2009). De 1980 a 1990, houve incremento da produção, acompanhada do crescimento do setor de rochas ornamentais (PADILHA *et al. apud* CASTRO; MELLO; VIDAL, 2009). A pedra Cariri é explorada, há mais de 40 anos, para uso como revestimento no sul do estado do Ceará. (CASTRO, 2009).

Segundo a Agência Nacional de Mineração – ANM, em seu anuário de 2018, são aproximadamente 8 bilhões de toneladas de reserva de calcário. A indústria da extração e beneficiamento de rochas ornamentais de calcário laminado (conhecidas comercialmente como Pedra Cariri), utilizado no revestimento interno e externo de pisos, gera uma enorme quantidade de resíduos, tanto na sua extração, como no seu beneficiamento. (VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, 2005)

Os resíduos sólidos são restos provindos de atividades humanas ou de processos industriais, os quais podem ser muito nocivos ao meio ambiente. A geração deles é uma etapa do processo produtivo que causa preocupação à humanidade a respeito do seu gerenciamento. Se não forem destinados adequadamente, podem poluir a água, o ar e o solo. Daí, exige-se uma urgência no aproveitamento dos resíduos gerados.

No método e processo de lavra da Pedra Cariri, é possível perceber uma grande quantidade de material desperdiçado devido à utilização de tecnologias inadequadas às condições das jazidas e à falta de acompanhamento técnico especializado.

Durante a etapa de beneficiamento, no processo de serragem das placas, é gerado o Resíduo de Serragem de Pedra Cariri - RSPC (BASTOS, 2014), que consiste de um material fino, na forma de pó. O RSPC é gerado em duas etapas do processo: na etapa de extração da lajota, com o uso da cortadeira móvel; e na etapa de esquadrejamento das placas de pedra Cariri, que se dá pela serragem das placas nas dimensões comerciais. (MOURA; LEITE; BASTOS, 2013)

Segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2005), as etapas da cadeia produtiva eram realizadas de forma precária. Não havia utilização de técnicas adequadas nas etapas de cadeia produtiva, o que gerava acúmulo de pilhas de rejeitos, desperdiçando, assim, o material.

Correia, Vidal e Ribeiro (2005) afirmam que a maioria dos produtores realizam a etapa inicial de lavra na região do Cariri sem nenhuma mecanização. Além disso, ressaltam que as operações que vão da lavra ao processamento podem acarretar uma perda de material de cerca de 70%.

Os impactos socioambientais decorrentes da exploração desse minério, associados ao esgotamento de jazidas, têm estimulado estudos que visam a incorporar resíduos da construção civil na produção de argamassas e concretos. A utilização deles, além de preservar o meio ambiente, proporcionando uma destinação mais adequada dos rejeitos, apresenta-se como uma excelente maneira de preservar as reservas naturais de matéria-prima, aumentando assim a vida útil das jazidas.

O meio científico vem buscando dar sua contribuição à reciclagem de resíduos sólidos, desenvolvendo pesquisas de aproveitamento de resíduos minerais.

2 JUSTIFICATIVA

Ciente das grandes reservas de calcário existentes na região e o fato de que a industrialização do calcário é uma atividade econômica em expansão com perspectiva crescente de novos mercados, torna este projeto útil do ponto de vista técnico, científico, econômico e social. Pois além de minimizar os danos causados ao meio ambiente, decorrentes do uso indevido dos resíduos sólidos da indústria mineradora ou rejeito de mineração, tem por finalidade proporcionar aos pequenos mineradores meios de obtenção de um melhor retorno econômico. O trabalho justifica-se na medida em que propõe a utilização do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri para a viabilização na elaboração de argamassas, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais gerados por ele.

2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri como fíler na produção de argamassas.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a moagem do resíduo de Pedra Cariri para ser aplicado como material em argamassas.
- Realizar a caracterização física do RSPC;
- Realizar a caracterização química do RSPC;
- Examinar as propriedades no estado endurecido de argamassas com diferentes teores de RSPC (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, retração por secagem, absorção por imersão e índice de vazios).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos históricos e culturais

Com 284.401 km², população estimada de 15.520 habitantes (IBGE, 2018) e densidade demográfica de 50,13 hab/km² (IBGE, 2010), primitivamente chamou-se Tapera, porém em razão do seu aspecto geográfico, um missionário pernambucano mudou o topônimo para Nova Olinda (Figura 1). Pertencente ao município de Santana do Cariri, fazendo divisa com Pernambuco, Piauí e Paraíba, o então povoado passou à categoria de distrito, por força do decreto nº 1.256, de 4 de dezembro de 1933. Nova Olinda foi elevada a município, pela lei nº 3.555, de 14 de março de 1957 e instalado no dia 26 de abril do mesmo ano (IBGE, 2019).

Figura 1 - Praça Capitão Plácido: Nova Olinda, CE



Fonte: IBGE

A extração do calcário laminado é muito importante para a economia desse e de outros municípios da região, pois segundo Castro (2009), a produção da Pedra Cariri representa a principal fonte de renda dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, empregando milhares de trabalhadores. A região também conta com grande potencial para o turismo geocientífico, por abranger parte do território do primeiro Parque Natural protegido por lei (Decreto-Lei nº 9.226, de 2 de maio de 1946), a Floresta Nacional do Araripe- Apodi (Figura 2), a qual integra a Seção de Parques Nacionais do Serviço Florestal.

Figura 2 - Floresta Nacional do Araripe



Fonte: Lima (2012)

3.2 O Geoparque

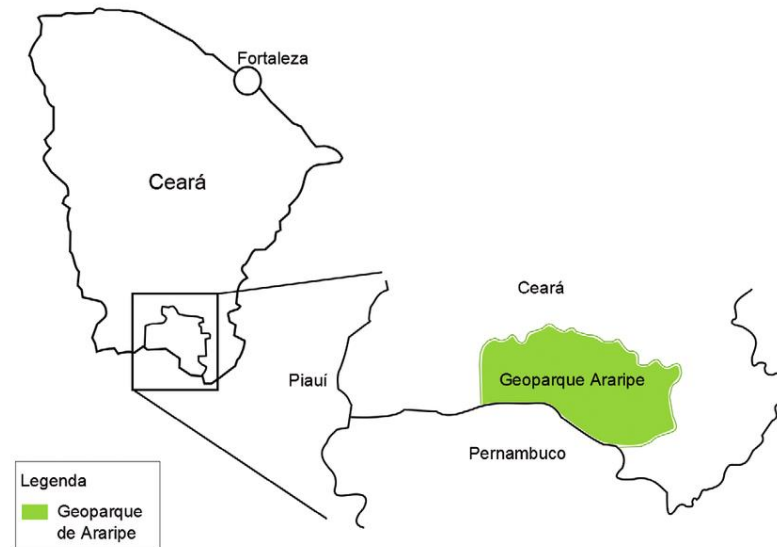
Um geoparque representa uma área grande e com limites bem definidos para servir ao desenvolvimento econômico local. Deve gerar atividade econômica, através do turismo, e envolver um número de sítios geológicos de importância científica e com potencial uso didático ou turístico (CPRM, 2006).

O Geoparque Araripe (GA), primeiro das Américas reconhecido pela Rede Global de Geoparques, fica localizado entre os estados do Ceará, Pernambuco e Piauí (Figura 3). Foi criado em 2006, através de iniciativas do Governo do Estado do Ceará em parceria com a Universidade Regional do Cariri (URCA). “Este Geoparque é um lugar excepcional que convida a uma viagem em busca de formas de vida do passado da nossa Terra. Notavelmente preservados, fósseis de insetos, plantas, répteis voadores, peixes em três dimensões, no interior de nódulos, tartarugas e crocodilos, fazem-nos reviver um mundo que existiu há 120 milhões de anos” (LIMA, 2012).

