



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS

PEDRO HENRIQUE NOGUEIRA GARCIA

ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI COMO
FÍLLER NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

FORTALEZA

2019

PEDRO HENRIQUE NOGUEIRA GARCIA

ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI COMO
FÍLLER NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências de Materiais. Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

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)

G21a Garcia, Pedro Henrique Nogueira.
Análise da Adição de Resíduo de Serragem da Pedra Cariri como Filler na Produção de Argamassa / Pedro Henrique Nogueira Garcia. – 2019.
74 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira..

1. Pedra Cariri. 2. Argamassa. 3. Resíduo. 4. Agregado. I. Título.

CDD 620.11

PEDRO HENRIQUE NOGUEIRA GARCIA

ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DA PEDRA CARIRI COMO
FÍLLER NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências de Materiais. Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Aprovada em: 21 / 11 / 2019 .

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Jefferson Leandro Klug (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dra. Ana Candida de Almeida Prado (Membro externo)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

À minha querida família que tanto me apoiou e que comigo esteve em todos os momentos. A eles que me possibilitaram crescer e seguir meu caminho. A eles que lutaram ao meu lado. A eles que dão sentido e iluminam o meu viver e que em mim deixaram marcas indeléveis. Com eles passei os melhores momentos de minha vida e aprendi a SER humano. Deles serei eterno devedor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À minha querida *família* que tanto me apoiou e que me deu os instrumentos necessários para trilhar toda minha caminhada até hoje. São as pessoas centrais de minha vida. Nossos momentos de diálogo e conversa foram inestimáveis e deixaram marcas indeléveis. Sem o carinho e dedicação deles, nada disso seria possível.

Devo meus agradecimentos também ao *Colégio Juventus*, por ter sido a primeira e, seguramente, a mais importante instituição educacional por onde tive o prazer de passar. Lá aprendi não só a ler e a escrever, mas a ser um cidadão, a respeitar os valores e a reconhecer que é na humildade e no altruísmo que o homem verdadeiro se constrói. Agradeço aos meus professores que, com sua dedicação e esmero, ajudaram-me nessa difícil tarefa que é crescer enquanto sujeito.

Ao meu *orientador* Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, por suas críticas, sugestões e contribuições pertinentes à composição desses escritos. Seu apoio, receptividade e franqueza permitiram-me ter confiança na realização desse trabalho.

À *Universidade Federal do Ceará* que me ofereceu os subsídios necessários à minha formação acadêmica e oportunizou minha formação profissional.

Ao *programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais*, professores e alunos, especialmente a turma 2018.1, por terem me proporcionado grandes momentos de construção teórica e compartilhamento de emoções. Sem dúvidas, eles contribuíram fundamentalmente na construção de uma trajetória acadêmica mais coerente, séria e firme.

Aos *meus amigos* Bruno e Elias que com seus exemplos de vida, suas personalidades e apoio constante me mostraram o quanto é essencial ter amigos com os quais se possam dividir as inquietações e benesses da vida.

E, finalmente, ao partícipe mais relevante de meus agradecimentos: Deus, que por seus caminhos sinuosos e misteriosos, possibilitou-me tecer essa rede de vivências e experiências que é minha vida. Por me auxiliar nessa e em tantas outras conquistas devo a Ele meus sinceros agradecimentos. Sem sua presença, nada disso seria possível.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

CHAPLIN

É no problema da educação que assenta o grande segredo do aperfeiçoamento da humanidade.

KANT

RESUMO

A região do Cariri, localizada no Estado do Ceará, apresenta expressivas reservas de calcário. A utilização deste minério ocorre, principalmente, em duas formas, a saber: o calcário sedimentar, em forma de lâminas aplicado a pisos e revestimentos; e o calcário metamórfico, como matéria prima na produção de cal. Os processos de exploração e beneficiamento do calcário sedimentar laminado geram resíduos dos quais se destaca o Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC). Tais processos são apontados na literatura como promotores de impactos ambientais devido ao manejo e à disposição inadequada do RSPC. Por conta disso, o presente estudo objetiva analisar a influência da adição de RSPC como substituinte parcial do agregado miúdo na fabricação de argamassas. Para tanto, realizou-se a adição do RSPC em duas etapas: inicialmente, como substituinte parcial da areia e, em seguida, do cimento. Foram utilizadas nas substituições os seguintes teores em massa: 15%, 25% e 35%. O traço adotado foi de 1:5, em massa com o índice de consistência de 260 ± 5 mm, com um fator de a/c de 0,5. Foram moldados seis corpos de prova para cada traço que serão ensaiados com 7 e 28 dias. Em seguida, analisou-se as propriedades das argamassas no estado fresco (teor de água retido, teor de ar incorporado, densidade e trabalhabilidade por meio do *squeeze-flow*) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, retração por secagem, absorção por imersão e índice de vazios). Nesta pesquisa, obteve-se uma melhoria tanto nas propriedades físico-químicas da argamassa no estado fresco quanto no estado endurecido quando seu agregado natural foi substituído pelo RSPC. Entretanto, a retração foi maior para as argamassas com RSPC. Portanto, concluiu-se que é possível a utilização de até 35% de RSPC em substituição ao agregado natural. Sendo as misturas com 25% em massa de substituinte as que obtiveram melhores desempenhos tecnológicos. Da mesma forma, acredita-se que a incorporação desse resíduo ao processo de fabricação das argamassas acarretará em uma redução de custos na produção do insumo quando comparado ao método tradicional e uma redução nos impactos ambientais que eram gerados a partir do descarte inadequado do resíduo.

Palavras-chave: Pedra Cariri. Argamassa. Resíduo. Agregado.

ABSTRACT

The Cariri region, located in the state of Ceará, has significant limestone reserves. The use of this ore occurs mainly in two ways, namely: sedimentary limestone, in the form of blades applied to floors and coatings; and metamorphic limestone as raw material in lime production. The exploration and processing processes of laminated sedimentary limestone generate residues such as the Cariri Stone Sawdust Residue (RSPC). Such processes are pointed in the literature as promoters of environmental impacts due to the inadequate management and disposal of RSPC. Because of this, the present study aims to analyze the influence of the addition of RSPC as partial substitute of fine aggregate in the manufacture of mortars. To this end, RSPC was added in two steps: initially as a partial substitute for sand and then for cement. The following mass contents were used for substitutions: 15%, 25% and 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 for each trait that will be tested at 7, 14 and 28 days. Then, the properties of fresh mortars (retained water content, incorporated air content, density and workability by squeeze-flow) and hardened properties (flexural tensile strength, axial compressive strength) were analyzed. shrinkage by drying, absorption by immersion and voids index). This research improved both the physicochemical properties of fresh and hardened mortar when its natural aggregate was replaced by RSPC. However, the shrinkage was higher for mortars with RSPC. Therefore, it was concluded that up to 35% of RSPC can be used in place of the natural aggregate. The mixtures with 25% by weight of the substituent have the best technological performances. Likewise, it is believed that the incorporation of this waste into the mortar manufacturing process will result in a reduction in input production costs when compared to the traditional method and a reduction in the environmental impacts that were generated from inadequate waste disposal.

Keywords: Stone Cariri. Mortar. Residue. Aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia Sedimentar do Araripe	14
Figura 2 – Localização do Geopark Araripe	15
Figura 3 – Geossítio Pedra Cariri na Chapada do Araripe	16
Figura 4 – Rejeitos provenientes da lavra e beneficiamento da Pedra Cariri	17
Figura 5 – Calcários laminados da Formação Santana	19
Figura 6 – Lavra rudimentar da Pedra Cariri	20
Figura 7 – Material Fossíífero proveniente da Formação Santana-CE	21
Figura 8 – Aspecto do deslocamento manual das lajotas	22
Figura 9 – Esquema de Resíduos x Etapa do Processo	23
Figura 10 – Rejeitos de serragem na forma de lascas e aparas	24
Figura 11 – Resistência à compressão das argamassas produzidas	28
Figura 12 – Micrografias: a) com 5% de calcário e b) com 20% de calcário	28
Figura 13 – Resistência à compressão de argamassas	31
Figura 14 – Difratoograma de raio-X obtido do RSPC	33
Figura 15 – Resistência à compressão axial: a) 7 dias; b) 28 dias	34
Figura 16 – Absorção de água e índice de vazios das argamassas	36
Figura 17 – Micrografia do RSPC: a) amarelo; b) cinza	36
Figura 18 – Organograma dos ensaios de caracterização dos materiais secos	37
Figura 19 – Pedra Cariri em formato de placas	38
Figura 20 – Esquema de moinho de bolas	39
Figura 21 – Moinho de bolas idealizado para a pesquisa	39
Figura 22 – Moinho de bolas utilizado na pesquisa	39
Figura 23 – Aspecto do material passante na peneira 2,4mm	40
Figura 24 – Curva granulométrica da areia natural	43

Figura 25 – Aspecto do RSPC no início e no fim do ensaio de plasticidade	44
Figura 26 – Difratoograma do RSPC	46
Figura 27 – Quarteador Jones	46
Figura 28 – Organograma das propriedades das argamassas estudadas	47
Figura 29 – Corpos de prova durante processo de cura	48
Figura 30 – Curva de carga versus deformação para o ensaio de squeeze-flow	49
Figura 31 – Argamassas: a) REF; b) 15%RSPC; c) 25% RSPC e d) 35%RSPC	50
Figura 32 – Máquina responsável pelos ensaios de resistência	51
Figura 33 – Corpos de prova sendo moldados para ensaio de retração	51
Figura 34 – Influência do teor de RSPC na densidade de massa	53
Figura 35 – Influência do teor de RSPC no teor de ar incorporado	54
Figura 36 – Influência do teor de RSPC na retenção de água	55
Figura 37 – Carga por deslocamento – método de squeeze-flow	56
Figura 38 – Carga por deslocamento compilado	58
Figura 39 – Resistência à tração na flexão aos 7 dias e aos 28 dias de cura	59
Figura 40 – Resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias de cura	61
Figura 41 – Retração por secagem (a) e Perda de massa (b)	62
Figura 42 – Retração por secagem x Perda de massa. a) REF; b) 15%; c) 25%;d) 35%	63
Figura 43 – Comportamento quanto: a) absorção de água; b) índice de vazios	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados Conclusivos - Substituição de Cimento	26
Tabela 2 – Resultados Conclusivos - Substituição do Agregado Natural	27
Tabela 3 – Propriedades no estado fresco das argamassas	29
Tabela 4 – Resistência à compressão das argamassas	30
Tabela 5 – Resistência à compressão – substituindo o cimento	32
Tabela 6 – Resistência à compressão – substituindo o agregado natural	33
Tabela 7 – Resistências à tração na flexão	35
Tabela 8 – Propriedades do cimento utilizado no estudo	41
Tabela 9 – Distribuição de dimensões do cimento utilizado	41
Tabela 10 – Características do agregado natural utilizado na pesquisa	42
Tabela 11 – Dimensões de tamanhos das partículas do RSPC utilizado	43
Tabela 12 – Resultados de massa unitária e específica do RSPC	44
Tabela 13 – Composição química do RSPC avaliada	45
Tabela 14 – Densidade de massa das argamassas	52
Tabela 15 – Teor de ar incorporado das argamassas	53
Tabela 16 – Retenção de água das argamassas	55
Tabela 17 – Resistências à tração na flexão	59
Tabela 18 – Resistências à compressão	60
Tabela 19 – Absorção por imersão e Índice de vazios	64
Tabela 20 – Resistência à tração na flexão	75
Tabela 21 – Resistência à compressão	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Problema	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Questões de Pesquisa	18
1.5	Objetivo	18
<i>1.5.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	18
<i>1.5.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Pedra Cariri	19
<i>2.1.1</i>	<i>Lavra da Pedra Cariri</i>	20
<i>2.1.2</i>	<i>Processo de Beneficiamento</i>	21
2.2	Resíduos da Pedra Cariri	22
2.3	Resíduos de Rochas Ornamentais Aplicados em Matrizes Cimentícias	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais	37
<i>3.1.1</i>	<i>Resíduo de Serragem de Pedra Cariri</i>	38
<i>3.1.2</i>	<i>Cimento</i>	40
<i>3.1.3</i>	<i>Agregado Natural</i>	41
3.2	Caracterização Física do RSPC	43
3.3	Caracterização Química do RSPC	45
3.4	Métodos	46
3.5	Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	48
3.6	Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Análise das Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	52
4.2	Análise das Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido	58
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS INDIVIDUAIS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

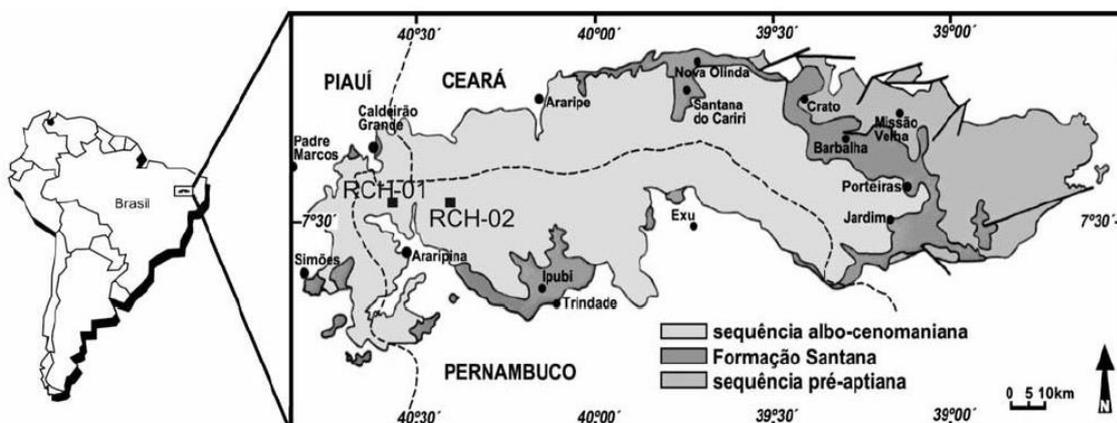
O Brasil se sobressai no segmento de rochas ornamentais, principalmente, nas áreas de exploração e beneficiamento. Pertencendo ao grupo dos maiores exportadores e importadores mundiais, até o mês de setembro de 2016, o acumulado exportado aproximava-se de dois milhões de toneladas. Os principais estados que contribuíram para esse montante foram: Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará, Bahia, Rio Grande do Norte e Pernambuco (ABIROCHAS,2016).

Devido ao seu ambiente geologicamente propício, o Ceará ocupa a segunda posição em termos de produção de rochas ornamentais da região Nordeste. A maior parte da extensão territorial do estado, cerca de 75%, é formada por embasamento cristalino nos quais destacam-se a exploração de granito. No restante do território do estado, cerca de 25%, os terrenos possuem características sedimentares e, portanto, servem como base para a exploração de minerais carbonáticos como a Pedra Cariri (ADECE, 2013).

Situada no interior da região Nordeste, encontra-se a Bacia Sedimentar do Araripe que abrange ao noroeste o estado de Pernambuco, ao leste o do Piauí e ao sul o do Ceará. Nesta bacia, está localizada a Formação Santana, a qual se caracteriza por ser rica em materiais carbonáticos encontrados nas formas estratificadas, siltitos e de arenitos.

Os minerais carbonáticos desta região foram depositados durante o Cretáceo há cerca de 120 milhões de anos (VIANA; NEUMANN, 2002).

Figura 1- Bacia Sedimentar do Araripe

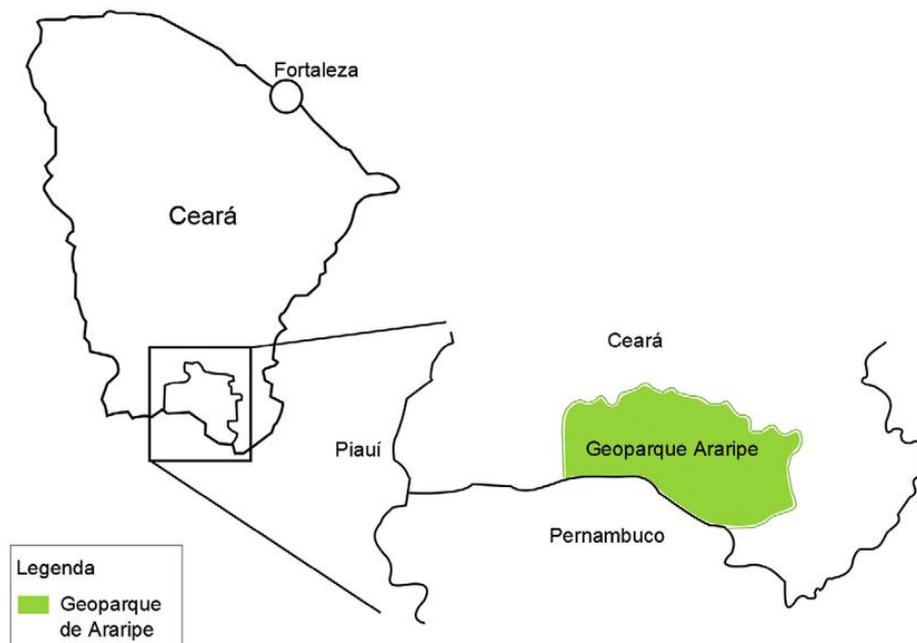


Fonte: Manso; Hessel (2012).

A relevância econômica do carbonato de cálcio deve-se ao fato de ser uma matéria prima em vários segmentos industriais, a saber: açucareira, produção de alumínio, fabricação de papel e na construção civil. Ademais, pode ser utilizado como insumo na agroindústria para a correção de solos ácidos (BEZERRA, 2015).

A economia do município de Nova Olinda gira basicamente em torno da extração do calcário laminado. Segundo Castro (2009), a produção da Pedra Cariri representa a principal fonte de renda dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri. 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 a qual integra a Seção de Parques Nacionais do Serviço Florestal.

Figura 2- Localização do Geopark Araripe



Fonte: Valentin (2013).

As referências iniciais acerca das 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, tendo como base o Relatório Técnico do Projeto de Avaliação Econômica do Granito do Estado do Ceará, concluído no ano de 1989 (MELO e CASTRO *apud* CARVALHO, 2009).