De acordo com Mochiutti *et al* (2012), O Geoparque:

Possui uma área de aproximadamente 3.441km² e que corresponde ao contexto territorial das cidades de Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Missão Velha, Nova Olinda e Santana do Cariri. É formado por nove geossítios de interesse, definidos pela relevância geológica, paleontológica, histórica, cultural e ecológica. São eles: Geossítio Colina do Horto, Cachoeira de Missão Velha, Floresta Petrificada do Cariri, Batateiras, Pedra Cariri, Parque dos Pterossauros, Riacho do Meio, Ponte de Pedra e Pontal da Santa Cruz.

Figura 3 - Mapa do estado do Ceará localizando o Geoparque Araripe



Fonte: Priscila Valentin (2013)

Abaixo há a figura de um fóssil de libélula (*Cordulagomphus andreli*, Bechly 1998), do Cretáceo Inferior, um dos mais belos e impressionantes encontrados no GA e que compõe o acervo do Museu de Paleontologia da URCA.

Figura 4 - Libélula fóssil (Santana do Cariri)



Fonte: Lima (2012)

3.3 O Geossítio

Geossítios são locais de elevado interesse geológico, pelo seu valor científico, pedagógico, econômico, cultural, estético, etc. Eles podem apresentar elevado interesse ecológico, arqueológico, histórico e cultural. Isso os leva a apresentarem maior identidade com a região onde se inserem (LIMA, 2012).

O Geossítio Pedra Cariri (Figura 5) está localizado a 4 km da cidade de Nova Olinda, às margens da rodovia CE-166 (sentido Nova Olinda - Santana do Cariri), na localidade de Pedra Branca.

A unidade geológica predominante é o Membro Crato, pertencente à Formação Santana composta de estratos horizontalizados de rocha calcária, intercalados a folhelhos, siltitos e arenitos depositados no Cretáceo Inferior (MOCHIUTTI *et al*, 2012).

Figura 5 - Geossítio Pedra Cariri na Chapada do Araripe



Fonte: Geopark Araripe (2007)

3.4 Mineração na região

Neves e Silva (2007) afirmaram que há cerca de 55 minerais sendo estudados no Brasil, cada qual com sua dinâmica de mercado específica. Além disso, a mineração é um vetor importante para o desenvolvimento regional, pois é um relevante fator de atração de contingentes populacionais. Com isso, o impacto econômico cresce na medida em que as minas são identificadas.

“Um enfoque especial é reservado ao Ceará, estado que apresenta notável vantagem competitiva relacionada à ocorrência de grande variedade de rochas ornamentais, bastante valorizadas comercialmente, no mercado interno e externo” (CARVALHO, 2004).

De acordo com Vidal, Fernandes e Pequeno (2008),

A Região do Cariri é reconhecida como um grande polo da atividade de mineração do Ceará devido aos seus potenciais depósitos de calcários laminados, conhecidos

como Pedra Cariri. Desde os anos 40, a mineração está presente no Cariri Cearense, inicialmente, tal atividade estava direcionada a extração da gipsita, no município de Santana do Cariri; concomitantemente a esta exploração, o calcário laminado, inicialmente denominado na Região como Pedra Santana era retirado de forma artesanal, pelos moradores dos municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda, para uso na construção de alicerces, pisos e revestimentos de residências.

Há muitos estudos sobre os resíduos da mineração devido ao impacto ambiental causado quando descartados na natureza. “Em geral esses resíduos são descartados em lagos, rios, faixas de domínios de rodovias e ao redor de mineradoras (ou empresas de beneficiamento) causando uma série de agressões à fauna e flora, bem como à saúde da população, principalmente quando se encontra em forma seca e pulverulenta” (MENEZES, 2002).

As rochas do Membro Crato constituem uma importante jazida de calcário. A sua atividade mineira proporciona, além da destruição do patrimônio fossilífero, agressão à paisagem local, através do assoreamento de riachos e do aumento de zonas de erosão. Há urgência em medidas de preservação como a criação de parques temáticos, incrementando a economia regional com atividades ecoturísticas (VIANA; NEUMANN, 2007).

3.5 Pedra Cariri

O Calcário sedimentar da Chapada do Araripe, situada no sul do estado do Ceará, é composto essencialmente por carbonato de cálcio e utilizado na indústria de pedras naturais em forma de lajota conhecida comercialmente como Pedra Cariri (Figura 6) (SILVA, 2008).

A Pedra Cariri geralmente apresenta coloração de amarelada a creme, tendo algumas variações de cor amarronzada e cinza em função de sua composição química.

Figura 6 - Pedra Cariri



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.1 Caracterização química e mineralógica

Moura, Leite e Bastos (2013), por meio de espectroscopia de raios-X por dispersão em energia – EDX, realizaram análise química dos componentes da Pedra do Cariri em porcentagem de massa (Tabela 1). Com isso, constataram que esse é um material composto basicamente de óxido de cálcio, com mais de 95% desse constituinte em sua composição. A coleta do material foi realizada de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004).

A seguir, há os resultados da composição química do RSPC coletado em uma empresa filiada à Cooperativa de Mineração dos Produtores da Pedra Cariri – Ceará (Coopedras), na cidade de Nova Olinda.

Tabela 1 - Composição química do RSPC

Óxidos	Teor (%)
CaO	95,27
SiO ₂	1,37
Fe ₂ O ₃	1,33
SO ₃	1,26
MnO	0,43
SrO	0,25
ZnO	0,05
CuO	0,03

Fonte: Moura, Leite e Bastos (2013)

3.5.2 Extração e impactos ambientais

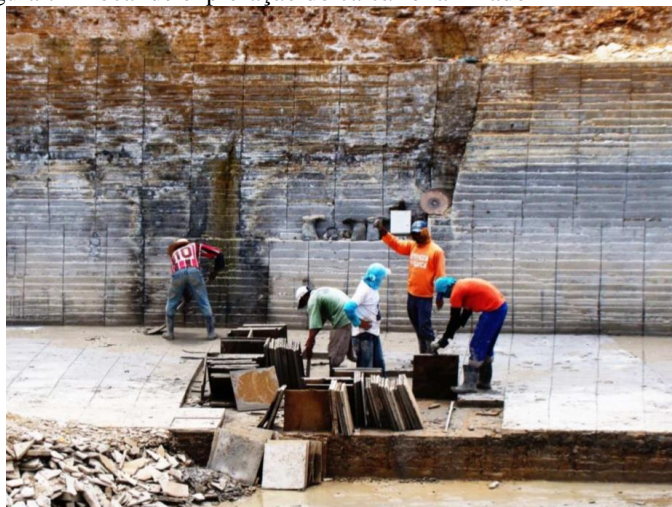
Fatores ambientais são os responsáveis diretos por mudanças profundas na estrutura da economia mineral em todo o mundo e, em particular, nas atividades de mineração – rochas ornamentais e minerais industriais, perante as quais cresce a pressão social extensiva a outras atividades mineradoras que exercem maior impacto sobre o meio ambiente (CARVALHO, 2004). A exploração da Pedra Cariri ocasiona uma geração de empregos nas localidades de extração e é importante no conhecimento científico, pois possibilita descobrir espécies nunca antes conhecidas (RODRIGUES; GURGEL, 2018).

Muitos são os impactos negativos que a mineração de rochas ornamentais causa ao meio ambiente, desde o desenvolvimento até o encerramento das atividades de lavra, pois segundo Filho (2009), gera uma grande quantidade de rejeitos que formam entulhos, fecham drenagens e obstruem riachos. Além disso, há uma grande quantidade de material

desperdiçado devido a tecnologias inadequadas ou falta de acompanhamento técnico especializado.

Durante a extração da Pedra Cariri (Figura 7) há danos ao meio ambiente que precisam ser avaliados por conta do descarte aleatório dos materiais gerados durante a extração. Entre os problemas associados à extração estão o mercado ilegal de fósseis e a degradação do solo, entre outros (MORAES, 2018).

Figura 7 - Local de exploração do calcário laminado



Fonte: Filho (2009)

A área total de extração de calcário laminado em Nova Olinda abrange 1.737,14 hectares. Já em Santana do Cariri, é de 2.824,39 hectares nas áreas concedidas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Essa superfície total inclui setores de exploração mineral, áreas de servidão, áreas de preservação ambiental e área de preservação permanente (FILHO, 2009).