O setor de rochas ornamentais (mármore, granitos, xistos, dentre outras) é um dos segmentos industriais que gera grandes impactos ambientais. Neste setor, os métodos de extração geram volumes de resíduos da ordem de 60% a 70% do total extraído (MELLO *et al.*, 2011). Além disso, a destinação final de tais resíduos é, muitas vezes, inadequada.

Por conta de seu destaque na fabricação de rochas ornamentais, o Brasil produz um volume considerável de resíduos oriundos desse processo. Nesse sentido, pesquisadores buscam alternativas de aplicação destes resíduos, principalmente, na incorporação de produtos que possuem como base o cimento Portland.

Além disso, a preocupação com uso consciente dos recursos minerais deve englobar todo o processo produtivo, iniciando na extração do recurso nas jazidas e finalizando com a obtenção da matéria prima adequada ao uso. Entretanto, muitas vezes os resíduos gerados durante estes processos produtivos são descartados no meio ambiente podendo trazer prejuízos à saúde humana e a fauna e flora da região (FERNANDES *et al.*, 2001).

Segundo Vidal *et al.* (2005), o processo produtivo da Pedra Cariri possui um elevado percentual de perdas devido aos métodos de extração e beneficiamento rudimentares. O referido autor fez um estudo que estimou em um milhão de metros cúbicos a quantidade de resíduos gerada apenas no processo de extração das lajotas de Pedra Cariri.

Por conta disso, a compatibilização ambiental das mineradoras exigirá dos gestores públicos e privados instrumentos de gerenciamento e controle rígidos. Nessa perspectiva, foi criado o Geossítio Pedra Cariri que está localizado a 4 km da cidade de Nova Olinda - CE, às margens da rodovia CE-166 (sentido Nova Olinda - Santana do Cariri), na localidade de Pedra Branca.

Figura 3- Geossítio Pedra Cariri na Chapada do Araripe



Fonte: Geopark (2007).

1.2 Problema

Os vultosos índices de perda no processo de produção da Pedra Cariri são decorrentes de métodos rudimentares utilizados em sua lavra e beneficiamento. Tais rejeitos impactam diretamente no meio ambiente bem como na saúde população local, tornando este fato um problema a ser administrado por todos os setores que fazem parte deste processo produtivo (CAMPOS *et al.*, 2009).

Além disso, o intenso desenvolvimento da construção civil aliado ao crescimento na utilização de bens industrializados têm como consequência um aumento na demanda por matérias primas utilizadas nos processos produtivos destas áreas. Por conta disso, os minerais que são recursos não renováveis necessitam de uma exploração racional de suas jazidas. Caso contrário, podem ter suas reservas levadas à escassez.

Figura 4 – Rejeitos provenientes da lavra e beneficiamento da Pedra Cariri



Fonte: Bastos (2014).

1.3 Justificativa

Esta pesquisa se justifica ao propor uma alternativa de aplicação do resíduo que incorpora a diminuição dos impactos socioambientais oriundos da deposição indevida do mesmo com a oferta de uma nova matéria prima a ser empregada na construção civil.

1.4 Questões de Pesquisa

- a. Quais as características físicas do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC)?
- b. Quais as características químicas do RSPC?
- c. Como a adição do RSPC como fíller, em diferentes teores, afeta as propriedades de argamassas em seu estado fresco?
- d. Como a adição do RSPC como fíller, em diferentes teores, afeta as propriedades de argamassas em seu estado endurecido?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC) como fíller na produção de argamassas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- a. Realizar a caracterização física do RSPC;
- b. Realizar a caracterização química do RSPC;
- c. Examinar as propriedades no estado fresco de argamassas com diferentes teores de RSPC (teor de água retido, reologia, teor de ar incorporado, densidade e trabalhabilidade por meio do *squeeze-flow*);
- d. Examinar as propriedades no estado endurecido de argamassas com diferentes teores de RSPC (resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão axial, retração, absorção por capilaridade e índice de vazios).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pedra Cariri

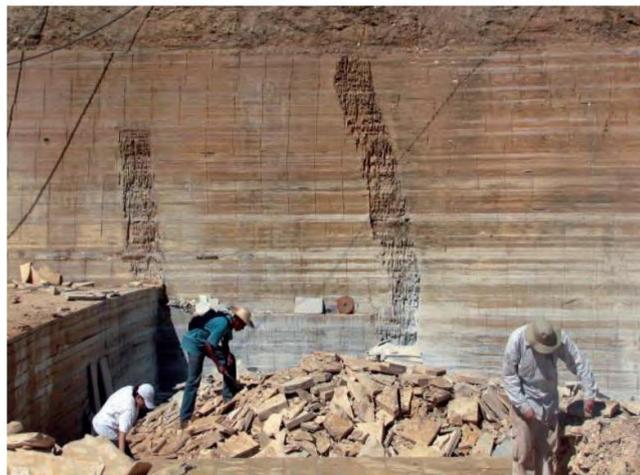
A maior setor de aplicação de rochas ornamentais é o da construção civil. As principais aplicações são em pisos, fachadas e em materiais decorativos. Porém, para serem aplicadas necessitam de características específicas como as de durabilidade e resistência que, por sua vez, são consequências de suas composições e morfologias mineralógicas.

Segundo Vidal *et al.* (2005), o principal constituinte do calcário sedimentar da Bacia do Araripe é o carbonato de cálcio. Além disso, pode-se encontrar também óxidos de magnésio na fase denominada Dolomita responsável pelas diferentes colorações do mineral. Os materiais de cor cinza são características de rochas com magnésio e os de coloração creme claro os formados basicamente por calcita.

A denominação Pedra Cariri refere-se a rocha ornamental obtida a partir da laminação do calcário calcítico cujas peças, normalmente, são aplicadas com suas superfícies naturais sem passarem por processos de polimento. Logo, é adquirida por delaminação mecânica e esquadreamento de placas (MELLO *et al.*, 2011).

O processo simplificado de extração e beneficiamento deste material foi um fator fundamental para possibilitar que a atividade mineradora se desenvolvesse nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri.

Figura 5 - Calcários laminados da Formação Santana



Fonte: Hasui *et al.* (2012).

2.1.1 Lavra da Pedra Cariri

A carência ou inexistência de um planejamento operacional, leva a lavra da Pedra Cariri a uma pequena produtividade e a uma baixa taxa de recuperação. Este fato é evidente quando frentes de mineração são obstruídas por placas quebradas e rejeitos. Inicialmente constatou-se que as placas eram removidas de forma rudimentar com auxílio de talhadeiras e espátulas. Além disso, não existia controle dimensional gerando perdas de material (VIDAL; PADILHA, 2003).

Figura 6 - Lavra rudimentar da Pedra Cariri



Fonte: Adeodato; Vidal (2005)

De acordo com Mendes Filho (2009), a Fundação Núcleo Tecnológico Industrial do Ceará (NUTEC) desenvolveu em 1998 um maquinário responsável por cortes, com discos diamantados, de placas de Pedra Cariri. Portanto, o processo passou a ocorrer de maneira semimecanizada.

Apesar desses estímulos, o processo de exploração da Pedra Cariri sofreu poucas evoluções ao longo das duas últimas décadas. Esse fato prejudica a atividade no âmbito comercial, econômico e ambiental (RODRIGUES; GURGEL, 2018).

Segundo o DNPM-CE (2000) as principais jazidas aprovadas de calcário sedimentar estão situadas no sul do Estado abrangendo os municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda.

A metodologia implementada na extração de Pedra Cariri nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri era a de lavra seletiva a céu aberto. Este método tem como início a remoção da vegetação e do solo depositado sobre a pedra para posterior extração (VIDAL; PADILHA, 2003).

Com alguns incentivos tecnológicos o segmento industrial de rochas ornamentais do Ceará passou a apresentar um parque relativamente moderno, com produção mensal aproximada de 94.000 m² de rochas laminadas. Entretanto, devido a demanda de mercado este segmento é focado no beneficiamento de materiais graníticos (FERNANDES, 2004).

Os fenômenos regionais de erosão do relevo contribuíram para a geomorfologia da Chapada do Araripe, sendo um fator fundamental na qualidade e preservação dos fósseis animais e vegetais. A grande intensidade de fósseis de insetos localizados em um mesmo estrato de rocha calcária indica que as primeiras polinizações de flores por insetos ocorreram no período Cretáceo (RODRIGUES; GURGEL, 2018).

Além de importante fonte de recursos minerais, as formações de Pedra Cariri se destacam pelo seu valor paleontológico, pois nelas são encontradas formações fossilíferas preservadas, como peixes, répteis e plantas como ilustra a figura a seguir (CORDEIRO *et al.*, 2015).

Figura 7- Material Fossilífero proveniente da Formação Santana-CE



Fonte: Cordeiro *et al.* (2015)

2.1.2 Processo de Beneficiamento

O processo de lavra e beneficiamento do calcário laminado objetiva atender as necessidades do mercado de rochas ornamentais. Por conta disso, o principal produto formado são lajotas com dimensões variadas, a saber: 20x20 cm, 30x30 cm, 40x40 cm, 50x50 cm e 15x30 cm (VIDAL; PADILHA, 2003).

Para que as lajotas apresentem as dimensões ideais é realizado, após o processo de lavra, o procedimento de deslocamento. Este processo configura-se a partir da utilização manual de espátulas e martelo por um colaborador que realiza o procedimento de acordo com os planos de clivagem da rocha (BASTOS, 2014).

Figura 8 - Aspecto do deslocamento manual das lajotas



Fonte: Bastos (2014)

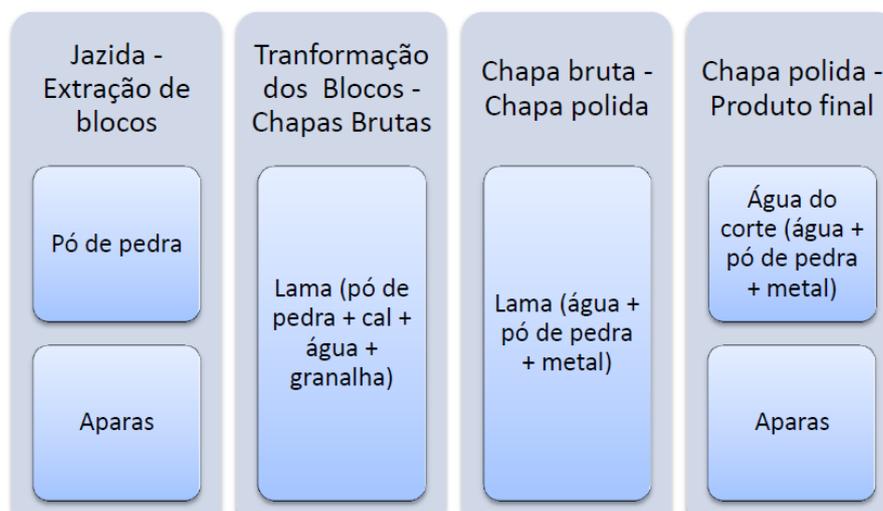
Após a etapa de deslocamento algumas irregularidades permanecem na superfície do material que então são submetidas ao processo de calibragem. Este processo também ocorre de maneira manual com auxílio de espátulas e martelos (BASTOS, 2014).

Por fim, as placas são encaminhadas ao processo de serragem. Nesta etapa, as lajotas serão cortadas nas dimensões requeridas com a utilização de máquinas de esquadrejamento. Devido a utilização de máquinas, os menores produtores não conseguem desenvolver esta etapa e dependem de serrarias da região para a efetivação do processo (BASTOS, 2014).

2.2 Resíduos da Pedra Cariri

A produção de rejeitos é inerente aos processos de exploração e beneficiamento de materiais (BRAGA *et al.*, 2010). O segmento de rochas ornamentais compartilha desta produção, porém devido à vasta variedade de minerais os resíduos deste tipo de exploração possuem características diversificadas. Ademais, as principais etapas do processo que geravam estas perdas eram a lavra propriamente dita e o beneficiamento (VIDAL *et al.*, 2005).

Segundo Gonçalves (2000), nos processos de produção de rochas ornamentais existe principalmente a produção de dois tipos de resíduos, a saber: em forma de lascas e cascos de pedras e em forma de lama. O primeiro é oriundo dos processos de lavra e beneficiamento e o segundo é proveniente da serragem de blocos de rocha. A figura a seguir demonstra o esquema que relaciona o resíduo com a etapa do processo produtivo.

Figura 9 - Esquema de Resíduos x Etapa do Processo

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000)

Segundo Bastos (2014), a forma dos rejeitos está diretamente ligada ao processo ao qual a Pedra Cariri foi submetida e estes são gerados tanto no processo de lavra quanto de beneficiamento. Na lavra são gerados resíduos em forma de lascas de rochas, oriundos das quebras durante a extração. O beneficiamento e suas etapas dão origem a resíduos em forma de aparas e de lama. Normalmente, esta última é originária dos processos de esquadrejamento.

Além do desperdício gerado a partir desses resíduos, o processo manual utilizado nas frentes de lavra gera uma desigualdade dimensional. Este fato, dificulta a inserção do produto nos mercados consumidores nacionais e internacionais (BASTOS, 2014).

Segundo Castro (2009) os principais impactos provocados pelo processo de exploração da Pedra Cariri é o ambiental. Devido ao descarte às margens de corpos hídricos, estes resíduos trazem processos de assoreamento de rios de pequeno e médio porte. Além disso, uma parte destes rejeitos é despejado em regiões próximas à mina e a rodovias causando problemas de poluições do solo.

Neste sentido, diversas minas de lavra são largadas por não estarem em conformidade com as determinações do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Estes ambientes tornam-se improdutivos uma vez que são impróprios para a utilização de outro setor econômico como a agricultura por exemplo (BEZERRA, 2015).

Além da problemática ambiental, a exploração desordenada da Pedra Cariri provoca impactos no patrimônio paleontológico, seja pela exploração ilegal de fósseis, seja pela expansão das pedreiras (CASTRO *et al.*, 2009).

Os produtores de Pedra Cariri foram apoiados pelo Centro de Tecnologia Mineral – CETEM no quesito destinação ambientalmente adequada para os resíduos gerados nos processos produtivos deste mineral. Para tanto, implementou-se a melhoria da metodologia empregada nos sistemas de lavra e buscar soluções para reaproveitamento dos resíduos em novos sistemas sólidos e líquidos (CASTRO *et al.*, 2007).

Os resíduos de rochas ornamentais possuem uma vasta aplicabilidade em indústrias como: construção civil, produção de cerâmicas, fabricação de tintas, siderurgia, dentre outras. De acordo com estas possibilidades, o setor de construção civil é aquele que apresenta maior potencial para absorver os resíduos de rochas ornamentais, pois consome recursos minerais em seus processos produtivos. Os resíduos de granito e mármore, por exemplo, possuem características físicas, químicas e mecânicas que possibilitam sua implementação em matrizes cimentícias (SHIRAZI, 2011).

Figura 10 – Rejeitos de serragem na forma de lascas e aparas



Fonte: Suassuna *et al.* (2012).

2.3 Resíduos de Rochas Ornamentais Aplicados em Matrizes Cimentícias

A adição de filleres em busca de se melhorar o desempenho tecnológico de matrizes cimentícias foi objeto de vários estudos. Soroka e Setter (1997) foram precursores nessas pesquisas. De acordo com suas análises a granulometria e o teor de adições minerais estão relacionados de maneira direta com o aumento da resistência mecânica dos materiais estudados. Esta melhoria foi atribuída ao incremento na velocidade de hidratação, que atualmente é conhecido como efeito de nucleação.

As adições de minerais em matrizes cimentícias podem ser compreendidas como materiais empregados conjuntamente com o cimento Portland em busca de se obter um produto com uma elevada performance tecnológica.

O método de adição mineral consiste em adicionar materiais silicosos finamente divididos em concretos e argamassas com teores que variam de 6% a 70% da massa total do material. Esta adição visa melhorar propriedades como resistência à fissuras, permeabilidade e resistência a compressão (MEHTA E MONTEIRO, 2011).

De acordo com Dal Molin (2011), as adições minerais em matrizes cimentícias são aquelas que necessitam do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para a síntese de compostos hidratados como o C – S – H. As substituições em conjunto com o cimento Portland na presença do hidróxido de cálcio e gipsita aceleram o processo de hidratação como nas escórias de alto forno.

Os fílleres são materiais finamente divididos com granulometria próxima ao do cimento. Logo, suas contribuições aplicam-se às características físicas da matriz de cimento. Estes efeitos físicos são visíveis em relação ao empacotamento granulométrico da mistura e em relação aos pontos de nucleação. Podem ser citados como exemplos o calcário, pó de quartzo e pó de pedra (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os fílleres possuem duas origens distintas podendo ser naturais ou processados, sendo importante que apresentem propriedades uniformes, especialmente a finura. Quando adicionados as matrizes cimentícias tendem a gerar um aumento na demanda de água. Entretanto, para se evitar tal efeito pode-se recorrer a utilização de aditivos redutores de água que auxiliarão na manutenção da resistência mecânica das matrizes cimentícias (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) os materiais pozolânicos são aqueles formados por silicatos ou associações com alumínio e que não possuem propriedades cimentícias. Entretanto, ao serem finamente separados e na presença de umidade conseguem reagir com o hidróxido de cálcio, liberado durante a hidratação do cimento Portland, gerando compostos com propriedades cimentícias.

Por possuírem áreas específicas elevadas, os fílleres minerais ocupam os espaços entre os grãos de cimento produzindo o efeito de nucleação e diminuindo a porosidade. Por conta disso, o crescimento de cristais ocorrerá nas superfícies dos grãos e nos poros influenciando diretamente a cinética de hidratação (DAL MOLIN, 2011)

Na produção de concretos com adição de fílleres de resíduos gerados em beneficiamentos de rochas ornamentais, pesquisadores, entre os quais Arel (2016); Shirule *et al.*, (2012); Ergun (2011) e Gonçalves (2000), analisaram o potencial de utilização destes

resíduos em forma de pó na substituição parcial ao cimento. A Tabela 1 demonstra alguns dos resultados obtidos nessas pesquisas.