Rodrigues e Gurgel (2018) constataram que o processo de exploração da Pedra Cariri sofreu poucas evoluções, pois pouco se foi implantado em tecnologia e técnicas de exploração ao longo das últimas duas décadas prejudicando a atividade no âmbito comercial, econômico e ambiental. Isso tornou o preço comercial da pedra relativamente baixo, em média de R\$ 14,00 por metro quadrado.

De acordo com Vidal, Fernandes e Pequeno (2007),

Devido ao fato do calcário sedimentar apresentar características de baixa absorção de calor e por ser de fácil exploração na Região, a extração e beneficiamento da Pedra Cariri cresceu e ganhou nome no mercado nacional, porém, ainda não se modernizou, e ainda enfrenta grandes problemas tecnológicos e mercadológicos, condicionados aos métodos e técnicas rudimentares de lavra e beneficiamento, comprometendo o valor agrado de seus produtos finais.

Consoante Correia, Vidal e Ribeiro (2006), em algumas pedreiras, a lavra é conduzida de forma semimecanizada, através da utilização de máquinas de corte móveis. As placas são selecionadas manualmente e transportadas para o beneficiamento nas serrarias. Essa atividade gera, nas frentes de lavra, uma grande quantidade de rejeitos que impactam o meio ambiente, por formar entulhos, fechar drenagens e obstruir riachos, gerando um impacto visual desagradável.

Os principais problemas ambientais, derivados das baixas taxas de aproveitamento da lavra da Pedra Cariri, são as pilhas de rejeitos acumuladas nas pedreiras e nas unidades de processamento, a erosão de encostas e áreas desmatadas, e o assoreamento dos riachos e do rio principal da região, o Cariús (VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, 2005).

Tabela 2 - Reservas medidas dos rejeitos do calcário da pedra cariri.

Município	Volume (m³)
Nova Olinda	755.000,00
Santana do Cariri	275.000,00

Fonte: Silva (2008)

Há necessidade urgente de planejamento ambiental para as áreas de extração dos calcários laminados a fim de se evitarem maiores riscos e danos à região (OLIVEIRA, 2006). Para diminuir os impactos ambientais resultantes da atividade humana, visando ao desenvolvimento sustentável e à melhoria contínua, foram estabelecidas diretrizes nas Resoluções CONAMA nº 01, de 23/jan/1986, e CONAMA nº 237, de 19/dez/1997, que regulamentam a Política do Meio Ambiente. Ademais, há trabalhos que envolvem governo, universidades e institutos tecnológicos para o aproveitamento do material e para evitar o grande desperdício.

3.5.3 Utilização na construção civil

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que consome entre 20% e 50% de todos os recursos naturais extraídos (JHON, 2000).

A utilização de resíduos na construção civil, além de preservar o meio ambiente, proporcionando uma destinação mais adequada dos resíduos, apresenta-se como uma boa maneira de preservar as reservas naturais, prolongando a vida útil das jazidas.

Segundo Bastos (2014),

O concreto, um dos materiais mais usados na construção, pode incorporar subprodutos de indústrias, em substituição ao material aglomerante ou aos agregados, o que contribui para a conservação de recursos naturais e melhoria de seu desempenho quanto ao aspecto de resistência e durabilidade. Em decorrência disso, a utilização de adições no concreto de cimento Portland aumentou consideravelmente nos últimos tempos, proporcionando, além da melhoria do desempenho mecânico e das características de durabilidade, redução nos custos de produção de concreto. As adições minerais podem apresentar efeito físico (adições do tipo filer) ou efeito físico e químico. (adições do tipo pozolana). Os resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais são exemplos de adição do tipo filer, em cujo grupo está inserido o resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC).

Miranda (2008) afirma que o elevado consumo do cimento Portland, segundo material mais consumido pelo homem, tem motivado um desafio, o qual consiste em propor inovações alternativas que diminuam os impactos ao meio ambiente. Nesse contexto, ganha ênfase a possibilidade de utilização de resíduos da mineração provenientes da extração e beneficiamento de rochas ornamentais.

O Brasil, por ser um dos maiores produtores desse tipo de rocha, faz com que a exploração da Pedra Cariri encaixe-se nessa potencialidade, pois a pedra ao ser incorporada no concreto pode melhorar suas propriedades permitindo reduzir a quantidade de cimento Portland para a obtenção das características mecânicas desejadas, diminuindo a agressão ao meio ambiente.

Mochiutti *et al* (2012) observaram que além do valor científico inestimável do jazigo fossilífero, a pedra do Cariri também possui um valor econômico representativo. Seu uso na construção civil é muito comum nesta região e em todo o Brasil, desde as casas mais simples até as mais sofisticadas, principalmente como rocha ornamental (Figura 8).

Figura 8 - Casa de Pedra



Fonte: UFRJ (2015)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos durante a pesquisa. Para execução desta pesquisa foram utilizados resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC), cimento Portland, agregado natural, e água.

4.1 Materiais

4.1.1 Resíduo de Serragem de Pedra Cariri – RSPC

Para o estudo, utilizaram-se placas de Pedra Cariri fornecidas pelo Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos (LDMC), Campus do Pici, da Universidade Federal do Ceará (UFC). Inicialmente elas foram rompidas manualmente para que um menor tamanho do material fosse utilizado no processo de moagem. Essas pedras quebradas possuem tamanho médio de 10 cm (Figura 9).

Figura 9 - Pedra cariri para processo de moagem



Fonte: Elaborado pelo autor

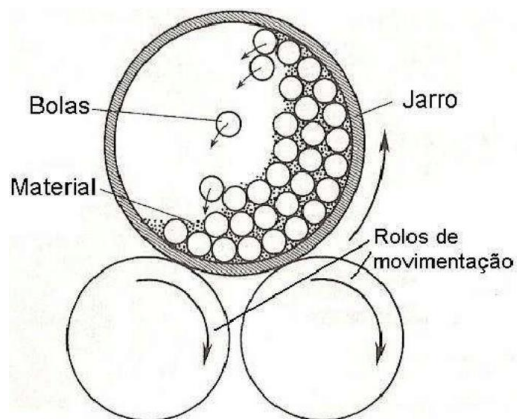
Ribeiro e Abrantes (2001) afirmam que o processo de moagem tem como objetivo diminuir o tamanho das partículas de um material sólido, misturar de um modo mais uniforme vários materiais e permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização.

O moinho de bolas é um aparelho auxiliar na moagem de materiais através do sistema de jarro e esferas de porcelana ou inox. Moinhos cilíndricos de bolas utilizam bolas como meio moedor e são utilizados para moagens mais finas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Esse é um dos processos clássicos para a fabricação de pós a partir de materiais frágeis, utilizando-se para isso impacto mecânico através de bolas. A Figura 10 apresenta um esquema de um jarro carregado com bolas e o material a ser moído. Como o jarro gira em

torno do seu eixo, as bolas colidem continuamente com o material, transformando-o em pó (ZANATTA, 2007).

Figura 10 - Esquema de moinho de bolas.



Fonte: German (1994)

Consoante Zanatta (2007), a rotação do jarro é rápida o suficiente para conduzir as bolas ao topo do jarro e deixá-las cair sobre o material. Se a rotação for muito baixa as bolas na sua maioria irão apenas rolar umas sobre as outras, se for muito alta a força centrífuga impedirá a queda.

Com o objetivo de atingir menor granulometria do material, utilizou-se um moinho de bolas - Q298 semelhante ao da Figura 11.

Figura 11 -Moinho de bolas (Q298)



Fonte: Minicatálogo Quimis 28ª Edição 2014

O moinho acomoda jarros (Figura 12), de 1 a 25 litros de capacidade, que se destinam a pequenas moagens. Eles são fabricados em porcelana, acompanhados de tampa e borracha para vedação. Usa-se uma armação de ferro a fim de fixar a tampa e servir de apoio para o giro. A rotação recomendada é de 35 a 45 rpm. Seu funcionamento processa-se sobre rolos

giratórios revestidos com borracha que são apoiados em mancais reguláveis. O comprimento do rolo é de 48 cm e opera com rotação de frequência de 150 rpm no rolo de tração.

Figura 12 - Jarro de bolas em rotação no moinho.



Fonte: Elaborado pelo autor

O material foi submetido a uma secagem livre por 24 h e passou por um processo de moagem no LDMC através do processo no moinho de bolas. A Figura 13 mostra os resíduos da Pedra Cariri após ciclo de moagem

Figura 13 - Pedra Cariri no interior do jarro após ciclo de moagem

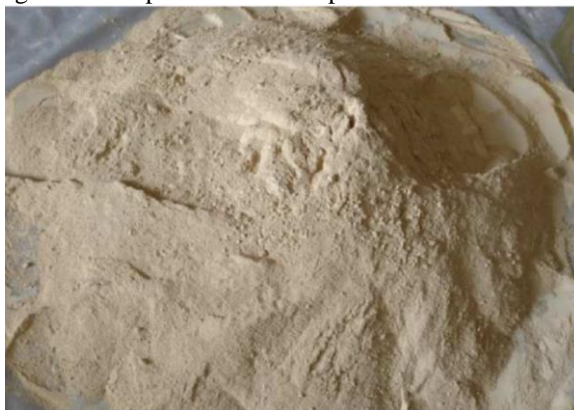


Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar a presença de pó gerado devido aos choques entre as pedras e as bolas no jarro. Após essas etapas, o material passou por processos de destorroamento, quarteamento e peneiramento. Em seguida, o resíduo destorroado e seco foi submetido a passagem por uma peneira de 4,8 mm de abertura. Em continuidade, foi submetido a um processo de secagem em estufa a 110 °C por 24 h. Já que se tratava de um resíduo que iria ser

empregado na formulação de argamassas, foi passado por uma peneira em malha de 2,4 mm. Dessa forma, foi possível obter a redução do tamanho da matéria até que houvesse uma granulometria final desejada. A Figura 14 representa o aspecto do resíduo após o peneiramento.

Figura 14 - Aspecto do resíduo passante.



Fonte: Elaborado pelo autor

O resíduo apresentou um aspecto desejável para a utilização como agregado miúdo em argamassas e concretos. Posteriormente, o material foi pesado e acomodado em sacolas (Figura 15) até que se obtivessem as quantidades ideais a serem utilizadas na produção dos corpos de prova.

Figura 15 - Pó resultante do processo de moagem



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z-32), da marca Poty. Ele foi escolhido devido à facilidade de comercialização na região do estudo. O cimento Portland composto é um dos mais utilizados no Brasil e possui muitas possibilidades de aplicação. A caracterização foi realizada de acordo com as especificações

das normas brasileiras vigentes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3 e foram avaliados com base na norma de especificação, NBR 11578 (ABNT, 1997).

Tabela 3 - Propriedades do cimento CP II Z-32

Propriedades avaliadas	Resultados obtidos	Limites da NBR 11578(ABNT,1997)	Norma
Massa específica	2,93 kg/dm ³	-	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Índice de finura	0,85%	≤ 12,0%	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Resistência à compressão	7 dias - 29,2 (MPa) 28 dias -36,5(MPa)	≥ 20Mpa ≥ 32Mpa	NBR 7215 (ABNT, 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados obtidos, observa-se que o cimento atendeu aos limites dos parâmetros da referida norma.

No Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFC, realizou-se a granulometria do cimento através do analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec Plus, com unidade de dispersão úmida. O dispersante utilizado foi o de pirofosfato de sódio, a 0,09 g/L. Assim, foram obtidas as distribuições de tamanhos das partículas para D₉₀, D₅₀, D₁₀, cujos resultados representam a dimensão de partículas em que, respectivamente, 90%, 50% e 10% do total de partículas são menores que os valores indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição de dimensões do cimento utilizado

Distribuição de tamanhos	Diâmetro (µm)
< 90 (D ₉₀)	33
< 50 (D ₅₀)	16
< 10 (D ₁₀)	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio desses resultados, é possível notar que o cimento utilizado apresenta diâmetro médio de 16 µm. Resultado coerente com aqueles cimentos com adição pozolânica.

4.1.3 Agregado natural

O agregado natural em estudo é uma areia que provém da cidade de Fortaleza. A caracterização do agregado miúdo natural segue as seguintes normas brasileiras vigentes: NBR NM 30 (ABNT, 2001); NBR NM 46 (ABNT, 2003); NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR NM 45 (ABNT, 2006); NBR 6467 (ABNT, 2006) e NBR NM 52 (ABNT, 2009). Para isso, as seguintes características foram analisadas: dimensão máxima característica, módulo

de finura, massa específica, absorção de água, massa unitária, inchamento e material pulverulento. Determinaram-se tais propriedades no LMCC da UFC e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

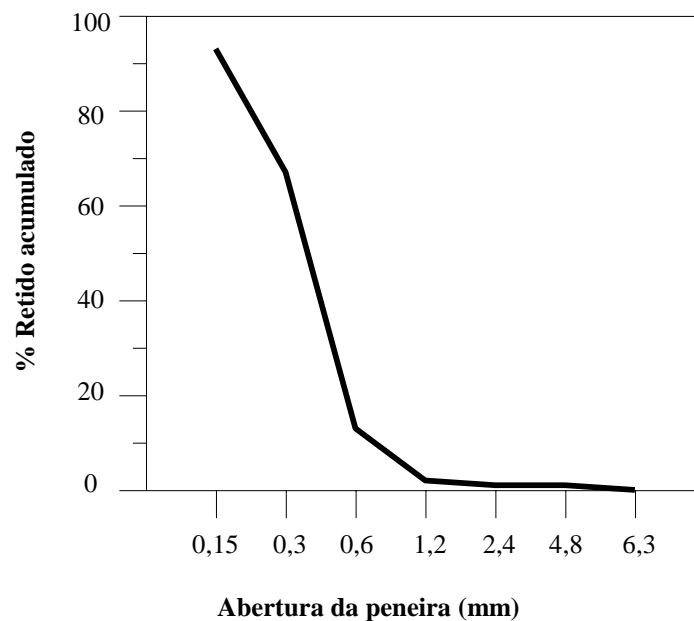
Tabela 5 - Propriedades do agregado natural utilizado na pesquisa

Propriedades avaliadas	Resultados	Norma
Dimensão máxima característica	1,2 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	1,77	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica aparente	2,61 (kg/dm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa específica S. S. S	2,62 (kg/dm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa específica agregado seco	2,62 (kg/dm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Absorção de água	0,09 %	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Massa unitária	1,62 (kg/dm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Coefficiente de inchamento médio	1,30	NBR 6467 (ABNT, 2006)
Unidade crítica	1,50 %	NBR 6467 (ABNT, 2006)
Material pulverulento	2,10 %	NBR NM 46 (ABNT, 2003)

Fonte: Elaborado pelo autor

A caracterização foi feita obtendo resultados que seguiram os requisitos das normas citadas e a granulometria foi determinada conforme os requisitos da norma de especificação, NBR 7211 (ABNT, 2011). O agregado apresentou um módulo de finura de 1,77, tratando-se assim de uma areia fina.

Figura 16 - Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.4 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento de água da UFC.

4.2 Métodos

Para a formulação das argamassas, utilizou-se a substituição em duas etapas: inicialmente como substituinte do cimento e em seguida como substituinte do agregado natural. Ambas substituições foram em massa com os teores de 15%, 25% e 35%. Para que se garantisse a homogeneização da amostra, realizou-se a separação em pilhas e logo após houve o quarteamento, que foi realizado através do Quarteador Jones (Figura 17).

Figura 17 - Quarteador Jones



Fonte: Elaborado pelo autor

Após as etapas de caracterização, no LMCC foram produzidas as argamassas seguindo as normatizações da NBR16541 (ABNT, 2016). Estas argamassas apresentaram traço unitário, em massa, de 1:5 (cimento: agregado), índice de consistência de 260 ± 5 mm, com um fator de a/c de 0,5. Determinou-se o índice de consistência para as argamassas conforme a NBR 13276 (ABNT 2016).