Tabela 1 – Resultados Conclusivos de Estudos de Substituição

AUTORES	GONÇALVES (2000)	ERGUN (2011)	SHIRULLE <i>et al.</i>, (2012)	AREL (2016)
Resíduo Estudado	Granito	Mármore	Mármore	Mármore
Conclusão	Teor de substituição possível: 10%	Teor de substituição possível: 5%	Teor de substituição possível: 10%	Teor de substituição possível: 5% a 10%

Fonte: Gonçalves (2001); Ergun (2011); Shirulle *et al.*, (2012) e Arel (2016), adaptado pelo autor.

Segundo Alves (2008) e Moura (2013), por não apresentarem atividades pozolânicas os resíduos de rochas ornamentais apenas podem substituir o cimento Portland em quantidades não superiores a 10%. Por conta disso, a alternativa de aplicabilidade de tais resíduos não seria capaz de absorver os volumes gerados nos processos de mineração. Entretanto, alguns resíduos possuem características semelhantes aos agregados naturais podendo substituí-los na produção de concretos e argamassas.

Os resultados apresentados nos estudos aqui descritos, foram oriundos dos processos de serragem de rochas ou do processo de polimento das placas extraídas para acabamento final.

Alguns estudos foram realizados com o intuito de se verificar a utilização dos resíduos de serragem de rochas ornamentais, como fator substitutivo ao agregado miúdo natural em concretos (BINICI, *et al.*, 2007; DEMIREL, 2010; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013; ALIABDO, 2014; 36 SINGH *et al.*, 2016). Os resultados destes estudos estão apresentados, de forma resumida, na tabela a seguir.

Tabela 2 – Resultados Conclusivos - Substituição do Agregado Natural

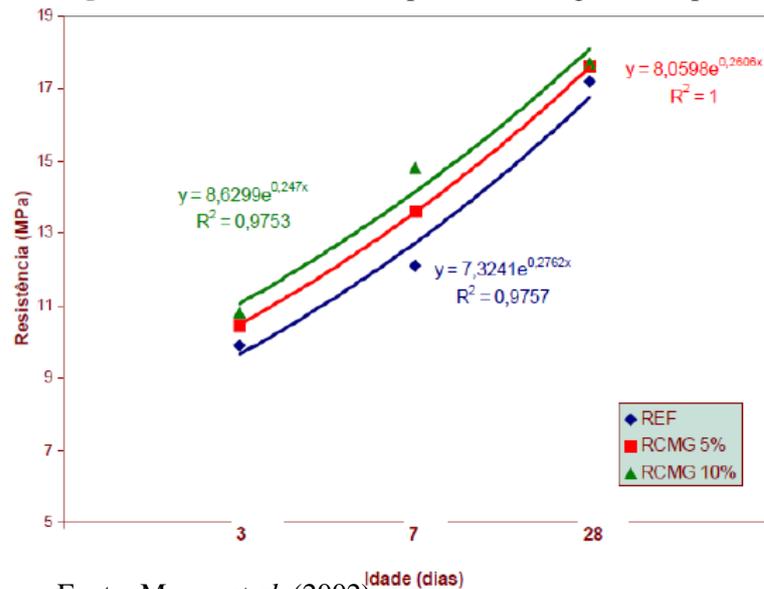
AUTORES	BINICI <i>et al.</i> , (2007)	DEMIREL (2010)	VIJAYALAKSHMI, <i>et al.</i> , (2013)	ALIABDO (2014)	SINGH <i>et al.</i> (2016)
Resíduo	Mármore	Mármore	Granito	Mármore	Granito
Teores (%)	5, 10 e 15	25, 50 e 100*	5, 10, 15, 20 e 25	5, 10 e 15	10, 25, 40, 55 e 70
Resistência à Compressão	Aumentou	Aumentou	Equivalente até o teor de 15%	Aumentou para o teor de 10%	Melhor ou equivalente até o teor de 55%
Características De Durabilidade	Melhorou a resistência ao ataque de sulfatos e diminuiu a permeabilidade à água.	Diminuição da porosidade dos concretos produzidos.	Taxa de penetração por cloretos, permeabilidade à água e profundidade de carbonatação apresentaram-se equivalentes até o teor de 15%.	Porosidade diminuiu com o aumento do teor de substituição até 10%.	Profundidade de carbonatação e absorção de água foi menor para todos os teores estudados.
Teor Ideal de Resíduo	15%	100%	Equivalente até o teor de 15%	10%	55%

Fonte: Binici *et al.* (2007); Demirel (2010); Vijayalakshmi *et al.*, (2013); Aliabdo *et al.*, (2014); Singh *et al.* (2016), adaptado pelo autor.

A análise destas pesquisas demonstra semelhanças em relação as características físicas das rochas calcárias britadas e os resíduos de Pedra Cariri, utilizados na presente pesquisa.

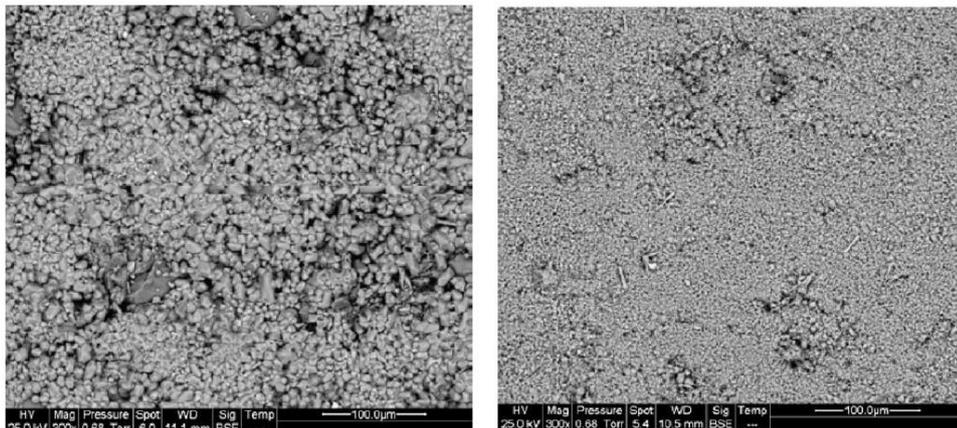
Neste sentido, o trabalho de Moura *et al.*, (2002) foi um dos pioneiros no Brasil a averiguar a possibilidade de utilização dos resíduos de corte e mármore e granitos (RCMG) em substituição parcial do agregado miúdo em argamassas.

Para tanto, ele utilizou um traço de 1:6, em massa, com um índice de consistência fixado em 260 ± 10 mm. Os teores utilizados foram de 5%, 10% e 20%, em relação à massa de areia. Por fim, a resistência à compressão das argamassas em diferentes idades e os resultados estão demonstrados na figura a seguir.

Figura 11 - Resistência à compressão das argamassas produzidas

Fonte: Moura *et al.* (2002)

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a resistência a compressão de argamassas com RCMG teve um aumento para os teores analisados. Para as argamassas com teores de 10% de RCMG o aumento de resistência ficou próximo de 8%. Esta melhoria no desempenho tecnológico foi atribuída à granulometria do resíduo, que melhorou a distribuição do conjunto proporcionando o refinamento da estrutura dos poros. A figura a seguir demonstra este efeito através de uma microscopia eletrônica de varredura.

Figura 12- Micrografias: a) com 5% de calcário e b) com 20% de calcário

Fonte: Moura *et al.* (2002)

(b)

Cruz *et al.* (2003) baseou-se no estudo desenvolvido por Moura *et al.* (2002) e verificou a viabilidade de substituição agregado natural de argamassas por resíduos de rochas ornamentais. Para tanto, utilizou um traço de 1:3 (cimento: areia), em massa, e a relação a/c

foi fixada em 0,48. Com teores de substituição da areia pelo resíduo de rochas em 5, 10, 15 e 20%, em massa. Avaliou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Quanto à primeira verificou que os valores aumentaram com o aumento do teor de resíduo, sendo que os melhores resultados foram obtidos nas misturas com percentuais de 15% e de 20%. Por fim, com relação ao módulo de elasticidade, houve um crescimento deste para as argamassas com até 15% de resíduo. Os autores relacionaram este comportamento a uma adequada distribuição granulométrica proporcionada pelo resíduo.

Tenório *et al.* (2005) analisaram as possíveis influências da substituição do agregado natural em argamassas por resíduos do beneficiamento de chapas de granito em diferentes proporções. Utilizaram o traço de 1:3, em massa, com índice de consistência de 250 ± 10 mm. As proporções de agregado utilizado foram de 5 e 10%. Os resultados das propriedades das argamassas em seu estado fresco podem ser visualizados na tabela a seguir.

Tabela 3 – Propriedades no estado fresco das argamassas

Argamassa	Massa Específica (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)	Consistência (mm)	Retenção de água (%)
REF	2,08	5,82	256	97,79
5AR	2,12	4,20	247	98,18
10AR	2,13	3,17	256	98,48

Fonte: Tenório *et al.*, (2005)

Nota: 5AR – argamassa com 5% de resíduo de granito; 10AR – argamassa com 10% de resíduo de granito.

De acordo com Tenório *et al.* (2005), o teor de ar incorporado foi reduzido devido a adição do resíduo. Este fato é decorrente de uma maior finura do resíduo quando comparado ao agregado natural que possibilita um melhor preenchimento dos vazios.

Segundo Tenório *et al.* (2005), a trabalhabilidade foi afetada indiretamente pela necessidade de acréscimo de água para as argamassas com 10% de substituição. Logo, inferiu-se que a substituição do resíduo de beneficiamento de chapas de granito reduziu a trabalhabilidade.

Tenório *et al.* (2005) também avaliaram a resistência a compressão das argamassas que utilizavam resíduo de beneficiamento de chapas de granitos como substituinte parcial ao agregado natural. Os resultados podem ser observados na tabela a seguir.

Tabela 4 – Resistência à compressão das argamassas

Argamassa	Resistência à compressão (MPa) – Desvio relativo máximo (%)		
	7 dias	28 dias	56 dias
REF	15,9 (2,6)	20,3 (3,4)	22,9 (4,8)
5AR	17,5 (4,2)	22,3 (5,1)	23,2 (2,2)
10AR	19,3 (1,2)	24,2 (5,1)	25,0 (1,8)

Fonte: Tenório *et al.*, (2005)

Nota: 5AR – argamassa com 5% de resíduo de granito; 10AR – argamassa com 10% de resíduo de granito.

Segundo Tenório *et al.* (2005), a utilização dos resíduos provocou uma melhoria na resistência à compressão das argamassas quando comparadas à argamassa referência. Esta melhoria foi verificada pelos autores de maneira mais expressiva na argamassa com 10% de substituição.

Benachour *et al.* (2008) desenvolveram um estudo cujo objetivo era a verificação das quantidades máximas de fíller que deveriam ser adicionadas para que os materiais cimentícios não perdessem desempenho (relacionado com as propriedades microestruturais, mecânica e de durabilidade). Na pesquisa foram formuladas argamassas com quantidades de fíller calcário variando entre 15% e 45%, em massa.

Com o índice de consistência fixo, os autores verificaram que a relação água cimento diminuiu para argamassas com 15% de fíller calcário e um aumentou para as argamassas com teores de fíller mais elevadas. De acordo com Benachour *et al.* (2008), este comportamento é explicado pelos efeitos opostos e concomitantes. Nos primeiros a água foi adsorvida na superfície das partículas de fíller que apresenta uma área específica do que a areia aumentando a demanda de água aumenta devido ao fenômeno da adsorção. No outro, as partículas de fíller preenchem os espaços vazios de modo que a água fica com uma menor quantidade de espaços nos poros disponíveis. Concluíram então que geralmente a quantidade de água livre decresce ao passo que a quantidade de água adsorvida aumenta. Kelestemur *et al.* (2014) analisaram utilizar resíduo em pó de mármore com fibra de vidro, contra os efeitos nocivos de baixas temperaturas, em argamassas de cimento.

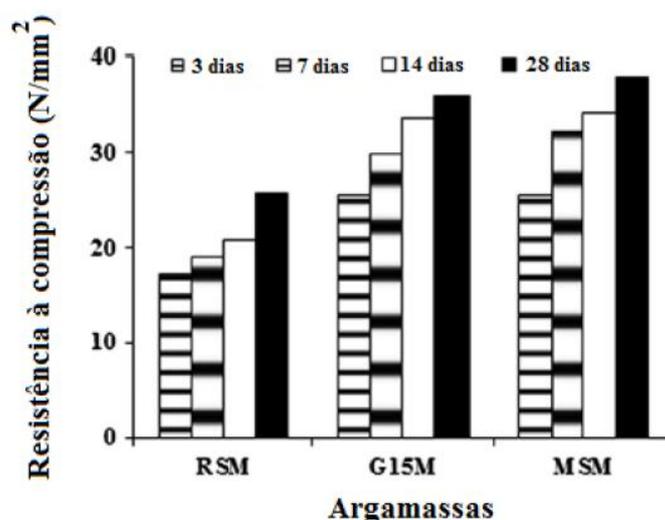
Para tanto fabricaram corpos de prova de argamassa contendo resíduo de mármore, em substituição à areia, nos teores de 20, 40 e 50%, em volume. Já em relação a fibra de vidro, utilizou-se os seguintes valores: 0,25kg/m³, 0,50kg/m³ e de 0,75kg/m³. A relação a/c foi mantida constante e utilizou-se 1% de aditivo superplastificante, em relação ao peso do cimento.

De acordo com os autores, a substituição de fibra de vidro não gerou resultados satisfatórios, apesar de que o comportamento a flexão foi melhorado. Entretanto, as argamassas produzidas apenas com substituição do agregado miúdo pelos resíduos de mármore apresentaram resistência a compressão elevados para todo o espectro de substituição estudado. O melhor comportamento relativo a resistência à compressão deu-se na argamassa com 20% de resíduo com uma melhoria de cerca de 8% em relação a argamassa referência.

Segundo Kelestemur *et al.* (2014), esses resultados são atribuídos ao fato de o resíduo de mármore possuir uma granulometria menor que o agregado natural utilizado favorecendo, portanto, um preenchimento dos vazios da matriz cimentícia mais adequado.

Jeyaprabha *et al.* (2016) estudaram argamassas com substituição do agregado natural por resíduo de serragem de granito e as consequências de elevadas temperaturas no processo de extinção do fogo por resfriamento. Para alcançar tais objetivos os autores fabricaram três misturas, a saber: referência (RSM), 15% de substituição (G15M) e a última com 100% de substituição (MSM). Estas misturas foram submetidas a ensaios que não são objetivo de estudo desta pesquisa, por conta disso, apenas os resultados referentes a resistência a compressão foram ilustrados na figura a seguir.

Figura 13- Resistência à compressão de argamassas



Fonte: Jeyaprabha *et al.* (2016)

Com base nos resultados ilustrados pela Figura 13, os autores observaram que as argamassas contendo resíduo de granito em 15% e 100% de substituição, em massa, apresentaram um aumento apreciável na resistência à compressão, para todos os períodos de cura, quando comparados com a argamassa de referência (RSM). Jeyaprabha *et al.* (2016)

relacionaram este aumento na resistência à compressão ao melhor preenchimento proporcionado pelo resíduo de granito, devido a sua elevada finura.

De acordo com o levantamento bibliográfico, verificou-se que alguns estudos foram realizados a fim de verificar a viabilidade da utilização do RSPC em compostos a base de cimento. Como exemplo, tem-se: Silva (2008), Guimarães e Moura (2013), Bastos (2014), Galvão *et al.* (2016) e Mercês e Moura (2016).

Silva (2008) analisou a viabilidade da RSPC na produção de argamassas. O resíduo serviu como substituinte do cimento e do agregado miúdo natural, ambos nos teores de 5, 10, 15, 20 e 25%, em massa. A granulometria do resíduo era superior a 0,296 mm, descartando-se a fração com dimensão inferior. O traço utilizado foi 1:3 e a relação a/c foi mantida constante com o valor de 0,6.

As argamassas produzidas foram ensaiadas quanto à resistência à compressão. Os resultados para substituição em relação ao cimento e ao agregado natural podem ser visualizados, respectivamente, nas tabelas a seguir.

Tabela 5 – Resistência à compressão – substituindo o cimento

Teor de RSPC (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
0	15,62	15,44	19,94
5	12,77	13,64	13,57
10	10,28	13,74	13,52
15	13,27	13,19	15,37
20	8,82	10,49	14,54
25	7,50	10,49	10,83

Fonte: Silva (2008)

A partir dos resultados obtidos verifica-se que as argamassas com RSPC demonstraram menor resistência à compressão para todos os teores estudados quando comparadas argamassa referência.

Em relação a substituição do agregado natural pelo RSPC, os resultados da pesquisa de Silva (2008) podem ser visualizados na tabela a seguir.

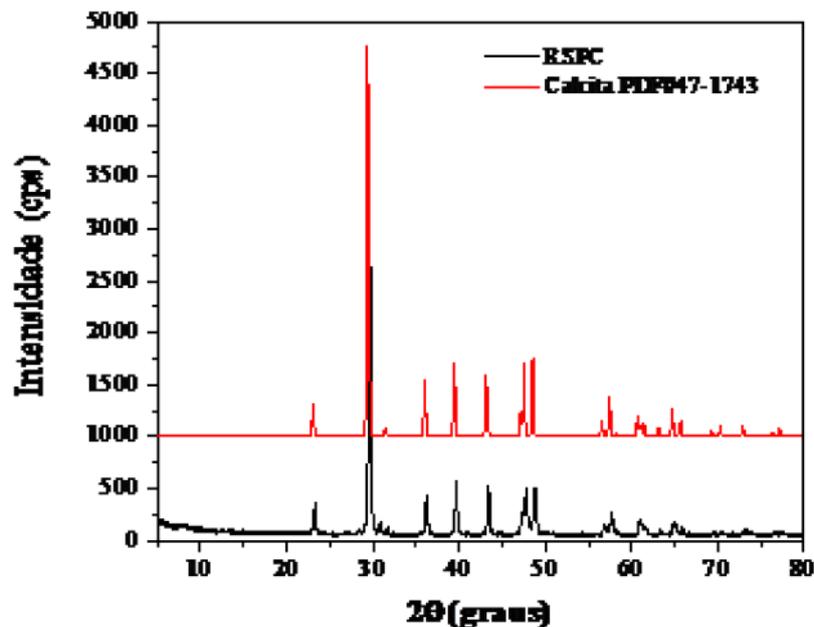
Tabela 6 – Resistência à compressão - substituindo o agregado natural

Teor de RSPC	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
0	15,73	18,99	17,24
5	9,49	14,24	16,49
10	11,42	19,24	14,24
15	14,99	18,49	14,24
20	16,23	13,74	13,49
25	14,74	13,99	15,74

Fonte: Silva (2008)

De acordo com resultados obtidos, Silva (2008) conclui que a substituição do agregado natural pelo RSPC acarretou em uma redução na resistência à compressão das argamassas, para a totalidade de teores de substituição estudados.