Os teores de substituição do cimento, bem como do agregado natural por RSPC foram de 0% (referência), 15%, 25% e 35%, em massa. Seis corpos de prova foram produzidos para cada traço e para cada grupo de substituição (cimento ou areia), os ensaios foram de 7 e 28 dias. Na Figura 18 há a representação do corpo de prova. Os pontos

vermelhos marcados em cada corpo de prova representam as superfícies lisas que tinham ficado em contato com os moldes.

Figura 18 – Corpo de prova durante processo de cura



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido

Com as argamassas já em seu estado endurecido, ensaios foram realizados no LMCC para a determinação das resistências. As resistências à tração na flexão e as resistências à compressão das misturas foram avaliadas conforme as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). Seis corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) foram moldados para cada teor de material substituído. O material sofreu ensaio em uma máquina do tipo EMIC com classificação estática, modelo DL 10000, e capacidade máxima de 100 kN.

Após serem moldados, os corpos de prova permaneceram em seus moldes em temperatura ambiente por 24 h, sendo desmoldados e colocados na cura em água com cal. Então eles foram ensaiados aos 07 e 28 dias. De acordo com os procedimentos da NBR 8490 (ABNT, 1984), realizou-se o ensaio de retração por secagem para todas as misturas de argamassa. Moldaram-se três corpos de prova para cada traço de mistura com as seguintes dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm. O processo de adensamento deu-se em três camadas e a partir de uma mesa de consistência aplicaram-se 15 golpes. A Figura 19 contém o aspecto dos corpos de prova nos moldes.

Figura 19 - Corpos de prova para ensaio de retração



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do método utilizado pela NBR 9778 (ABNT, 2005), parâmetros de durabilidade foram analisados, tais como o índice de vazios e a absorção de água por imersão. Para este fim, moldaram-se quatro corpos de prova cilíndricos para cada traço com as dimensões de 5 cm x 10 cm, que foram ensaiados aos 28 dias de tempo de cura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos durante a pesquisa. Assim, serão discutidos os resultados acerca das caracterizações e propriedades das argamassas no estado endurecido. Aqui há referência apenas às argamassas cujo agregado natural foi substituído por RSPC, já que a substituição do cimento pelo RSPC não se tornou viável para as demais argamassas. Isso pôde ser observado a partir da impossibilidade de moldagem dos corpos de prova. Sendo justificado a partir da perda das atividades pozolânicas quando a porcentagem de substituição do resíduo de rocha ornamental tornou-se elevada.

5.1 Caracterização física do RSPC

Realizaram-se os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária para a caracterização física do RSPC. Alguns deles foram determinados no LMCC, seguindo os procedimentos das normas.

Para determinação da granulometria do RSPC foram seguidos os procedimentos da NBR NM 45 (ABNT, 2006). O ensaio foi realizado no laboratório do Núcleo de Tecnologia e Qualidade industrial do Ceará (NUTEC), mediante um analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec plus com unidade de dispersão úmida. O tempo de dispersão foi de 15 min e usou-se a água deionizada como dispersante.

Foram obtidas as distribuições de tamanhos das partículas para D_{90} , D_{50} e D_{10} . De acordo com as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), foram realizados ensaios para determinar as massas específica e unitária do RSPC, respectivamente. Todos os dados encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 6 - Resultados da caracterização física do RSPC

Propriedades avaliadas	Valores encontrados	Norma
Massa específica	2,69 kg/dm ³	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa unitária	1,09 kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
<90 (D_{90})	14,8 µm	
< 50 (D_{50})	4,5 µm	
< 10 (D_{10})	0,5 µm	

Fonte: Elaborado pelo autor

A dimensão média de 4,5 μm caracteriza o RSPC como sendo de granulometria bastante fina, considerado um fíler. Isso se deve à moagem a que a rocha foi submetida, pois gerou um resíduo muito fino.

5.2 Caracterização química do RSPC

De acordo com Alves (2016), com o intuito de verificar a presença de elementos cristalinos na composição do RSPC, conforme a Tabela 7, o resultado da análise química por FRX comprovou que a Pedra Cariri apresenta um elevado teor de quantidade de óxido de cálcio (CaO), cerca de 92%.

Tabela 7 - Composição mineralógica do resíduo da Pedra Cariri

Analito	Teor (%)
CaO	92,70
Fe ₂ O ₃	1,67
MgO	1,46
SiO ₂	1,32
Al ₂ O ₃	1,29
SO ₃	0,67
MnO	0,50
SrO	0,21
ZnO	0,10
CuO	0,08

Fonte: Alves (2016)

Essa elevada composição de CaO está relacionada com o alto grau de concentração de calcita (CaCO₃), o qual pode ser observado na análise de composição mineralógica do rejeito pela difração de raios-x.

Além do elevado teor de cálcio, é notável a existência de Ferro, Magnésio, Sílicio e Alumínio em pequenas concentrações. Esses elementos são justificáveis pelo fato de a amostra ser proveniente de uma rocha natural onde há minerais acessórios presentes na composição do material.

Para determinar a estrutura dos compostos do RSPC, o ensaio de difração de raios-X foi realizado no Laboratório de Raios-X (LRX) do Departamento de Física da UFC. Utilizou-se um difratômetro para amostras policristalinas modelo X-Pert Pro MPD-Panalytical (Figura 20), com tubo de Co, com intervalo angular de 10-100 graus em 2θ , voltagem de 45kV e corrente de 40mA. O software utilizado foi o DBWS9807, método Rietveld.

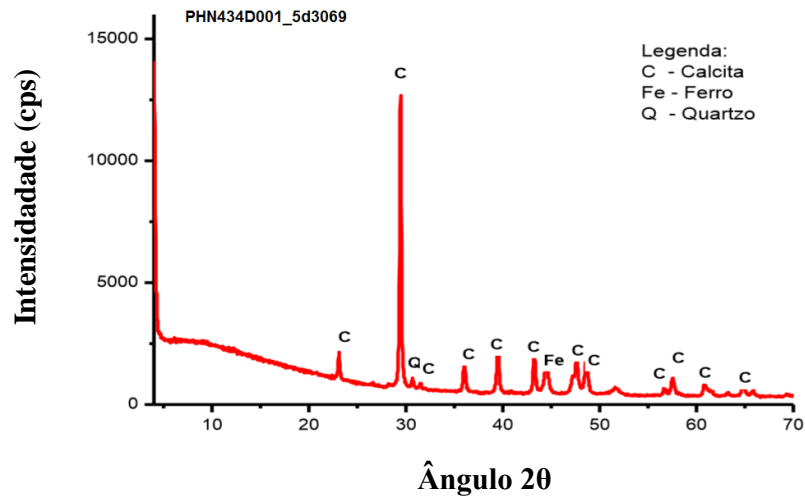
Figura 20 - Difratorômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado obtido para o RSPC está ilustrado na figura a seguir.

Figura 21 – Difratorograma do RSPC



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no difratograma obtido com a amostra de RSPC, a partir da análise verifica-se que o resíduo em estudo é um material de estrutura tipicamente cristalina, cujos picos são correspondentes à calcita. Logo, o óxido de cálcio presente no RSPC está na forma de calcita. Também há pequenas quantidades de ferro e quartzo presentes, provavelmente originados do processo de corte da Pedra Cariri.

5.3 Análise das propriedades das argamassas no estado endurecido

5.3.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados dos ensaios de resistência foram levantados para os tempos de cura de 7 e 28 dias, que são os períodos de avaliação utilizados na indústria da construção civil. Na Tabela 8 estão os resultados das médias das resistências à tração na flexão das argamassas realizadas nesta pesquisa.