Guimarães e Moura (2013) analisaram a influência da adição do RSPC na alcalinidade massas de cimento Portland. A partir de uma análise química os autores observaram que a adição de RSPC aumentou o pH da mistura à base de cimento Portland. A espectroscopia de raios X por dispersão de energia – EDX, ilustrou que o RSPC é formado basicamente por óxido de cálcio, com mais de 95% deste óxido em sua composição. A figura a seguir ilustra o difratograma de raio –X obtido para o RSPC.

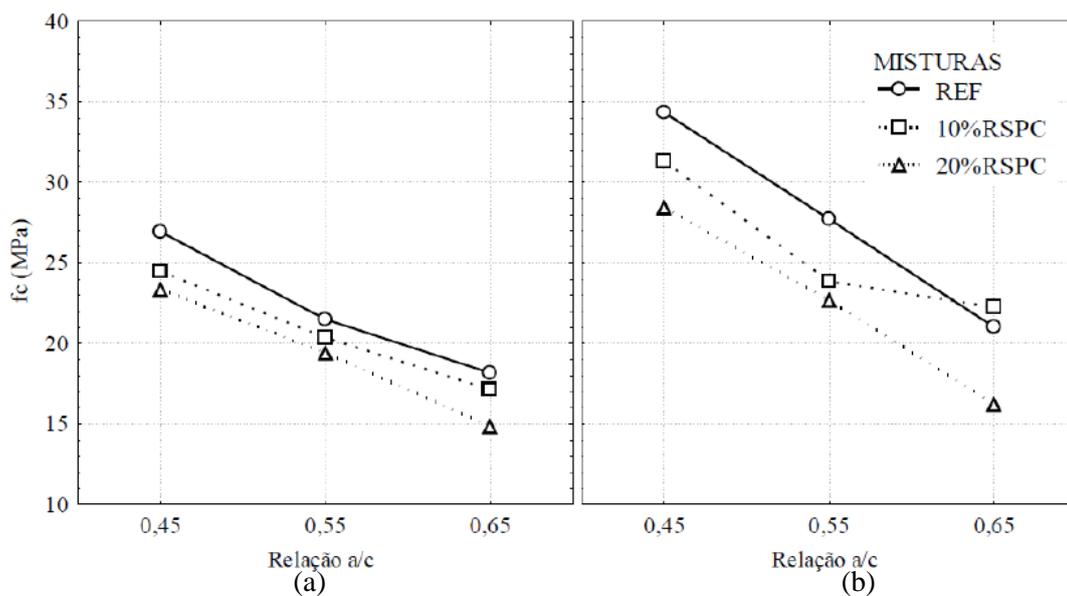
Figura 14- Difratograma de raio-X obtido do RSPC

Fonte: Guimarães e Moura (2013)

Guimarães e Moura (2013) verificaram que o RSPC é tipicamente cristalino e que os picos identificados correspondem ao óxido de cálcio na forma de calcita. Este fato, complementou a análise química e explicou a redução de alcalinidade promovida pelas adições pozolânicas.

Bastos (2014) analisou o uso de RSPC como substituinte parcial do cimento na fabricação de concretos convencionais. Para tanto, utilizou teores de substituição de cimento por RSPC de 10 e 20%, em massa. Em seguida, os concretos produzidos apresentavam relações água/aglomerante de 0,45; 0,55; 0,65. O principal fator avaliado para verificar a influência da substituição foi a resistência à compressão axial. A figura a seguir mostra os resultados dessa análise obtidos para um período de cura de 7 dias e de 28 dias respectivamente.

Figura 15- Resistência à compressão axial: a) 7 dias; b) 28 dias



Fonte: Bastos (2014)

A partir dos resultados obtidos Bastos (2014) observou que os concretos substituídos apresentaram comportamento inferior ao de referência. Esse comportamento tecnológico inferior foi explicado pelo autor devido ao fato de que a adição de RSPC acarretou em uma perda no poder cimentante da mistura.

A pesquisa de Galvão *et al.* (2016) avaliou a influência do uso do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri como substituinte parcial da areia natural, na produção de concreto auto adensáveis. Nesta pesquisa, os autores utilizaram o cimento do tipo CP II Z e o agregado natural na proporção, em massa, de 70% de areia fina e 30% de areia média.

A necessidade de se utilizar dois tipos de agregados naturais foi justificada pela necessidade de se obter uma curva granulométrica mais adequada à produção dos concretos autoadensáveis.

Galvão *et al.*, (2016) elaboraram cinco misturas de argamassas, a saber: uma referência e as demais com substituições parciais do agregado natural por RSPC nos teores, em massa, de 15, 20, 25 e 30%. O traço adotado foi o de 1,0:1,4:0,6, em massa, representando a proporção entre o cimento, a areia fina e a areia média. A tabela a seguir demonstra, de maneira resumida, os resultados obtidos para a resistência à compressão e a resistência a tração na flexão.

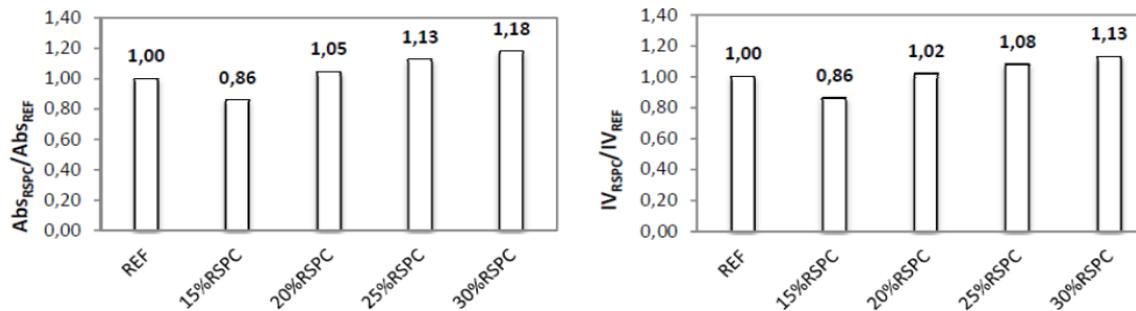
Tabela 7 – Resistências à tração na flexão

Mistura	Resistência à tração na flexão			Resistência à compressão		
	Ft _{médio} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	Fc _{médio} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
REF	11,3	0,6	5,6	44,5	4,9	11,1
15%RSPC	12,8	0,8	6,4	70,4	6,4	9,1
20%RSPC	11,9	0,8	6,3	68,1	6,5	9,5
25%RSPC	11,9	0,9	7,4	67,9	3,1	4,6
30%RSPC	10,1	0,4	4,2	67,7	4,1	6,0

Fonte: Galvão *et al.*, (2016)

Após executarem análises os autores visualizaram incrementos na resistência das argamassas produzidas com substituição dos resíduos de RSPC quando comparados com os valores referência. Observando a variação da resistência a compressão, percebeu-se que o aumento ocasionado foi até 50% superior ao valor da argamassa referência para todos os teores estudados.

Os autores explicitaram que as melhorias nas resistências das argamassas foi decorrência ao efeito *filler* promovido pelo RSPC, tornando-se mais acentuado para teores abaixo de 20%. De maneira complementar, os autores analisaram a influência da demanda de água nas resistências das mesmas, que por sua vez afetou o índice de vazios da mesma. Os resultados dessa análise podem ser vistos na figura a seguir.

Figura 16- Absorção de água e índice de vazios das argamassas

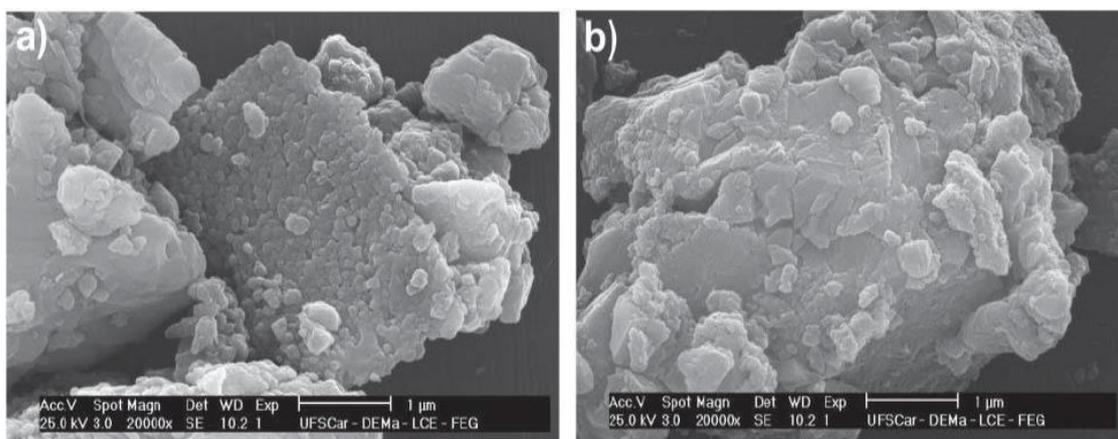
Fonte: Galvão *et al.* (2016)

A partir desses resultados verifica-se que o teor de 15% de RSPC foi o que obteve menor absorção de água e índice de vazios quando comparados com a argamassa de referência. Galvão *et al.* (2016) relacionou este comportamento de menor relação a/c com o preenchimento de vazios proporcionado pelo RSPC.

Além das substituições em matrizes cimentícias, alguns autores verificaram a possibilidade de emprego do RSPC na fabricação de telhas e blocos cerâmicos.

Menezes *et al.* (2010) analisaram a utilização do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri como substituinte da argila em telhas e blocos cerâmicos. Utilizou-se, para tanto, dois tipos de resíduos denominados pela coloração que apresentavam, a saber: o amarelo e o cinza. O resíduo foi caracterizado através da composição química e mineralógica, por difração de raio- X e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.

A partir da análise granulométrica verificaram que 100% da amostra possuía partículas com dimensão inferior a 25, sendo o tamanho médio de partícula de 4,9 e 6,1µm para o resíduo amarelo e cinza, respectivamente. A microscopia eletrônica de varredura pode ser representada nas imagens a seguir.

Figura 17- Micrografia do RSPC: a) amarelo; b) cinza

Fonte: Menezes *et al.* (2010)

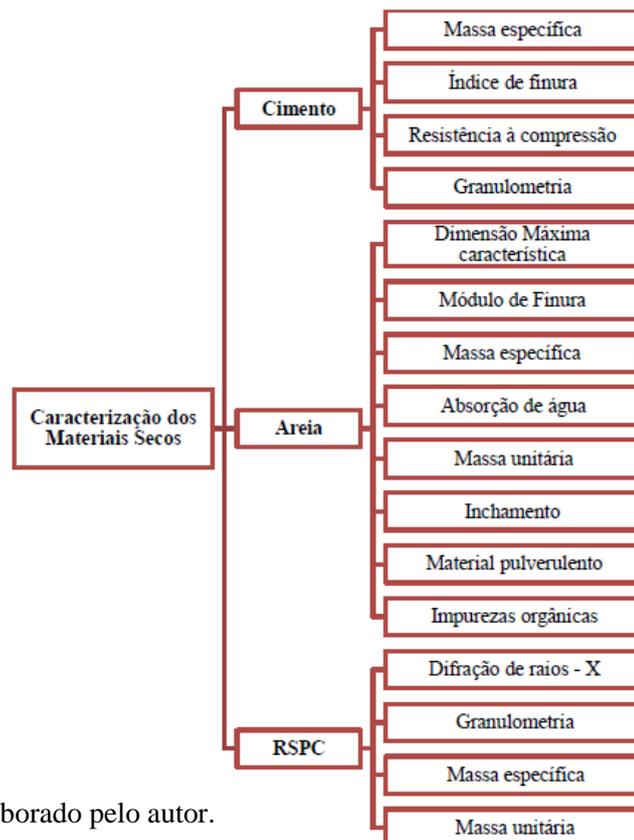
De acordo com Menezes *et al.* (2010), as amostras do resíduo de pedra Cariri são formadas por partículas com dimensões inferiores a 1 µm e possuem forma lamelar. Esta visualização justificada pelos autores como sendo consequência da origem geológica da rocha mãe que consistia de sedimentos estratificados. Além disso, os resultados da análise química mostraram que os resíduos eram constituídos basicamente por óxido de cálcio e que apenas se diferencia pelo fato de que o resíduo cinza apresentou óxido de magnésio em sua composição, indicando a presença de dolomita.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para execução desta pesquisa foram utilizados cimento Portland, agregado natural, resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) e água. Os materiais secos seguiram as orientações e determinações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para suas respectivas caracterizações. O organograma a seguir ilustra as características estudadas em cada material

Figura 18- Organograma dos ensaios de caracterização dos materiais secos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Resíduo de Serragem de Pedra Cariri

A Pedra Cariri foi fornecida pelo Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos (LDMC) da UFC. Inicialmente a Pedra Cariri encontrava-se na forma de placas, que é o formato mais empregado em termos comerciais, e apresentava pontos de umidade e impurezas.

Figura 19- Pedra Cariri em formato de placas



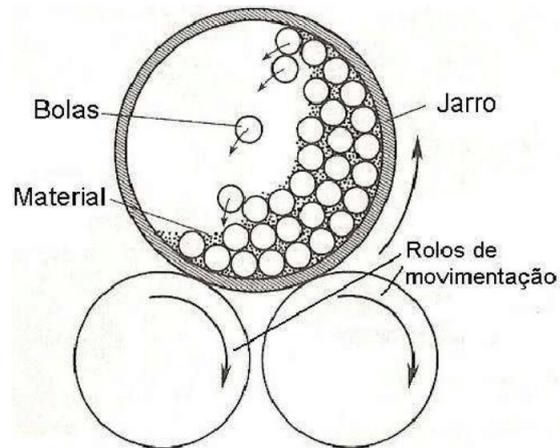
Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente foi submetido a uma secagem livre por 24 horas e em seguida passou por um processo de moagem no Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos (LDMC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) através do processo por moinho de bolas.

O processo de moagem em moinhos de bolas é um dos processos clássicos para a fabricação de pós a partir de materiais frágeis, utilizando-se para isso impacto mecânico através de bolas. Como o jarro gira em torno do seu eixo, as bolas colidem continuamente com o material, transformando-o em pó Zanatta (2007).

As figuras a seguir apresentam o esquema de um jarro carregado com bolas e o material a ser moído e os moinhos idealizados para a pesquisa e de fato utilizado no estudo.

Figura 20- Esquema de moinho de bolas



Fonte: Zanatta (2007).

Figura 21- Moinho de bolas idealizado para a pesquisa



Fonte: Catálogo Quimis 28ª edição (2014).

Figura 22- Moinho de bolas utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Zanatta (2007) a rotação do jarro é adequada para uma máxima velocidade de impacto. Por conta disso, ela torna-se 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.

Após estas etapas, o material foi submetido a um processo de destorroamento, quarteamento e peneiramento. Posteriormente, o resíduo destorroadado e seco foi submetido a passagem por uma peneira de 4,8 mm de abertura. Em seguida, foi submetido mais uma vez a um processo de secagem em estufa à 110°C por 24 horas. Tratando-se de um resíduo que iria ser empregado na formulação de argamassas o mesmo passou por uma peneira de 2,4 mm e foi utilizado o material passante.

Figura 23- Aspecto do material passante na peneira 2,4mm.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Posteriormente, o material foi pesado e acondicionado em sacolas de maneira separada a fim de se obter as quantidades ideais a serem utilizadas na produção dos corpos de prova.

3.1.2 Cimento

O cimento a ser utilizado será o do tipo CII Z-32 por ser o mais comumente utilizado em Fortaleza - CE e sua Região Metropolitana. Segundo Bastos (2014), este é o principal tipo de cimento utilizado na região do Cariri Cearense, local onde encontra-se grandes volumes de resíduos de Pedra Cariri. Além disso, o cimento a ser empregado deverá

atender todos os limites estabelecidos pela NBR 11758 (ABNT, 1991) e NBR 11759 (ABNT, 2012). Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização do cimento e os resultados podem ser observados na tabela seguir.

Tabela 8 – Propriedades do cimento utilizado no estudo

Propriedades avaliadas	Resultados	Limite da norma NBR 11758 (ABNT, 1991)	Norma
Massa específica	3,0 kg/dm ³	Não se aplica	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Índice de finura	0,86	≤12	NBR 11579 (ABNT 2012)
Resistência à compressão	7 dias 29,3 (MPa) 28 dias 36,4 (MPa)	≥20 ≥32	NBR 7215 (ABNT, 1996)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que o cimento atendeu aos limites estabelecidos pela norma NBR 11758 (ABNT, 1991), quanto aos parâmetros avaliados. Além desses ensaios descritos acima, também foi realizada o estudo da granulometria do cimento. Com o auxílio do analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec Plus, com unidade de dispersão úmida. Utilizou-se o dispersante de pirofosfato de sódio, a 0,09 g/L. Este estudo foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os resultados podem ser visualizados na tabela a seguir.

Tabela 9 – Distribuição de dimensões do cimento utilizado

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

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir desses resultados verifica-se que o cimento utilizado apresenta diâmetro médio de 16 µm. Resultado coerente com aqueles cimentos com adição pozolânica.