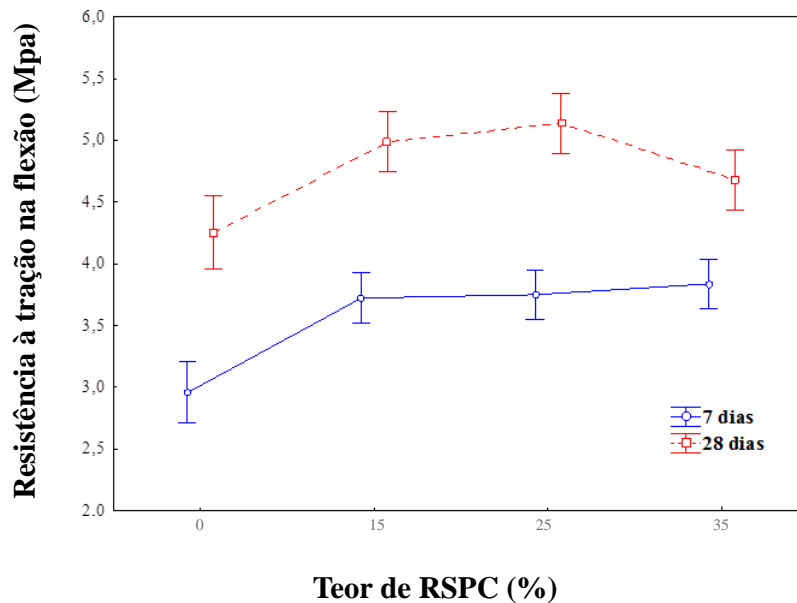
Tabela 8 – Resistências à tração na flexão

Argamassa	Resistência à tração na flexão média (MPa) ± Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	2,91 ± 0,08 (2,6)	4,27 ± 0,09 (2,0)
15% RSPC	3,74 ± 0,06 (1,5)	4,98 ± 0,09 (1,8)
25% RSPC	3,77 ± 0,06 (1,7)	5,14 ± 0,17 (3,2)
35% RSPC	3,83 ± 0,25 (6,6)	4,68 ± 0,24 (5,1)

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 22 mostra um gráfico com a comparação múltipla de médias das resistências à tração na flexão para determinar se houve significativas diferenças entre os resultados para as argamassas produzidas.

Figura 22 - Resistências à tração na flexão (7 e 28 dias)



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível constatar que, quando comparadas à argamassa de referência, as argamassas que sofreram substituição com o RSPC demonstraram maiores valores de resistência à tração na flexão. Ademais, observa-se que o tempo de cura teve influência direta nos resultados de tração na flexão para as misturas.

Pode-se notar que para o tempo de cura de 7 dias, as argamassas com teores de 15, 25 e 35% não apresentaram diferença significativa em relação às suas resistências à tração na flexão. Mas aos 28 dias, as argamassas com RSPC apresentaram significativa diferença entre seus resultados de resistência à tração na flexão. É possível notar que para esse período, a argamassa com 35% de RSPC como substituinte apresentou uma resistência à tração na flexão 10% maior que a de referência. Todavia, houve um aumento na resistência quando comparada às argamassas de 15% e 25%. Isso pode ser justificado por que a argamassa 35% RSPC possui menor relação a/c que as demais argamassas contendo RSPC.

Esse melhor comportamento das argamassas com RSPC se deve em decorrência do menor tamanho de partícula que o RSPC possui quando é comparado ao agregado natural. Daí os grãos de RSPC favorecem o preenchimento da mistura e tendem a torná-la mais densa.

Isso pode ser verificado com o experimento de Kelestemur *et al.* (2014), pois segundo eles, a utilização de variados teores de resíduo de serragem de mármore substituindo a areia provocou uma maior resistência à tração quando se comparou com a mistura de referência. Eles constataram que essa melhoria se deve ao fato de o resíduo de mármore apresentar granulometria menor que a do agregado natural.

5.3.2 Resistência à compressão

Na Tabela 9 há os resultados das médias das resistências à compressão das argamassas produzidas nesta pesquisa.

Tabela 9 – Resistências à compressão

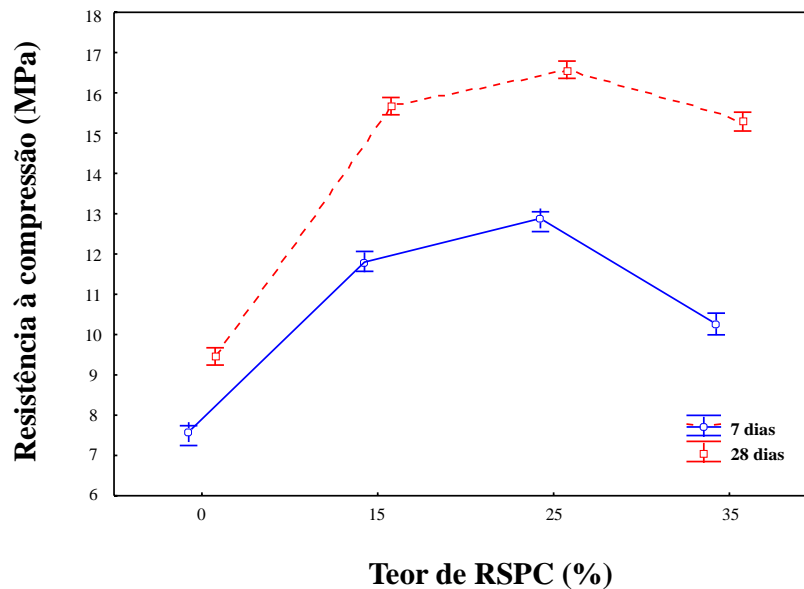
Argamassa	Resistência à compressão (MPa) ± Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	7,60 ± 0,25 (3,3)	9,44 ± 0,28 (2,9)
15% RSPC	11,79 ± 0,24 (2,0)	15,67 ± 0,24 (1,5)
25% RSPC	12,78 ± 0,15 (1,1)	16,52 ± 0,22 (1,4)
35% RSPC	10,23 ± 0,38 (3,7)	15,39 ± 0,18 (1,2)

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que as misturas que sofreram substituição do agregado natural por RSPC apresentaram um aumento nos resultados de suas resistências à compressão.

Ademais, nota-se que o tempo de cura influenciou suas resistências à compressão. Para 7 dias, é possível observar uma diferença significativa nos resultados dos teores apresentados. Todavia, para 28 dias as argamassas substituídas com RSPC em 15% e 35% não apresentaram expressivas diferenças.

Figura 23 - Resistência à compressão (7 dias e 28 dias)



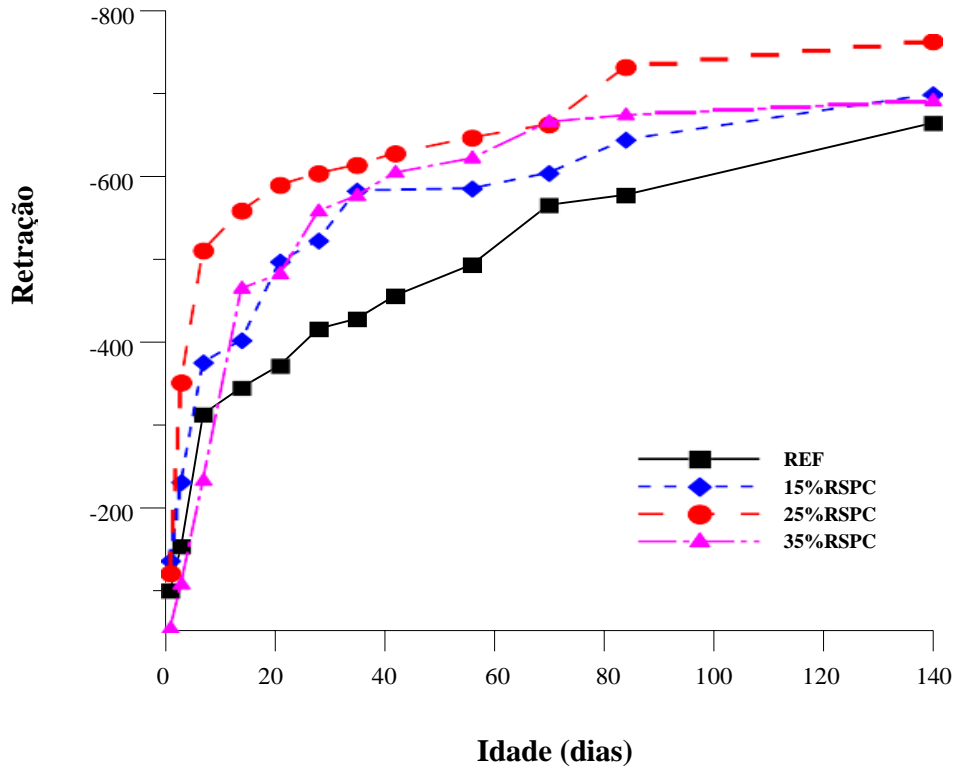
Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma da resistência à tração na flexão, a melhoria na resistência à compressão pode ser atribuída ao fato de que o RSPC apresenta uma granulometria de 90% de suas partículas com dimensões inferiores a 14,8 μm . Essa granulometria permite um melhor preenchimento e uma densificação das argamassas quando comparadas com a argamassa referência. Balasubramanian *et al.* (2016) analisaram diversos teores de substituição relativos à massa de areia. Ao substituir o agregado natural por resíduos de granito em argamassas, aumentaram-se os resultados de resistência à compressão comparando-se com a que não sofreu substituição com resíduo.

5.3.3 Retração por secagem

Na Figura 24, encontram-se os resultados das médias quanto à retração por secagem desta pesquisa.

Figura 24 - Retração por secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados, observa-se que a substituição do agregado natural por RSPC produziu, em geral, um aumento na retração por secagem nas argamassas. Entretanto, para a argamassa com 35% esperava-se obter um valor de retração superior uma vez que apresentava maior teor de resíduo e menor relação a/c quando comparada com as demais.

As misturas com substituição de RSPC apresentaram menores relações a/c que a mistura referência (sem substituição) e maiores valores de retração. Esse comportamento é explicado pelo melhor preenchimento proporcionado pelo resíduo de rocha ornamental, que por sua vez reduz capilares e aumenta a retração.

5.3.4 Absorção por imersão e índice de vazios

Os resultados das médias para o ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios das argamassas produzidas nessa pesquisa encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Absorção por imersão e Índice de vazios

Argamassa	A_média (%) ± Sd. (%) (C.V. (%))	IV_médio (%) ± Sd. (%) (C.V. (%))
REF	14,80 ± 0,13 (0,8)	27,37 ± 0,13 (0,5)
15% RSPC	13,51 ± 0,67 (5,0)	25,35 ± 1,02 (4,0)
25% RSPC	10,92 ± 0,19 (1,7)	21,68 ± 0,41 (2,0)
35% RSPC	11,64 ± 0,16 (1,4)	22,85 ± 0,36 (1,6)

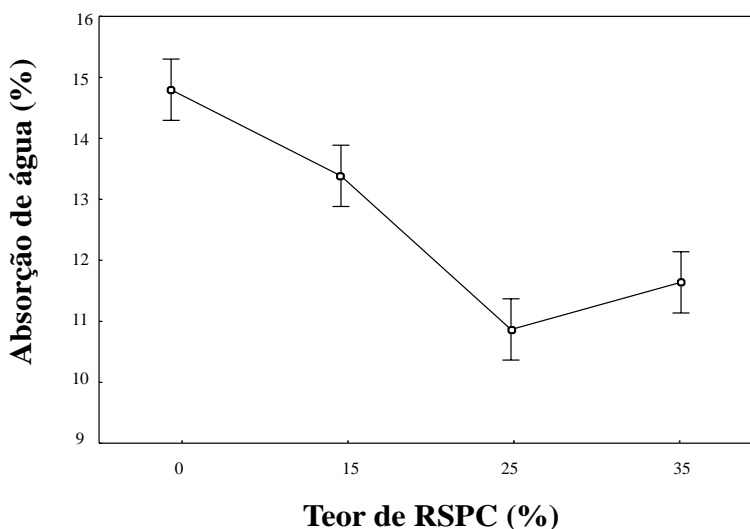
A- Absorção; IV – Índice de vazios;

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se, a partir dos resultados da Tabela 10, que houve redução nos valores de absorção de água por imersão e no índice de vazios devido à substituição do agregado natural de RSPC.

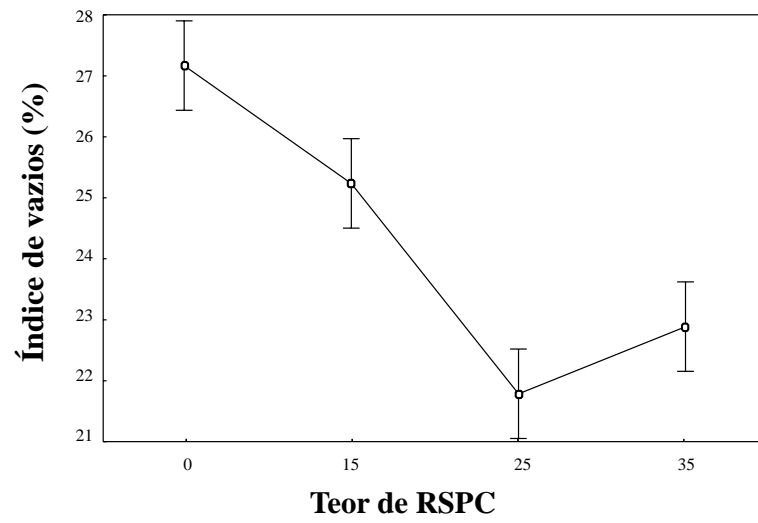
Realizou-se também uma comparação de médias a fim de que fosse possível determinar se houve significativas diferenças entre os resultados para todas as argamassas produzidas. Os gráficos que contêm esse comportamento podem ser observados nas figuras 25 e 26. Percebe-se que há uma diminuição no índice de vazios e na absorção de água em relação ao valor de referência. O comportamento mais acentuado foi o da mistura com 25% de substituinte. Essa melhoria é atribuída ao melhor empacotamento das partículas da mistura devido à finura do RSPC.

Figura 25 – Comportamento das argamassas: absorção de água.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Comportamento das argamassas: índice de vazios



Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÃO

O estado do Ceará apresenta boa vantagem competitiva devido à ocorrência de grande variedade de rochas ornamentais, muito valorizadas comercialmente. No âmbito ambiental, a exploração do calcário gera um grande volume de resíduos que são descartados na natureza. Essa atividade necessita de novos estudos de desenvolvimento de técnicas de extração e beneficiamento para redução dos impactos causados ao meio ambiente, promovendo emprego e renda para a população local.

A partir dos resultados desta pesquisa, acredita-se que o reaproveitamento do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri incorporado ao processo de fabricação das argamassas torna-se uma alternativa para a diminuição dos impactos causados pelo descarte inadequado de tal rejeito. A composição da Pedra Cariri permite seu uso em variados segmentos industriais, um destes sendo a construção civil. Com relação às características do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri, pode-se afirmar que ele é composto por 92% de Óxido de Cálcio e que este é encontrado na forma de calcita. Também apresenta dimensão média de 4,5 μm , considerado fíler.

As argamassas no estado endurecido foram substituídas por RSPC e tempo de cura de 7 e 28 dias. Houve aumentos na resistência à tração na flexão e também na resistência à compressão em comparação ao concreto de referência. Para o tempo de 7 dias e argamassa com 25% de RSPC, a resistência à tração na flexão sofreu um aumento de 27%. Já para a resistência à compressão houve aumento de 70%. Em relação ao tempo de 28 dias e argamassa com 25% de RSPC, a resistência à tração na flexão sofreu um aumento de 20%. Já para a resistência à compressão houve aumento de 75%. Portanto, o teor de substituição que apresentou melhores qualidades tecnológicas foi o de 25%.

A substituição do cimento pelo RSPC não foi possível ser feita para as argamassas, devido à impossibilidade de moldagem dos corpos de prova. Sendo justificado a partir da perda das atividades pozolânicas quando a porcentagem de substituição do resíduo de rocha ornamental tornou-se elevada.