3.1.3 Agregado Natural

O agregado natural empregado consistirá em uma areia proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). A caracterização do agregado miúdo natural seguirá as normas brasileiras vigentes, a saber: NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 6467 (ABNT, 2003);

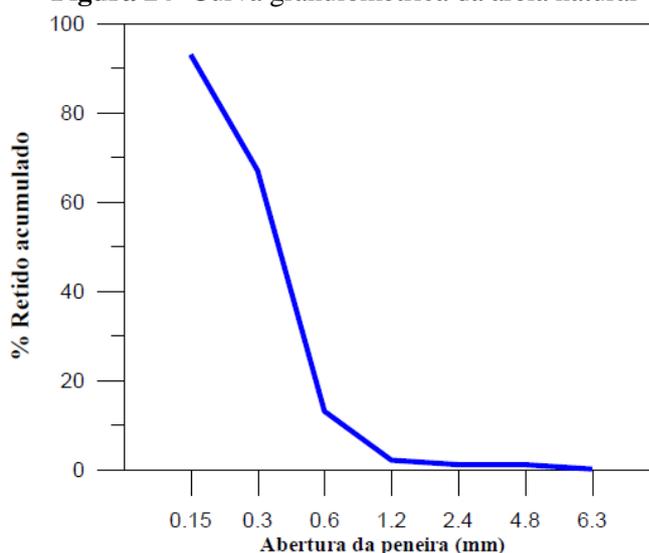
NBR NM 30 (ABNT, 2001); NBR 7251 (ABNT, 1982) e NBR NM 52 (ABNT, 1982). Para tanto serão analisadas as seguintes características: dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica, absorção de água, massa unitária e inchamento. Tais propriedades serão determinadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tabela 10 – Características do agregado natural utilizado na pesquisa

Propriedades Avaliadas		Resultados	Norma
Dimensão máxima característica (mm)		1,2	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura		1,77	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica	Aparente (kg/dm ³)	2,61	NBR NM 52 (ABNT, 1982)
	S.S.S (kg/dm ³)	2,62	
	Agregado seco (kg/dm ³)	2,62	
Absorção de água (%)		0,10	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Massa unitária (kg/dm ³)		1,60	NBR 7251 (ABNT, 1982)
Inchamento	Coefficiente de inchamento médio	1,30	NBR 6467 (ABNT, 2003)
	Umidade crítica (%)	1,50	
Material pulverulento (%)		2,10	NBR NM 46 (ABNT, 2003)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A granulometria do agregado natural utilizado foi determinada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2011) e o agregado apresentou um módulo de finura de 1,77, o que a caracteriza como sendo uma areia fina.

Figura 24- Curva granulométrica da areia natural

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Caracterização Física do RSPC

Algumas propriedades físicas do RSPC foram determinadas no LDMC e no LMCC seguindo os procedimentos da legislação normativa vigente. Para tanto, na caracterização física do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri RSPC determinou-se a granulometria, massa específica, limite de plasticidade e a massa unitária.

Para determinação da granulometria do RSPC seguiu-se os procedimentos da NBR 7251 (ABNT, 1982). O ensaio foi realizado com o auxílio do analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec Plus do Núcleo de Tecnologia e Qualidade industrial do Ceará (NUTEC) com unidade de dispersão úmida. Foi utilizado como dispersante água deionizada e o tempo de dispersão foi de 15 minutos.

Neste procedimento 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 a seguir.

Tabela 11 – Dimensões de tamanhos das partículas do RSPC utilizado

Distribuição de tamanhos	Diâmetro (μm)
< 90 (D ₉₀)	14,8
< 50 (D ₅₀)	4,5
< 10 (D ₁₀)	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

O RSPC é caracterizado por uma dimensão média de 4,5. Por conta desta dimensão característica bastante fina o resíduo é considerado um fíller. Isso se deve ao processo de moagem ao qual a rocha foi submetida que gerou um resíduo muito fino.

Além disso, foram realizados ensaios para a determinação da massa unitária e massa específica do RSPC seguindo as diretrizes das normas NBR 7251 (ABNT, 1982) e NBR NM 23 (ABNT, 2001). Os resultados podem ser visualizados na tabela a seguir.

Tabela 12 – Resultados de massa unitária e específica do RSPC

Característica	Resultado
Massa unitária	1,09 kg/dm ³
Massa específica	2,69 kg/dm ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a plasticidade do RSPC foi avaliada, tendo em vista que o mesmo apresenta um aspecto plástico quando a ele é adicionada água e pela tendência que possui de formar torrões quando perde umidade. O limite de plasticidade foi avaliado de acordo com a NBR 7180 (ABNT 1984), que se trata de um ensaio utilizado para avaliar a plasticidade de solos. As Figuras a seguir ilustram o aspecto do RSPC no início do ensaio e na conclusão do mesmo, respectivamente.

Figura 25 - Aspecto do RSPC no início e no fim do ensaio de plasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das definições da norma NBR 7180, (ABNT 1984), o RSPC não atende ao limite de plasticidade que o caracterize como material plástico. Entretanto, observou-se também no ensaio que o resíduo aparenta possuir um pequeno grau de plasticidade, quando comparado com o agregado miúdo natural, uma vez que o resíduo forma uma pasta quando a ele se adiciona água.

A plasticidade dos agregados nas argamassas é característica fundamental para a produção das argamassas, uma vez que afeta a trabalhabilidade e a compacidade das misturas. Além disso, pode vir a contribuir com a aderência da argamassa ao substrato. Entretanto, esta característica pode afetar o processo de fissuração devido aos ciclos de expansão e retração do material.

3.3 Caracterização Química do RSPC

De acordo com Bastos (2014), a espectroscopia de raios X por dispersão em energia – EDX demonstra que a pedra Cariri é constituída basicamente por óxido de cálcio (cerca de 95%). A Tabela 26 ilustra os resultados obtidos pelo autor.

Tabela 13 – Composição química do RSPC avaliada

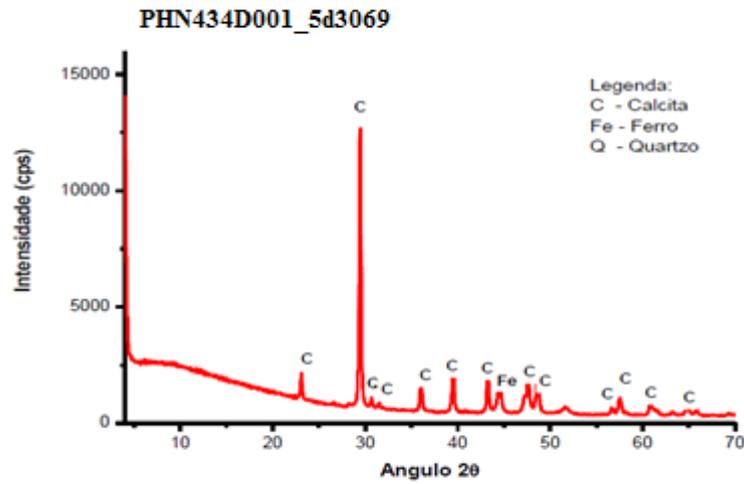
Óxidos	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	SrO	ZnO	CuO
Teor (%)	95,27	1,37	1,33	1,26	0,43	0,25	0,05	0,03

Fonte: Bastos (2014)

Para determinar a estrutura dos compostos do RSPC realizou-se o ensaio de difração de raios-X, no Laboratório de Raios -X da Universidade Federal do Ceará.

Para tanto, utilizou-se um difratômetro modelo X-Pert PRO MPD-Panalytical, com tubo de Co, com intervalos de 2θ variando de 10° e 100° , com passo de $0,013^\circ$ e radiação com comprimento de onda (λ) de $1,788901 \text{ \AA}$ com voltagem de 45kV e corrente de 40mA.

O resultado obtido para o RSPC está ilustrado na Figura 25 e a partir da análise verifica-se que o RSPC é um material tipicamente cristalino, cujos picos são característicos da calcita. Logo, o óxido de cálcio presente no RSPC está sob a forma de calcita.

Figura 26 – Difratoograma do RSPC

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, observou-se a presença de pequenas quantidades de ferro e dolomita, o primeiro muito provavelmente oriundo do desgaste das serras utilizadas no processo de corte da Pedra Cariri durante seu beneficiamento.

3.4 Métodos

Para a formulação das argamassas utilizou-se a substituição em duas etapas, a saber: 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%.

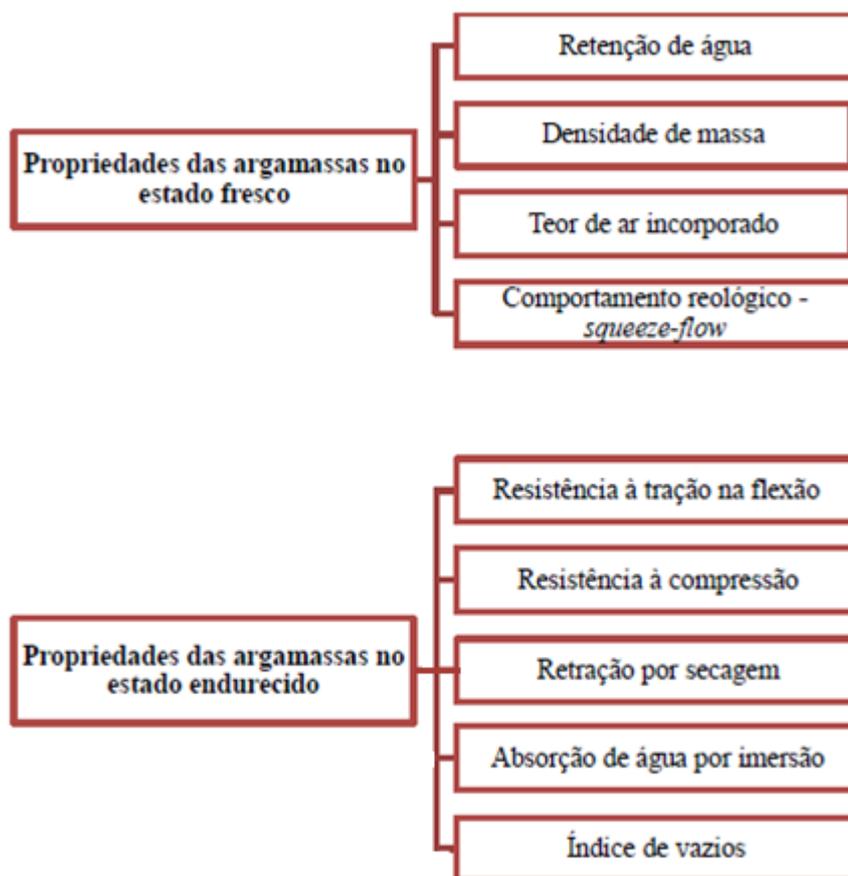
Para garantir a homogeneização da amostra foi realizado a separação em pilhas e em seguida foi realizado o quarteamento através do Quarteador Jones ilustrado a seguir.

Figura 27 – Quarteador Jones

Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa experimental que descreve os principais experimentos que foram utilizados na caracterização dos materiais dessa pesquisa seguiu o organograma apresentado na figura 28 a seguir.

Figura 28 –Organograma das propriedades das argamassas estudadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as etapas de caracterização, as argamassas foram produzidas no LMCC seguindo as diretrizes da NBR16541 (ABNT, 2016). Estas argamassas possuíam traço unitário, em massa, de 1:5 (cimento: agregado), com o índice de consistência de 260 ± 5 mm, com um fator de a/c de 0,5. O índice de consistência para estas argamassas foi determinado a partir da NBR 13276 (ABNT 2002).

Os teores de substituição do cimento, bem como do agregado natural por RSPC foram de 0% (referência), 15%, 25% e 35%, em massa. Foram produzidos seis corpos de prova para cada traço e para cada grupo de substituição (cimento ou areia) que foram ensaiados com 7, 14 e 28 dias. Alguns deles podem ser vistos na figura a seguir.

Figura 29 – Corpos de prova durante processo de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a correta leitura nos equipamentos de determinação dos esforços de resistência a superfície a ser ensaiada não poderia apresentar vilosidades. Para tanto, foram marcados em cada corpo de prova as superfícies lisas que haviam ficado em contato com o molde e, portanto, apresentavam menor quantidade de vilosidades.

3.5 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

Foram realizados no LMCC ensaios das argamassas produzidas em seus estados frescos. Inicialmente, foi determinada a retenção de água através do método estabelecido pela NBR 13277 (ABNT,2005) desenvolvido para argamassas de assentamento e revestimento.

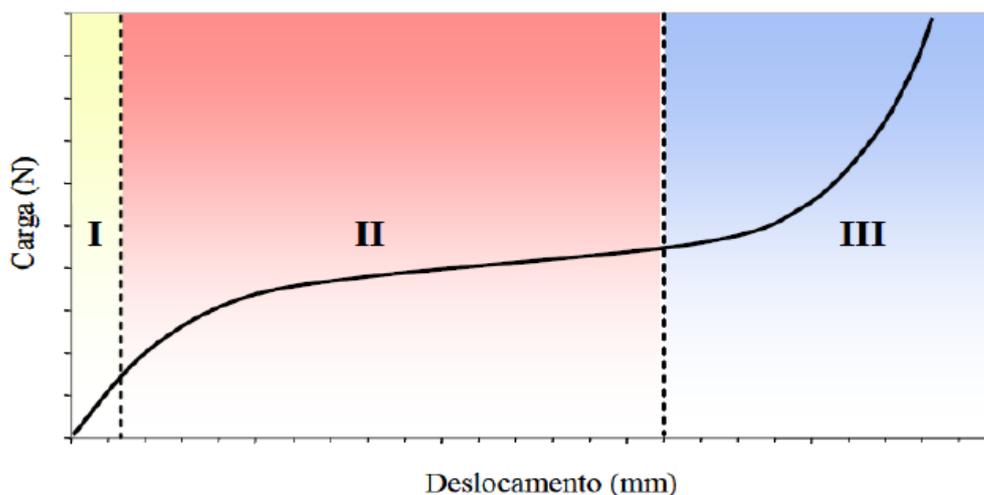
Logo após, foi determinada a massa específica e os teores de ar incorporado a partir das diretrizes da NBR 13278 (ABNT,2005). Em seguida, foi avaliado o comportamento reológico pelo método do *squeeze-flow*.

Este ensaio consiste na medida do esforço necessário para a compressão axial de uma amostra prismática entre duas placas paralelas, por força ou deformação controlada (CARDOSO *et al.*, 2005).

Para tanto, utilizou-se um equipamento universal de ensaios, da marca EMIC com controle de deslocamento e capacidade de 1 kN de carga, com resolutividade mínima de 10 N.

As misturas de argamassa sofreram compressão até atingir o limite de carga de 1 kN ou deslocamento de 9 mm. A velocidade do teste foi de 0,1 mm/s, tendo o início sucessivo ao processo de fabricação das massas dos materiais.

Figura 30 – Curva de carga versus deformação para o ensaio de squeeze-flow



Fonte: BETIOLI *et al.* (2009).

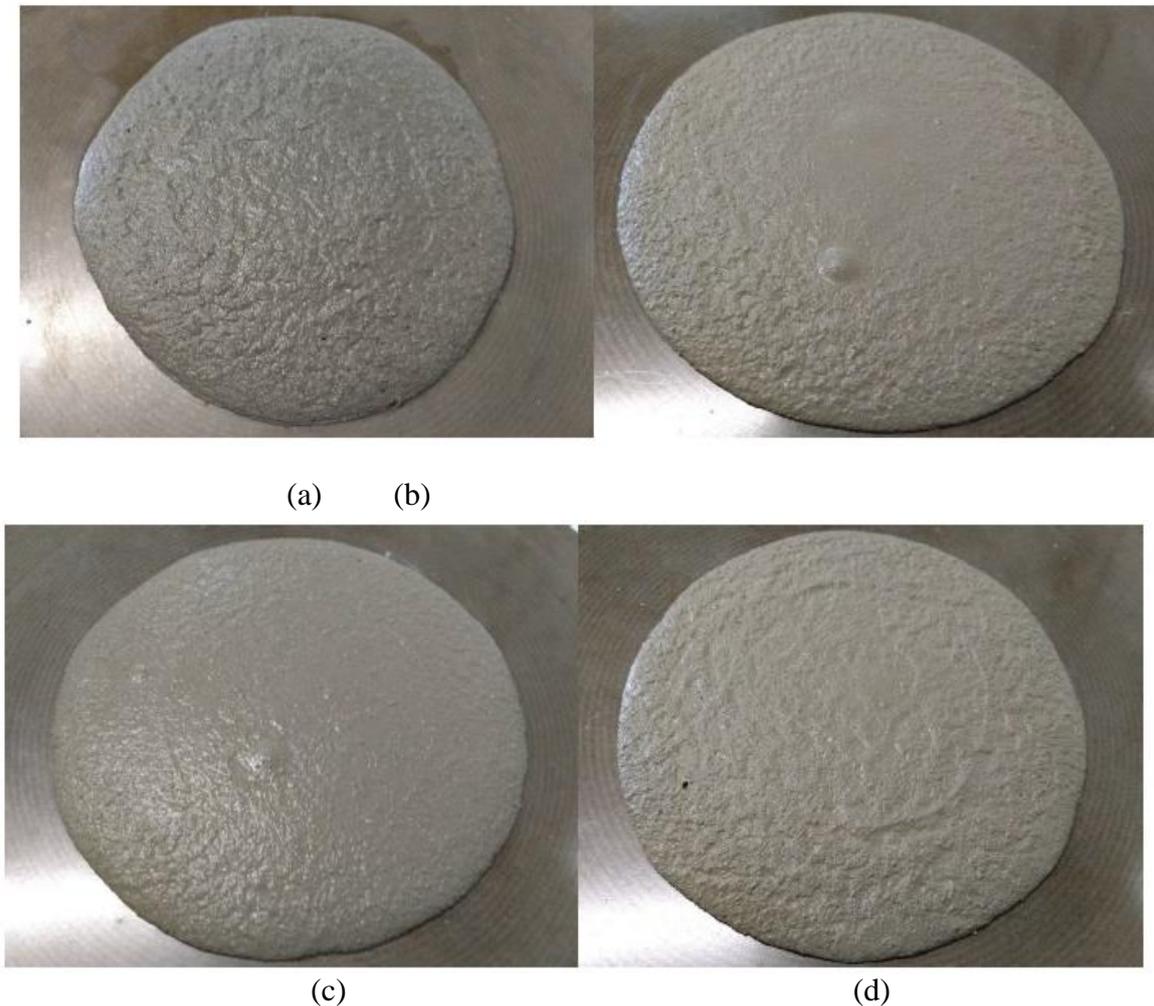
Verificou-se, através do gráfico, que a curva obtida possuía três estratos bem definidos. De acordo com Cardoso *et al.* (2005), Betioli *et al.* (2009) e Cardoso (2009), o primeiro estrato o material comporta-se como um sólido; no segundo estrato o material comportava-se como um fluxo viscoso com deformação plástica e no terceiro estrato é caracterizado por uma grande deformação relacionada a um aumento exponencial da carga necessária para ocasionar deslocamento.