A substituição de areia natural pelo RSPC ocasionou uma redução na absorção de água por capilaridade bem como no índice de vazios. Verifica-se, portanto, que a substituição do agregado natural pelo Resíduo de Serragem de Pedra Cariri ocasionou melhorias significativas para as propriedades das argamassas no estado endurecido. Com exceção da retração que se tornou maior com a substituição do RSPC.

Com isso, conclui-se que o RSPC se torna uma alternativa viável para ser utilizado em argamassas, podendo unir a preservação do meio ambiente com a produção de bens minerais, destinando assim o rejeito de calcário à indústria de argamassas e incentivando empreendedores a reduzir danos ambientais provindos da extração da Pedra do Cariri. Com a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento dos rejeitos gerados, a atividade de produção e a economia dos municípios da região deverão aumentar, gerando melhores condições socioambientais à população.

Por fim, sugere-se que em trabalhos futuros sejam feitas: verificação das propriedades das argamassas em estado fresco; verificação da influência do RSPC no módulo de elasticidade das misturas; realização de novas misturas com diferentes proporções de resíduos e aditivos para se otimizar o aproveitamento dos resíduos na indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

ALVES, T. M. E. *et al.* **Produção de hidróxido de cálcio a partir de resíduo da Pedra Cariri**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 2016, Natal. Universidade Federal do Cariri - (UFCA), 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto-especificação. Rio de Janeiro. ABNT, 2011.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. ABNT, 2019.

_____. **NBR 8490**. Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT 1984.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão. Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro. ABNT, 2013.

_____. **NBR 11758**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro. ABNT, 1997.

_____. **NBR 13276**: Argamassas - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassas -Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2017.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro. ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

BALASUBRAMANIAN, J.; GOPAL, E.; PERIAKARUPPAN, P. Strength and microstructure of mortar with sand substitutes. **Gradevinar**, v. 68, n. 01, p. 29-37, 2016.

BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais.** 2014. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2014.

BRASIL. Decreto-Lei 9.226 de 02 de maio de 1946. Cria a floresta Nacional de Araripe-Apodi. **Diário Oficial da União**, Rio de Janeiro, seção 1, 1946. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1940-1949/decreto-lei-9226-2-maio-1946-417098-publicacaooriginal-1-pe.html>> Acesso em: 4 set. 2019

CARVALHO, E. G. **Mineração, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no estado do Ceará: Aspectos Legais, Econômicos e Sociais.** Revista Ciências Administrativas, v. 10, p. 291-317, 2004. Universidade de Fortaleza - Unifor, Fortaleza, 2004. Disponível em: <<https://periodicos.unifor.br/rca/article/view/237/pdf>> Acesso em: 12 set. 2019

CASA DE PEDRA. **Instituto de Geociências**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015

CASTRO, N. F. **Planejamento e ordenamento das atividades de mineração de calcários no arranjo produtivo local do Cariri – CE.** 2009. 355p.il. Dissertação (Mestrado em Geologia) - UFRJ/ IGEO/ Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em <http://ppgl.geologia.ufrj.br/media/pdfs/Nuria_Castro_Mestrado_2009.pdf> Acesso em: 8 nov 2019

CASTRO, N. F.; MELLO, E. F.; VIDAL, F. W. H.. **O APL calcário do Cariri no contexto do ordenamento do território.** VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Fortaleza, 12 e 13 de nov. 2009.

CORREIA, J. C. G.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, R. C. C. **Caracterização tecnológica dos calcários do Cariri do Ceará.** In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 5., 2005, Recife, Anais..., Rio de Janeiro, 2006, p.65-73. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2005/CAC00030006.pdf>> Acesso em: 3 abr. 2019

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Geoparques.** 2006. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Saiba-Mais---Geoparques-5415.html>> Acesso em: 06 nov. 2019

FILHO, E. M. - **Uma avaliação do programa de apoio ao arranjo produtivo local da Pedra Cariri-Ceará.** 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Economia) - Faculdade de

Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. 2019. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/nova-olinda/panorama> > Acesso em: 9 maio 2019.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102 f. São Paulo, 2000. Tese (livre docência) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KELEŞTEMUR, O; YILDIZ, S.; GÖKÇER, B.; ARICI, E. **Statistical analysis for freeze–thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber**. *Materials & Design*, v. 60, p. 548-555, 2014.

LIMA, F. F. et al. **Geopark Araripe: Histórias da Terra, do Meio Ambiente e da Cultura**. Governo do Estado do Ceará, Crato, 2012.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p.143.
Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/732/1/CCL00260010.pdf> >
Acesso em 18 out. 2019

MENEZES, R. R. *et al.* **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.303-313, 2002. Disponível em: <<http://web-resol.org/textos/v6n2a20.pdf>>
Acesso em 29 abr. 2019

MIRANDA, P. S. T. *et al.* **Utilização de pó de Pedra Cariri em concreto autoadensável**. Conferência Construção. Porto, 2018

MOCHIUTTI, N. F. *et al.* **Os Valores da geodiversidade: Geossítios do Geopark Araripe/CE**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 35 - 1 / 2012 p. 181-182.
Disponível em: <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2012_1/2012_1_173_189.pdf>
Acesso em: 5 set. 2019

MORAES, A. H. M. **Análise ambiental das atividades de mineração da Pedra Cariri no município de Nova Olinda – CE**. 2018. 40 p. Monografia (Tecnólogo da Construção Civil) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2018

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 7-24, jan./mar. 2013.
Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v13n1/v13n1a02.pdf>> Acesso em: 10 set. 2019

NEVES, C. A.R.; SILVA, L. R. **Universo da mineração brasileira**. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, p.1, 2007.

OLIVEIRA, A. A. **Impactos antrópicos nos carbonatos aptianos da região de Nova Olinda e Santana do Cariri – CE.** 2006. 200p. Tese (Doutorado em Geociências) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

RESOLUÇÃO CONAMA n°1, de 23 de janeiro de 1986.

RESOLUÇÃO CONAMA n°237, de 19 de dezembro de 1997.

RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, J. C. C. A. **Moagem em moinho de bolas: estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo.** Instituto Politécnico de Viana do Castel, Portugal, 2001. Disponível em:

<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4640/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4640.pdf> Acesso em 6 set. 2019

RODRIGUES, G. G.; GURGEL, M. T. **Exploração e beneficiamento da Pedra Cariri nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri-CE.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, Mossoró, 2018. Disponível em:

http://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/1295/1/GustavoGR_ART.pdf >

Acesso em: 15 out. 2019

SILVA, A. D. A. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri cearense na formulação de argamassa.** 2008. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/estudosgeologicos/paginas/edicoes/2008181/2008181t07.pdf> Acesso em: 10 set. 2019

VIANA, M. S. S.; NEUMANN, V. H. L. 2007. **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil – o membro crato da formação santana, CE.** Disponível em:

<http://sigep.cprm.gov.br/sitio005/sitio005.htm> > Acesso em 19 out. 2019

VIDAL, F. W. H. *et al.* **O arranjo produtivo local da Pedra Cariri**, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, RJ, 2008. Disponível em:

<https://www.cetem.gov.br/images/congressos/2008/CAC00310008.pdf> Acesso em: 8 out. 2019

VIDAL, F. W. H.; FERNANDES, T. W. G.; PEQUENO, D. A.C.. **Inovação tecnológica para a valorização da Pedra Cariri, CE.** IN: Congresso brasileiro de rochas ornamentais, 3, 2007, Natal. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p.299. Disponível em:

http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1336/1/III_Congresso_Br%20RO%20299-306.pdf > Acesso em: 19 out. 2019

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; OLIVEIRA, R. R. **Aspectos do aproveitamento dos rejeitos da Pedra Cariri**, 2005.

ZANATTA, M. A. **Influência do tratamento térmico e do tipo de reforço nas propriedades de compósitos a base de ligas de alumínio obtidos via metalurgia do pó.** Joinville, 2007. (Dissertação) Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Santa Catarina, 2007.