A deformação efetiva do material ocorre por cisalhamento radial, quando a relação entre o diâmetro (D) e a espessura da amostra (h) é elevada, geralmente $D/h \gg 5$.

Segundo Cardoso (2009) e Silva (2015) nem todos os gráficos do ensaio de squeeze-flow apresentam a interface entre os estágios I e II bem definida, uma vez que existe a possibilidade dessas regiões se sobreporem. Por conta disso, algumas curvas apresentam somente a região I+II e a região III.

Além disso, verificou-se que as argamassas que tiveram substituição do seu agregado natural por Resíduo de Serragem de Pedra Cariri apresentavam uma melhor aparência quanto a relação de coesão. Sendo que a argamassa cujo teor de substituição do agregado natural pelo RSPC foi de 25% apresentou o melhor aspecto visual de coesão. Este aspecto pode ser analisado na figura a seguir.

Figura 31 – Argamassas: a) REF; b) 15%RSPC; c) 25%RSPC e d) 35%RSPC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os resultados referentes aos ensaios de propriedades das Argamassas em seu estado fresco serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

3.6 Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

Posteriormente, com as argamassas agora em seu estado endurecido foram realizados ensaios no LMCC para a determinação das resistências. As resistências à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas produzidas foram avaliadas conforme as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram moldados 6 corpos de prova prismáticos, de 4 cm x 4 cm x 16 cm, para cada teor de material substituído. O material foi ensaiado em uma máquina do tipo EMIC com classificação estática, modelo DL 10000, com capacidade máxima de 100kN.

Figura 32 – Máquina responsável pelos ensaios de resistência



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após serem moldados, os corpos de prova permaneceram em seus moldes em temperatura ambiente por 24 horas, sendo desmoldados e colocados na cura em água com cal. Por fim, os mesmos foram ensaiados aos 07, 14 e 28 dias.

Além disso, realizou-se o ensaio de retração por secagem seguindo os procedimentos presentes na NBR 8490 (ABNT, 1984), para todas as misturas de argamassa. Moldou-se 3 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 com aplicação de 15 golpes. A figura a seguir demonstra o aspecto dos corpos de prova dentro dos moldes.

Figura 33 – Corpos de prova sendo moldados para ensaio de retração:



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, analisou-se parâmetros de durabilidade tais como o índice de vazios bem como a absorção de água por imersão a partir do método apresentado pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Para este fim, moldou-se quatro corpos de prova cilíndricos para cada traço com as seguintes dimensões 5 cm por 10 cm. Estes foram ensaiados aos 28 dias de tempo de cura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões acerca das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido serão apresentados nesse capítulo.

Os resultados aqui apresentados farão referência apenas as argamassas nas quais seu agregado natural foi substituído por RSPC, uma vez que a substituição do cimento pelo RSPC se mostrou totalmente inviável para as demais argamassas. Esse fato foi visualizado a partir da impossibilidade de moldagem dos corpos de prova. Ele pode ser justificado a partir da perda das atividades pozolânicas quando a porcentagem de substituição do resíduo de rocha ornamental torna-se elevada.

4.1 Análise das Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

Segundo Alves (2008) e Moura (2013), pelo fato de não apresentarem atividade pozolânica os resíduos de rochas ornamentais devem substituir o cimento Portland em quantidades não superiores a 10%. Por conta disso, a alternativa de aplicabilidade de tais resíduos seria melhor empregada na substituição dos agregados naturais.

Inicialmente, serão demonstrados e discutidos os resultados referentes as propriedades das argamassas em seu estado fresco, tais como: densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água e reologia (método *squeeze-flow*).

Os resultados das médias das densidades de massa das argamassas produzidas nessa pesquisa encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 14 – Densidade de massa das argamassas

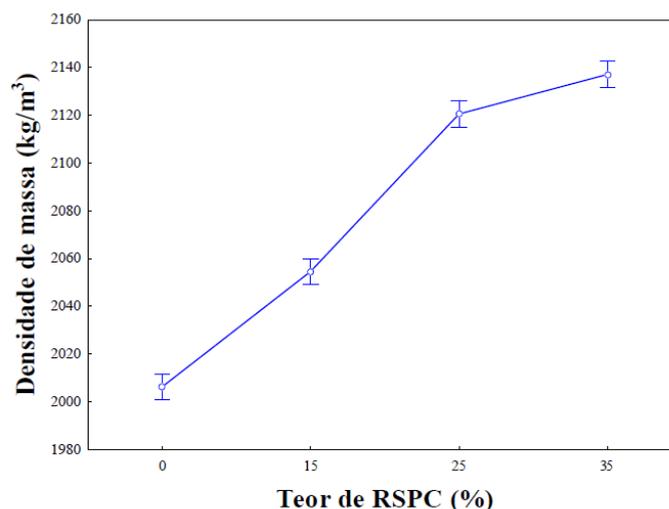
Argamassa	Densidade de massa (kg/m ³) ± Sd. (kg/m ³) (C.V. (%))
REF	2006±2,80 (0,1)
15%RSPC	2055±3,41(0,2)
25%RSPC	2121±3,03 (0,1)
35%RSPC	2137±1,42 (0,1)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar que as argamassas que sofreram substituição com RSPC indicaram maiores valores de densidade de massa.

Para verificar qual a influência da adição do RSPC nos resultados, empregou-se a comparação múltipla dos valores médios e constatou-se que existe uma considerável diferença nos resultados de densidade apresentados pelas argamassas produzidas. A figura a seguir apresenta a influência do teor de resíduo na densidade das misturas.

Figura 34 – Influência do teor de RSPC na densidade de massa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a densidade de massa das argamassas produzidas tende a aumentar quanto maior for o teor de RSPC substituído. Este aumento alcançou valores próximos a 7% para a mistura com 35% de RSPC. Este fenômeno é consequência da granulometria mais fina apresentada pelo RSPC, que por sua vez preenche de maneira mais efetiva os poros da mistura. Além disso, tem-se o fato de que o RSPC apresenta massa específica superior à do agregado natural, respectivamente $2,69 \text{ kg/dm}^3$ e $2,62 \text{ kg/dm}^3$.

Os resultados médios para os teores de ar incorporado podem ser visualizados na tabela a seguir.

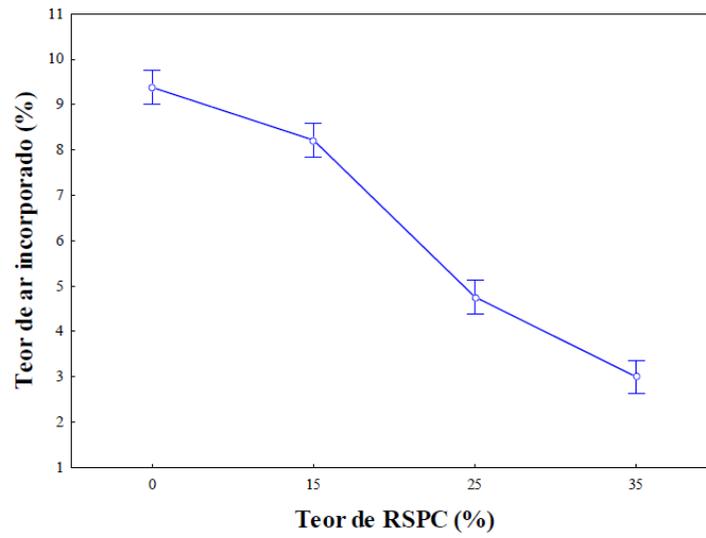
Tabela 15 – Teor de ar incorporado das argamassas

Argamassa	Teor de ar incorporado (%) \pm Sd. (%) (C.V. (%))
REF	9,3 \pm 0,1 (1,4)
15%RSPC	8,4 \pm 0,1 (1,8)
25%RSPC	4,9 \pm 0,1 (2,7)
35%RSPC	3,2 \pm 0,1 (2,0)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar que a substituição do agregado natural pelo RSPC gerou significativa influência sobre os resultados. Para verificar qual a influência da adição do RSPC nos resultados comparou-se os valores médios de ar incorporado em cada mistura. Os resultados podem ser visualizados no gráfico a seguir.

Figura 35 – Influência do teor de RSPC no teor de ar incorporado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que quanto maior é o teor de substituição menor foi o valor percentual de teor de ar incorporado. Os valores de diminuição chegaram a aproximadamente 66% para a mistura com 35% de RSPC.

Novamente, este fenômeno pode ser explicado a partir do melhor preenchimento exercido pelo resíduo de pedra ornamental quando comparado ao preenchimento da areia natural. Por possuir uma granulometria mais fina o RSPC preenche os vazios diminuindo o espaço a ser ocupado pelo ar.

Este mesmo fenômeno pôde ser visualizado por Tenório *et al.* (2005), que a partir da substituição do agregado natural por resíduo de granito em argamassas verificou uma diminuição do teor de ar incorporado para as argamassas com maiores teores de substituinte.

O resultado médio para a retenção de água das argamassas produzidas pode ser visualizado na tabela a seguir.

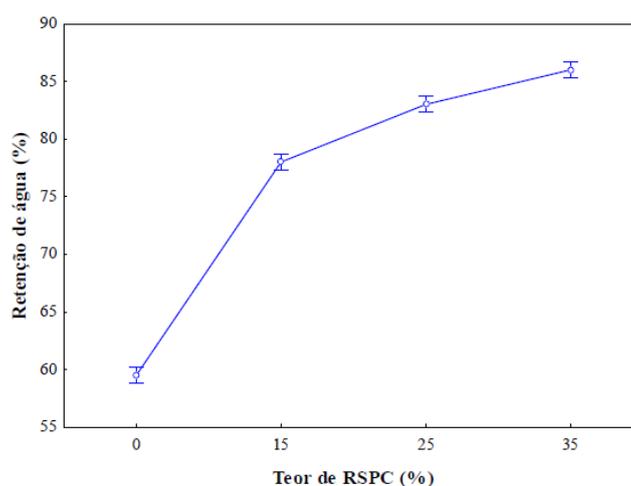
Tabela 16 – Retenção de água das argamassas

Argamassa	Retenção de água (%) ± Sd. (%) (C.V. (%))
REF	60±0,8 (1,4)
15%RSPC	78±0,1 (0,1)
25%RSPC	83±0,1 (0,1)
35%RSPC	86±0,1 (0,1)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados demonstrados na tabela, pode-se observar que a retenção de água pela mistura tende a aumentar a medida que os teores de substituição do RSPC aumentam.

Além disso, realizou-se também a comparação das médias e o resultado dessa análise pode ser visto no gráfico a seguir.

Figura 36 – Influência do teor de RSPC na retenção de água

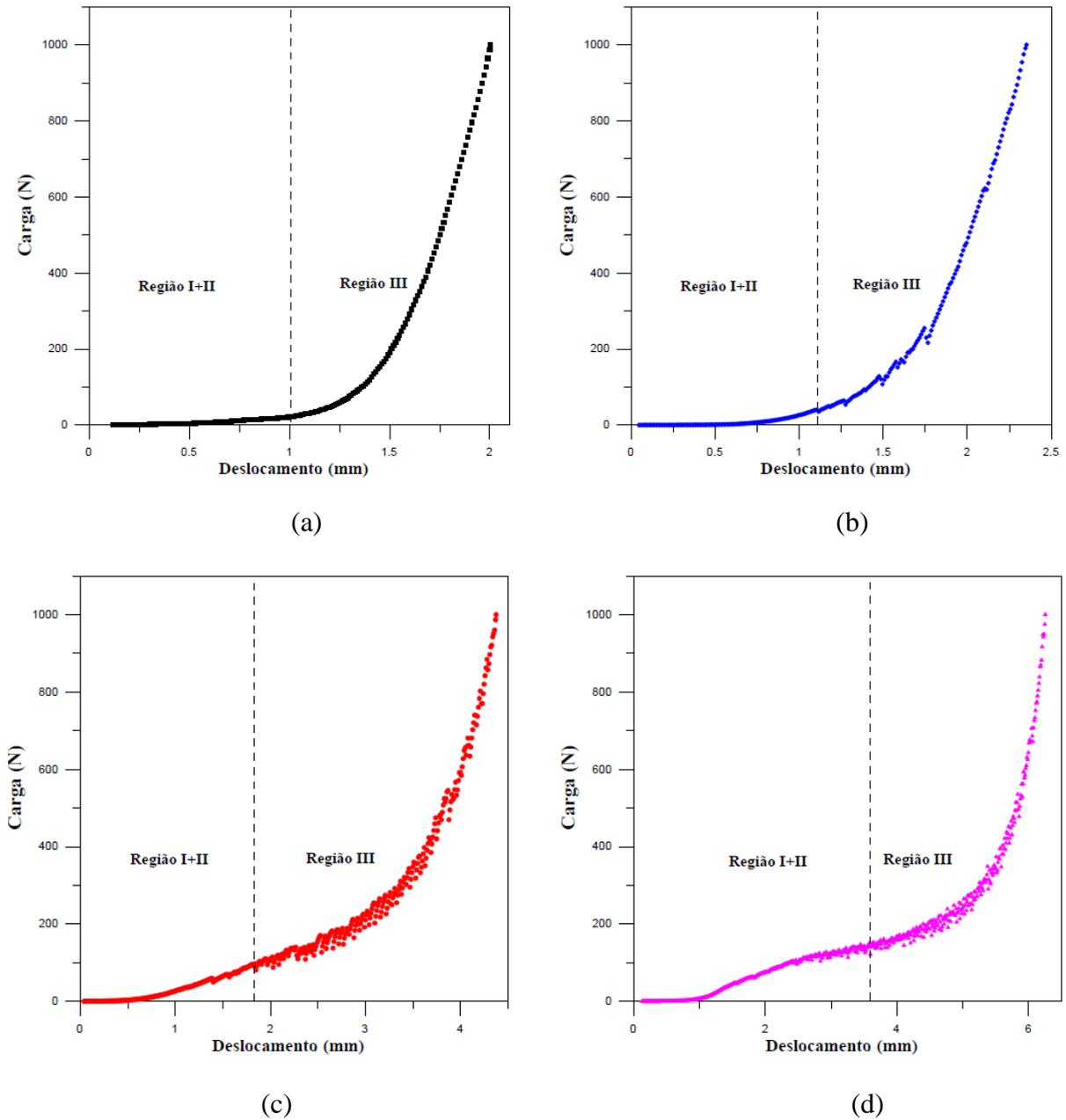
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados pode-se observar que a substituição do agregado natural pelo RSPC provocou aumentos de 30, 38 e 43% para os teores de 15, 25 e 35% de Resíduo de Serragem de Pedra Cariri, respectivamente.

Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que o RSPC apresenta maior área superficial e este tipo de material, em matrizes cimentícias, demanda a água disponível para a hidratação de suas superfícies. Além disso, o RSPC apresenta plasticidade que não pode ser visualizada no agregado natural.

O comportamento reológico das misturas pode ser visualizado nos gráficos a seguir.

Figura 37 – Carga por deslocamento – método de *squeeze-flow*



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as curvas dos gráficos da figura 36, percebe-se que o deslocamento máximo programado pelo ensaio de 9mm não foi atingido por nenhuma das misturas. Este fato é decorrência do limite máximo de célula de carga do equipamento (1000N) ter sido primeiramente atingido. Por conta disso, percebe-se que ocorreu imbricamento entre as partículas da argamassa.

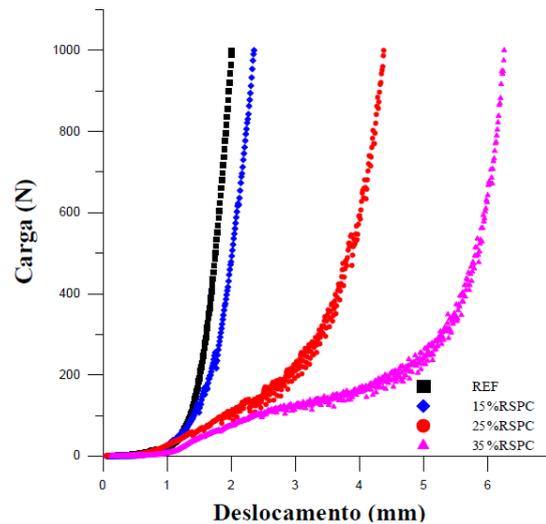
Além disso, verifica-se que para um igual deslocamento as argamassas apresentam valores de carga máximas suportadas diferentes.

A partir dessa análise, a argamassa referência (REF) foi a que demonstrou possuir uma maior carga por deslocamento dentre os teores analisados. No gráfico da figura 36, item a, pode-se verificar que inicialmente a argamassa REF apresentou grande deformação para diminutas cargas de aplicação. Entretanto, após um deslocamento de 1mm a carga necessária passou a ser elevada para posteriores pequenos deslocamentos. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que a argamassa REF manteve seu agregado natural em teor de 100% e como tal agregado não apresenta nenhuma plasticidade ao receber a carga suas partículas já iniciam uma rápida aproximação com posterior imbricamento. Ressalta-se, também, que a argamassa REF durante o ensaio de índice de consistência apresentou o processo de exsudação superior as demais.

Segundo Mattana Junior e Costa (2009), o resultado de *squeeze-flow* demonstrou que a granulometria dos componentes das misturas influenciava diretamente no comportamento reológico das mesmas. De acordo com os autores, as misturas cujos constituintes apresentassem maiores granulometrias atingiriam o imbricamento de maneira mais rápida. A partir disso, o fato da argamassa REF utilizada nessa pesquisa apresentar maior granulometria quando comparada com as demais ratifica a necessidade de uma maior carga durante o ensaio.

Em relação a substituição da areia pelo RSPC, verifica-se que para o teor de 15% ocorreu um aumento do deslocamento até a mistura atingir a carga de 1000N. Além disso, observou-se um abrandamento na transição entre as regiões elástica, plástica e de enrijecimento. Nas misturas com 25% e 35% observou-se que a distância entre as partículas era suficiente para a manutenção dos níveis de atrito relativamente baixos.

Por conta disso, conclui-se que o RSPC é um substituinte que apresenta alguma plasticidade e que possui grande quantidade de partículas finas responsáveis por adsorverem a água superficial favorecendo o deslizamento entre frações das argamassas produzidas. O incremento de plasticidade nas misturas produzidas, provocado pelo aumento das regiões I + II, pode ser melhor percebido na figura a seguir na qual as curvas de comportamento para cada mistura são demonstradas em um mesmo gráfico.

Figura 38 – Carga por deslocamento compilado

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Cardoso *et al.* (2005), o material tende a apresentar um comportamento favorável à sua trabalhabilidade (aplicação e espalhamento) a medida em que a região secundária, de deformação plástica e fluxo viscoso, aumenta. Entretanto se a terceira região tiver sua área aumentada as misturas terão suas trabalhabilidades dificultadas.

Por fim, conclui-se que a adição do RSPC em substituição ao agregado natural aumentou o estágio de deformação plástica e por conseguinte melhorou a trabalhabilidade das misturas produzidas nessa pesquisa.

4.2 Análise das Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

Os resultados dos ensaios de resistência foram levantados para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Entretanto a consolidação desses resultados será demonstrada apenas para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias que são os períodos de avaliação utilizados na indústria da construção civil.

Os resultados das médias das resistências à tração na flexão das argamassas produzidas nessa pesquisa encontram-se na tabela a seguir.

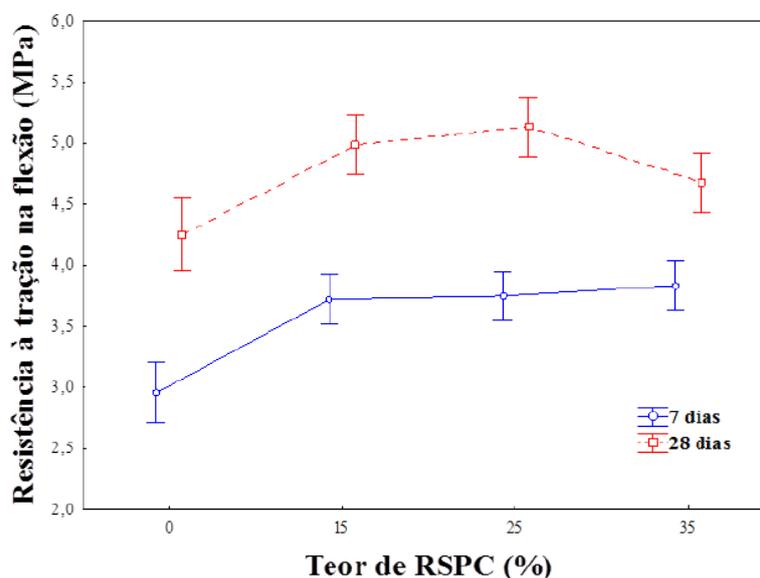
Tabela 17 – Resistências à tração na flexão

Argamassa	Resistência à tração na flexão média (MPa) \pm Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	2,94 \pm 0,08 (2,6)	4,26 \pm 0,09 (2,0)
15%RSPC	3,72 \pm 0,06 (1,5)	4,99 \pm 0,09 (1,8)
25%RSPC	3,75 \pm 0,06 (1,7)	5,14 \pm 0,17 (3,2)
35%RSPC	3,84 \pm 0,25 (6,6)	4,68 \pm 0,24 (5,1)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que as argamassas que sofreram substituição com o RSPC demonstraram maiores valores de resistência à tração na flexão quando comparadas à argamassa de referência. Além disso, observa-se que o tempo de cura influenciou diretamente os resultados de tração na flexão para as misturas produzidas.

Realizou-se uma comparação múltipla de médias a fim de que fosse possível determinar se houvessem significativas diferenças entre os resultados para todas as argamassas produzidas. O gráfico que contém este comportamento pode ser observado a seguir.

Figura 39 – Resistência à tração na flexão aos 7 dias e aos 28 dias de cura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se 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. Entretanto, aos vinte e oito dias, as argamassas com RSPC apresentaram significativa diferença entre seus resultados de resistência à tração na flexão.

Verifica-se que a substituição do agregado natural por RSPC levou a um aumento nas

resistências à tração na flexão destas argamassas quando comparadas com a argamassa referência. Esse fato tornou-se visível para todos os períodos de cura. Este melhor comportamento das argamassas substituídas é decorrente do menor tamanho de partícula que o RSPC apresenta quando comparado com o agregado natural. Por conta disso, os grãos de RSPC favorecem o preenchimento da mistura e tendem a torna-las mais densas.

Além disso, essa justificativa também pode ser embasada pelos resultados obtidos para absorção de água no item 4.1 deste trabalho, os quais revelam que além de ter atuação como material de preenchimento, o RSPC também atua na diminuição da relação a/c das argamassas melhorando a interface agregado/pasta de cimento.

De acordo com Kelestemur *et al.* (2014), a utilização de teores de 20, 40 e 60% de resíduo de serragem de mármore, em substituição à areia acarretou uma maior resistência à tração quando comparada a mistura de referência. Os autores atribuíram essa melhoria ao fato de que o resíduo de mármore apresentava granulometria muito menor que o agregado natural.

Por fim, verifica-se que a argamassa com 35% de RSPC como substituinte apresentou uma resistência à tração na flexão aproximadamente 10% superior a argamassa referência. Esta mistura também é a que apresenta menor relação a/c o que pode justificar este aumento de resistência.

Os resultados das médias das resistências à compressão das argamassas produzidas nessa pesquisa encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 18 – Resistências à compressão

Argamassa	Resistência à compressão (MPa) \pm Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	7,58 \pm 0,25 (3,3)	9,46 \pm 0,28 (2,9)
15%RSPC	11,80 \pm 0,24 (2,0)	15,66 \pm 0,24 (1,5)
25%RSPC	12,88 \pm 0,15 (1,1)	16,55 \pm 0,22 (1,4)
35%RSPC	10,26 \pm 0,38 (3,7)	15,36 \pm 0,18 (1,2)

Fonte: Elaborada pelo autor.

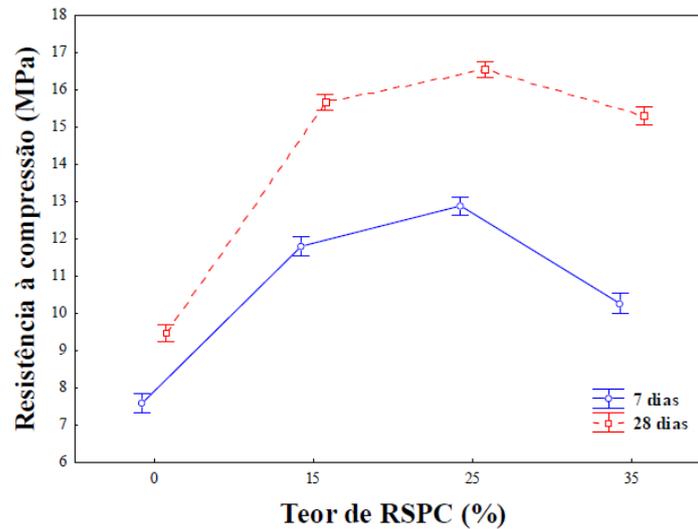
Observa-se que as misturas que sofreram substituição do agregado natural por RSPC apresentaram um aumento nos valores de suas resistências à compressão.

Além disso, verifica-se que a idade influenciou a resistência a compressão das misturas. Para uma idade de 7 dias observou-se que os resultados apresentaram significativa diferença para todos os teores apresentados. Entretanto, para a idade de 28 dias as argamassas substituídas com RSPC em 15% e 35% não apresentaram significativas diferenças.

Realizou-se, também, uma comparação múltipla de médias a fim de que fosse

possível determinar se houveram significativas diferenças entre os resultados para todas as argamassas produzidas. O gráfico que contém este comportamento pode ser observado a seguir.

Figura 40 – Resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

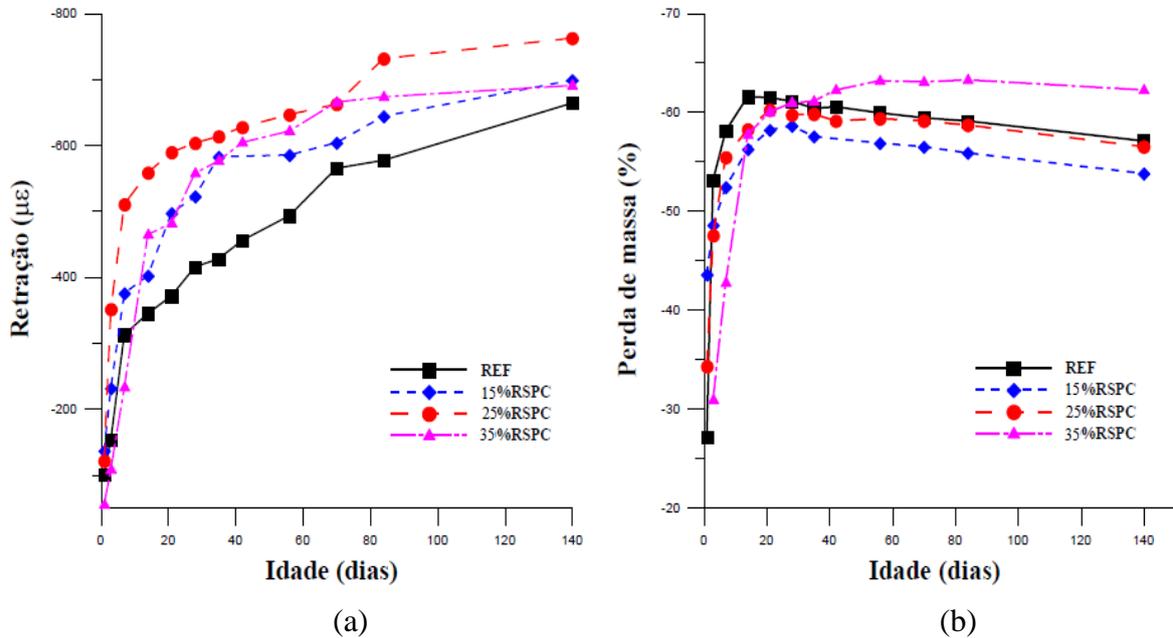
Analisando-se a idade o período de 7 dias de cura, percebe-se que a substituição de 15, 25 e 35% do agregado natural pelo RSPC proporcionou aumentos de 55, 69 e 35% na resistência a compressão respectivamente. Já para a idade de 28 dias, as misturas com 15, 25 e 35% do agregado natural substituído por RSPC apresentaram aumentos em suas resistências a compressão de respectivamente 65, 75 e 62%.

Da mesma forma que para a resistência à tração na flexão, a melhoria na resistência a 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 . Esta granulometria permite um melhor preenchimento e uma densificação das argamassas quando comparadas com a argamassa referência.

Segundo Balasubramanian *et al.* (2016), a substituição do agregado natural por resíduos de granito em argamassas tende a aumentar significativamente os resultados de resistência a compressão das argamassas substituídas. Os autores analisaram teores de 5, 10, 15, 20 e 25% de substituição relativos à massa de areia. Os resultados demonstraram que para um teor de 15% a resistência a compressão aos 28 dias foi 43% superior ao resultado da argamassa que não sofreu substituição com resíduo. Essa melhoria foi atribuída pelos autores ao efeito de preenchimento do resíduo de granito.

Os resultados das médias quanto à retração por secagem e perda de massa das argamassas produzidas nessa pesquisa encontram-se na figura a seguir.

Figura 41 – Retração por secagem (a) e Perda de massa (b)

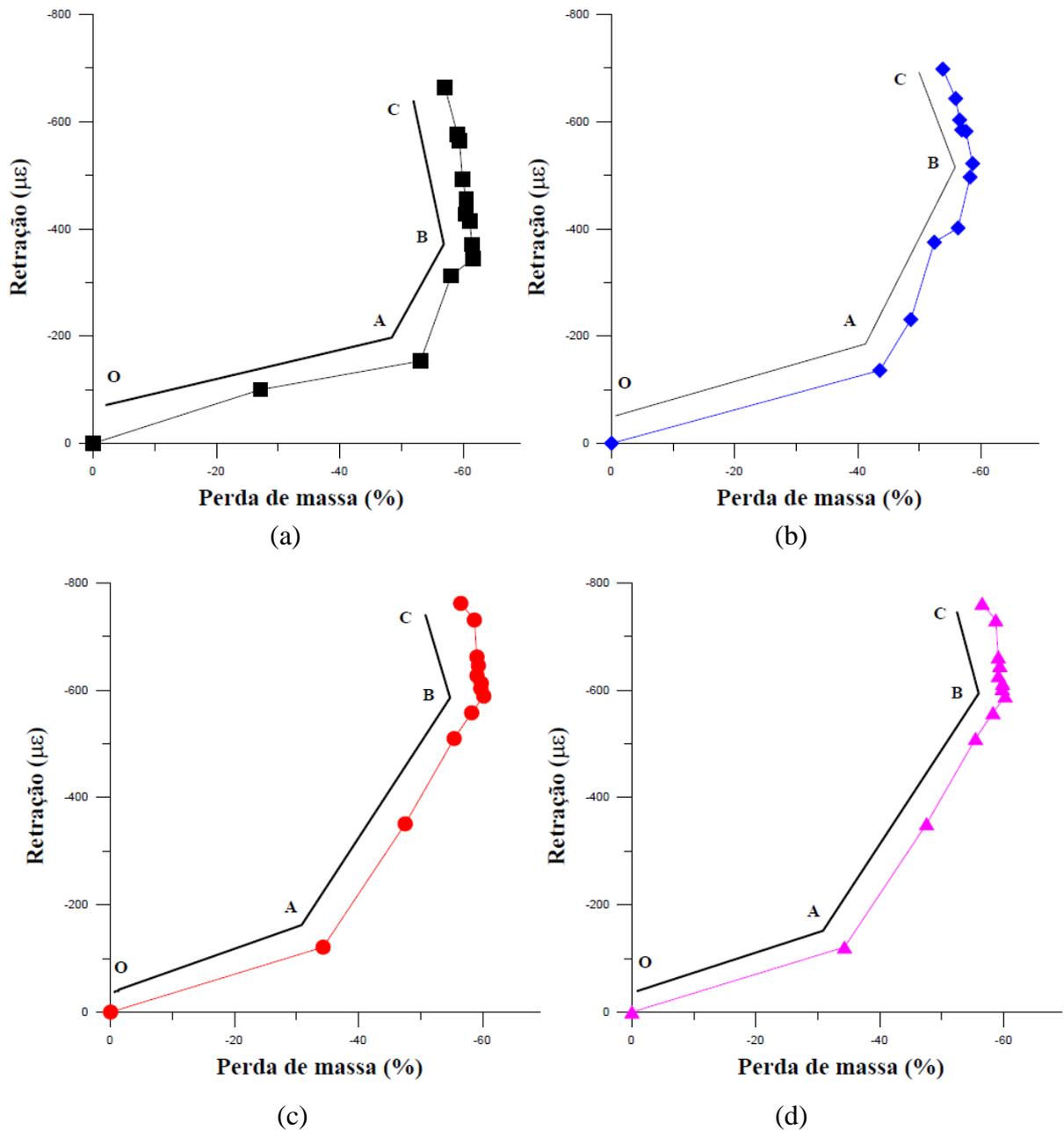


Fonte: Elaborado pelo autor.

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, maior plasticidade e maior relação a/c quando comparada com as demais.

Além disso, a análise do gráfico permite observar que a partir da idade de 35 dias de cura a perda de massa das misturas produzidas se tornou maior à medida que a relação a/c também se tornava maior. Por conta disso, infere-se que a perda de massa das misturas deve ter como fator principal de influência suas respectivas relações a/c. Para que fosse possível analisar a correlação entre a retração e a perda de massa foi criado o gráfico a seguir.

Figura 42 – Retração por secagem x Perda de massa. a) REF; b) 15%; c) 25%; d) 35%



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise dos gráficos pode-se verificar a ocorrência de três regiões distintas, a saber: OA, AB e BC. Na região OA tem-se a retração ocorrida devido à perda de água dos poros. Na região AB, tem-se a retração por desprendimento de água dos capilares e, por fim, na região BC tem-se a área relacionada à carbonatação do material (MESBAH; BUYLE-BODIN, 1999).

Para as argamassas produzidas nessa pesquisa as duas primeiras regiões (AO e AB) são bem concebidas.

Percebe-se que a medida que o teor de RSPC aumenta temos uma diminuição da região OA. Como temos nessa região a retração por perda de água dos poros, infere-se que a diminuição dessa região está significativamente vinculada com a relação a/c.

Além disso, verifica-se que o aumento nos teores de RSPC como substituinte gera um aumento da região relativa à retração por perda de água dos capilares (região AB). Este fenômeno explica-se pelo fato de que a tensão capilar decorrente da diminuição dos poros tende a aumentar, expulsando, por conseguinte a água desses capilares.

Por fim, a terceira região (BC) foi aumentada para todas as argamassas produzida, chegando a ganhos de massas da ordem de 2%. Este ganho é relacionado à carbonatação das misturas.

No presente trabalho, as misturas com substituição de RSPC apresentaram menores relações a/c que a mistura referência (sem substituição) e maiores valores de retração. Este comportamento é explicado pelo melhor preenchimento proporcionado pelo resíduo de rocha ornamental que por sua vez reduz capilares e aumenta a retração.

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

Tabela 19 – Absorção por imersão e Índice de vazios

Argamassa	A _{média} (%) ± Sd (%) (CV (%))	IV _{médio} (%) ± Sd (%) (CV (%))	ME _{médio} (%) ± Sd (%) (CV (%))
REF	14,77 ± 0,13 (0,8)	27,78 ± 0,13 (0,5)	2,60 ± 0,01 (0,1)
15%RSPC	13,42 ± 0,67 (5,0)	25,37 ± 1,02 (4,0)	2,53 ± 0,03 (1,3)
25%RSPC	11,00 ± 0,19 (1,7)	21,08 ± 0,41 (2,0)	2,43 ± 0,02 (0,8)
35%RSPC	11,74 ± 0,16 (1,4)	22,45 ± 0,36 (1,6)	2,47 ± 0,02 (0,7)

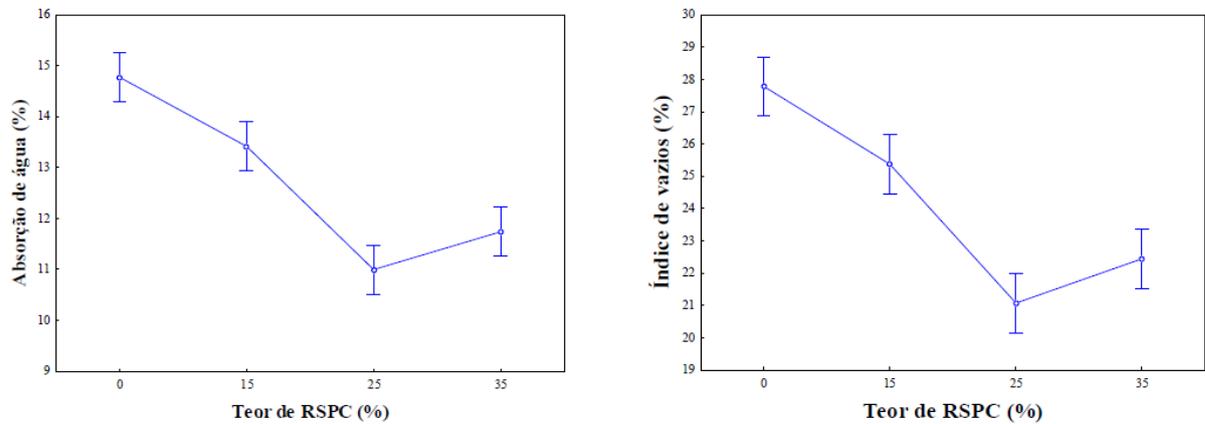
A – Absorção; IV – Índice de vazios; ME – Massa específica real.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se, a partir dos resultados da tabela, que a substituição do agregado natural pelo RSPC ocasionou redução nos valores de absorção de água por imersão e no índice de vazios.

Realizou-se, também, uma comparação múltipla de médias a fim de que fosse possível determinar se houberam significativas diferenças entre os resultados para todas as argamassas produzidas. O gráfico que contém este comportamento pode ser observado a seguir.

Figura 43 – Comportamento quanto: a) absorção de água; b) índice de vazios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que uma diminuição no índice de vazios e na absorção de água com o consequente aumento de teores de substituintes. O comportamento tecnológico mais acentuado para estes parâmetros foi o da mistura com 25% de substituinte.

Esta melhoria é atribuída ao melhor empacotamento das partículas da mistura devido à finura do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri. Além dessa justificativa, percebe-se que os resultados de absorção de água e índice de vazios estão de comum acordo com os resultados obtidos para a resistência a compressão no qual tínhamos: à medida que se aumentou o teor de RSPC substituinte a resistência a compressão teve incrementos.

De acordo com Silva (2011), a substituição do agregado natural por areia de rocha calcária calcítica britada gera uma diminuição da absorção de água por imersão e o índice de vazios. O substituinte estudado pelo autor apresentava um teor de finos de duas vezes maior que a da areia natural. Por conta disso, o resultado de absorção de água das misturas com substituição foi 20% inferior em relação à absorção da argamassa de referência e o índice de 11% menor.

5 CONCLUSÃO

A partir da análise desta pesquisa, acredita-se que o reaproveitamento do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri como material de enchimento para matrizes cimentícias torna-se uma alternativa para a diminuição dos impactos sócio ambientais causados pela disposição inadequada de tal rejeito.

Com o principal objetivo de possibilitar a inserção do RSPC na indústria da construção civil, este trabalho terá suas conclusões apresentadas a seguir. É válido ressaltar que estas conclusões se referem única e exclusivamente as argamassas produzidas de acordo com os métodos, materiais e máquinas descritas no programa experimental.

Com relação às características do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri, pode-se afirmar que o mesmo é composto por 95% de Óxido de Cálcio e que este apresenta-se na forma de calcita. Além disso, o resíduo apresenta dimensão média de 4,5 μm , fato este que o caracteriza como fíller e que por mais que o RSPC não atenda aos limites de plasticidade estabelecidos pela NBR 7180, (ABNT, 1984), o mesmo apresentou relativa plasticidade verificada no ensaio de reologia pelo método *squeeze-flow*.

Com relação às propriedades das argamassas em seu estado fresco, pode-se afirmar que a substituição do agregado natural por RSPC acarretou em uma redução na relação a/c tendo a argamassa com 25% de RSPC, em massa, uma redução da ordem de 3,5% quando comparada a argamassa referência. Além disso, verificou-se que a substituição de areia natural pelo RSPC ocasionou um aumento de densidade das argamassas substituídas, um aumento na retenção de água chegando a valores de 43% para a argamassa com 35% de RSPC em massa. Por fim, visualizou-se que o incremento de RSPC gerou uma redução no teor de ar incorporado da ordem de 65% para a argamassa com 35% de RSPC em massa. Além disso, a partir do ensaio de *squeeze-flow* verificou-se que as argamassas que sofreram substituição tinham um aumento de plasticidade que, por conseguinte, gerava uma melhora na trabalhabilidade das misturas (aplicação e espalhamento).

Com relação às propriedades das argamassas em seu estado endurecido, as argamassas que sofreram substituição com RSPC apresentaram, tanto para 7 dias como para 28 dias, um aumento para a resistência à tração na flexão bem como para resistência a compressão. No primeiro caso a resistência a tração na flexão o aumento chegou a 20% para a argamassa com 25% de RSPC em massa. Já para a resistência a compressão o aumento foi de 75% para a argamassa com 25% de RSPC em massa. Ambos resultados anteriores para o período de cura máximo de 28 dias. Por fim a substituição de areia natural pelo Resíduo de

Serragem de Pedra Cariri ocasionou uma redução na absorção de água por capilaridade bem como no índice de vazios. O melhor comportamento foi para a mistura com 25% de RSPC que apresentou para ambos parâmetros valores próximos a 20% de redução.

Verifica-se, portanto, que a substituição do agregado natural pelo Resíduo de Serragem de Pedra Cariri ocasionou melhorias significativas tanto para as propriedades das argamassas no estado fresco como 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 e que o teor de substituição que apresentou melhores qualidade tecnológicas foi o de 25%.

Por fim, sugere-se que em trabalhos futuros sejam feitos: verificação da influência do RSPC no módulo de elasticidade das misturas; verificação do nível de carbonatação e ataque de sulfatos; avaliação da influência do RSPC em argamassas projetáveis.

REFERÊNCIAS

- ABIRROCHAS- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **ABIROCHAS em Notícia – ABINEWS outubro a dezembro de 2015**. Disponível em: <https://issuu.com/abirochas/docs/abirochas_noticia_4>. Acessado em: 19 de dezembro de 2018.
- ABIRROCHAS- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Setembro de 2016**. Disponível em: http://www.abirochas.com.br/noticia.php?eve_id=4012. Acessado em: 19 de dezembro de 2018.
- ADECE – AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ S. A. **Atlas da mineração 2013**. Disponível em: <http://www.adece.ce.gov.br/index.php/mineracao>. Acesso em 12 de janeiro de 2016.
- ADEODATO, F. J. F.; VIDAL, F. W. H. Desenvolvimento de máquinas e equipamentos para a produção da pedra Cariri. IN: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS**, 1. Espírito Santo. 2005.
- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and building materials**, v. 50, p. 28-41, 2014.
- ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. 2008, 133f. Dissertação (Mestrado em Construção civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.
- AREL, Hasan Şahan. Recyclability of waste marble in concrete production. **Journal of Cleaner Production**, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6467**. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. ABNT 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**. Agregados para concreto-especificação. Rio de Janeiro. ABNT 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro. ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8490**. Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão. Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11758**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro. ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassas -Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278**: Argamassas -Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassas -Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 49**. Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. ABNT 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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, 89f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.
- BENACHOUR, Y; DAVY, C. A.; HOUARI, H.; SKOCZYLAS, F. Effect of a high calcite filler addition upon microstructure and freeze/thawing resistance of a mortar. **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, v. 2, p.993 - 998, 2008.
- BEZERRA, L. M. A. Análise dos impactos socioambientais decorrentes da mineração na Chapada do Araripe - Nova Olinda/Ceará. **GEOSABERES-Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 6, n. 2, p. 79-89, 2015.
- BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. **Sci Res Essay**, v. 2, n. 9, p. 372-379, 2007.
- BRAGA, F. S.; BUZZI, D. C.; COUTO, M. C. L.; LANGE, L. C. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista Eng Sanit Ambiental**. v.15, n.3, p - 237-244. 2010.
- BETIOLI, A. M., JOHN, V. M., GLEIZE, P. J. P., PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícias: Associação de técnicas complementares. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 37-48, 2009.

- CAMPOS, A. R.; CASTRO, N. F.; VIDAL, F. W. H.; BORLINI, M. C. Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. IN: Simpósio de Geologia do Nordeste, 23, 2009, Fortaleza, CE. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2009. p.16-25.
- CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze-flow*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, **Anais...**, Florianópolis, , p. 121-143, 2005.
- CARDOSO, F. A.. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009, 158f.. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CASTRO, N. F.; CAMPOS, A. R.; VIDAL, F. W. H.. Melhoras técnicas na lavra e na proteção do patrimônio e meio ambiente do Arranjo Produtivo Local de Calcários do Cariri-CE. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA – CETEM, 1. **Anais...**2007.
- CASTRO, N. F.; MELLO, E. F.; VIDAL, F. W. H.. O APL do Cariri no contexto do ordenamento do território. In: Simpósio de rochas ornamentais do Nordeste, 7, 2009, Fortaleza. **Anais...**2009.
- CORDEIRO, M. N.; MACEDO, F. E.; BASTOS, F. H.. Potencial Geoturístico do Cariri Cearense: O Caso do Geopark Araripe. **Acta geográfica**, v. 9, n. 19, p. 146-163, 2015.
- CRUZ, D. F. M.; LAMEIRAS, R.; BARBOZA, A.; LIMA, L. Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito. IN: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 6. **Anais...** São Paulo, 2003.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Organizador/Editor). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v.1, p. 261-310.
- DEMIREL, B. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. **International Journal of Physical Sciences**, v. 5, n. 9, p. 1372-1380, 2010.
- ERGÜN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 806-812, 2011.
- FERNANDES, J. V. G; GONÇALVES, E.; ANDRADE, J. C. S; KIPERSTOK, A.Introduzindo práticas de produção mais limpa em sistemas de gestão ambiental certificáveis: uma proposta prática. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 06, n. 03, jul/dez. Rio de Janeiro, 2001. p. 157-164.
- FERNANDES, T. W. G. **Diagnóstico da cadeia produtiva de rochas ornamentais e de revestimento do Estado do Ceará: mineração, serrarias, marmorarias e desafios do setor**. 2004, 121f.Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

GALVÃO, J. S. S.; PITA, A. C. B. O.; MERCÊS, U. M. S.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo do uso de resíduo de serragem de pedra cariri na produção de misturas autoadensáveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16, 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000, 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GUIMARÃES, C. C. **Avaliação do desempenho de blocos produzidos com resíduo de serragem de pedra Cariri.** 2013, 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2013..

GUIMARÃES, C. C.; MOURA, W. A. Avaliação da alcalinidade em pastas de cimento Portland onde o aglomerante é substituído por sílica ativa e Resíduo de Serragem de Pedra Cariri. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3, **Anais...** São Leopoldo, 2013.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil.** São Paulo. Beca. 2012. 900p.

JEYAPRABHA, B.; ELANGO VAN, G.; PRAKASH, P. Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 688-698, 2016.

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.

MANSO, C. L. C.; HESSEL, M. H. Novos equinoides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 187-197, 2012.

MATTANA, A. J., COSTA, M. R. M. M.. Estudo da influência do tipo de cimento no comportamento reológico de argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSAS, v. 8, 2009. **Anais...** Curitiba, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2014. 826p.

MELLO, I. S. de C.; CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **Atlas de rochas ornamentais da Amazônia brasileira.** CPRM, 2011, 292P.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**, v. 55, p. 263-270, 2009.

MENEZES, R. R.; MELO, L. R. L.; FONSÊCA, F. A. S.; SOUTO, P. M.; NEVES, G. D. A.; SANTANA, L. N. Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 4, 2010.

MENDES FILHO, E. **Uma Avaliação do Programa de Apoio ao Arranjo Produtivo Local da Pedra Cariri–Ceará**. 2009, 103f. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia do Setor Público) – Programa de Pós-graduação em Economia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MERCÊS, U. M. S.; MOURA, W. A.. Comportamento mecânico de argamassas produzidas com resíduo de serragem de pedra Cariri. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16, 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016

MESBAH, H. A.; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. **Construction and building materials**, v. 13, n. 8, p. 439-447, 1999.

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.

NEVILLE, ADAM M., BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

SHIRAZI, E. K. Reusing of stone waste in various industrial activities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND DEVELOPMENT IPCBEE, 2. **Anais...** Singapura, 2011.

SHIRULE, P. A.; RAHMAN, A.; GUPTA, R. D. Partial replacement of cement with marble dust powder. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, IJAERS**, v. 1, n. 3, p. 175-177, 2012.

SOROKA, I.; SETTER, N. The Effect of Fillers on Strength of Cement Mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 7 Issue4 pg. 449–456, 1977.

SILVA, A.A. D. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa**. 2008. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVA, N. G. D. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. 180f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, N. G. D. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. 322f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SILVA, A. D. A.; FILHO, J. L. R.; SOUZA, J. C.; BARROS, M. L. D. S. C.; LIRA, B. B.. Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri cearense na formulação de argamassa. **Estudos Geológicos**, v. 18, n. 1, p. 89, 2008.

SILVA, N.G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V.C. Argamassas com areia britada: influencia dos finos e da forma das partículas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, **Anais...** Florianópolis: 2005.

SILVA, N. G.; SILVA, G. G.; GLEIZE, P. J. P. Fissuração em revestimento de argamassa com areia britada de rocha calcária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53. **Anais...** Florianópolis, 2011.

SILVA, F. G. S. **Estudo do uso de resíduo catalítico do refino de petróleo na construção civil.** 2016. 215f. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente) – Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. Sustainable Utilization of Granite Cutting Waste in High Strength Concrete. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

SUASSUNA, P. M.; BRASILEIRO, M. I.; PRADO, A. C. de A. Reaproveitamento do rejeito da extração e beneficiamento da pedra cariri em massas cerâmicas. In: ENCONTRO UNIVERSITÁRIO DA UFC NO CARIRI, 4. **Anais...** Juazeiro do Norte, 2012.

TENÓRIO, Jonathas JL; LAMEIRAS, Rodrigo de M. LIMA, Luciana A. de. Desempenho de argamassas produzidas com resíduo do beneficiamento de chapas de granito (RBCG). In: SBTA–SEMINÁRIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSA, 6 e INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, 1. **Anais...** Florianópolis. 2005.

VIANA, M. S. S.; NEUMANN, V. H. L.. Membro Crato da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE. Riquíssimo registro de fauna e flora do Cretáceo. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, 2002.

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, 2007. p. 29

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M. A indústria extrativa da Pedra Cariri no estado do Ceará: problemas x soluções. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 4, Fortaleza, 2003, **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM/SBG, 2003.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, W. M.; OLIVEIRA, R. R. Aspectos geológicos da bacia do Araripe e do aproveitamento dos rejeitos da Pedra Cariri–Ceará. IN: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5. **Anais...**, p. 31-36, 2005.

VIDAL, F.W,H; ROBERTO, F.A. C. **Avanços e transferência tecnológica em rocha ornamental:** Rochas Ornamentais do Estado do Ceará. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. p.93-106. (Série Rochas e Minerais Industriais, n° 4).

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 1-7, 2013.

APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS INDIVIDUAIS

Tabela 20 – Resultados individuais de resistência à tração na flexão

Argamassa	Resistência à tração na flexão	
	7 dias	28 dias
	ft (MPa)	ft (MPa)
REF	2,89	4,98*
	3,03	4,17
	2,90	4,34
15%RSPC	3,77	4,99
	3,66	5,13
	3,74	4,86
25%RSPC	3,82	4,97
	3,70	5,30
	3,74	5,14
35%RSPC	3,56	4,77
	4,06	4,41
	3,89	4,86

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: * Valor discrepante desconsiderado pela NBR 13279 (ABNT, 2005)

Tabela 21 – Resultados individuais de resistência à compressão

Argamassa	Resistência à compressão	
	7 dias	28 dias
	fc (MPa)	fc (MPa)
REF	7,70	9,46
	7,71	9,76
	7,92	9,05
	7,61	9,14
	7,15	9,72
	7,40	9,64
15%RSPC	11,83	15,66
	11,41	15,37
	12,01	15,43
	11,56	16,09
	12,07	15,64
25%RSPC	11,89	15,77
	12,84	16,80
	13,04	16,80
	12,94	16,68
	12,58	16,32
	12,96	16,49
35%RSPC	12,94	16,23
	9,87	15,20
	9,76	15,12
	10,61	15,48
	10,35	15,28
	9,39*	15,67
	10,71	15,40

Fonte: Elaborada pelo autor.