

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**SAFIRA FERREIRA DE MELO RIOS**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA  
DE CARIRI (RSPC) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

**Feira de Santana  
2017**

SAFIRA FERREIRA DE MELO RIOS

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA  
DE CARIRI (RSPC) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. Washington Almeida Moura

**Feira de Santana - BA**

**2017**

### Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

R453a Rios, Safira Ferreira de Melo  
Avaliação da utilização de resíduo de serragem de Pedra de Cariri (RSPC) na produção de argamassa./ Safira Ferreira de Melo Rios. Feira de Santana, 2017.  
138f.: il.

Orientador: Washington Almeida Moura.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

1.Argamassa. 2.Resíduo de serragem de pedra Cariri. 3.Agregado.  
I.Moura, Washington Almeida, orient. II.Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 691.53

Safira Ferreira de Melo Rios

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA  
DE CARIRI (RSPC) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Feira de Santana, 21 de agosto de 2017,

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Washington Almeida Moura  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica Batista Leite  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

---

Prof. Dr. Francisco Gabriel Santos Silva  
(Universidade Federal da Bahia)

## AGRADECIMENTOS

“(..) Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu  
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu(...)”

*Ana Vilela*

E assim, fortalecida, venho agradecer a todos que tornaram possível a realização deste projeto.

Primeiramente agradeço à Deus pela vida e por sempre estar ao meu lado, dando força e determinação para superar as dificuldades que surgem no caminho.

Aos meus pais que, dentro dos seus limites, me educaram, me apoiaram nas minhas escolhas e foram sempre grandes incentivadores da minha felicidade.

Ao meu marido que me apoiou e me apoia em meus projetos. Por seu carinho, amor, compreensão e conselhos. Te amo!

Aos meus filhos, Gabriel e Davi, pelas vezes que tinham que entender que eu precisava me ausentar para estudar para uma “prova” e fazer um “trabalho”. Amo vocês!

Às minhas irmãs, Angélica, Ana Cláudia e Hortênsia, por todo apoio, escuta e carinho dispensados. Deus não poderia ter me dado presentes melhores.

Ao professor Washington Almeida Moura pelo acolhimento quanto à orientação acadêmica e principalmente pela generosidade e compreensão que teve nos meus momentos de conflitos e fraquezas. Obrigada!

Às professoras Mônica Batista Leite e Cintia Maria Ariani Fontes por todo o conhecimento compartilhado e apoio dispensado.

À Mariana e à Cátia por todo auxílio e cordialidade para a resolução das questões burocráticas do programa de pós-graduação.

Aos colegas de mestrado Ana Amélia, Ana Paula, Durval, Mailson, Mercurie, Pedro, Rita, Uiliana e Valquíria. Pelos momentos de descontração, companheirismo e apoio. Valeu!!!

À Carla, Myrella, Geise, Juci, Sr. Nilson, Rosana, Nice e Suane pelo suporte durante a fase de pesquisa no LABOTEC.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGCEA/UEFS como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc)

## **AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA DE CARIRI (RSPC) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Safira Ferreira de Melo Rios

Agosto (2017)

Orientador: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

O processo de extração e de beneficiamento da rocha calcária da região do Cariri cearense (Pedra Cariri), gera uma perda estimada em 70% do total extraído. Acarretando um significativo volume de resíduos gerados. Com o intuito de mitigar os impactos ambientais gerados pela disposição inadequada do resíduo de serragem da pedra Cariri (RSPC), este trabalho tem como objetivo verificar a influência da utilização do referido resíduo, como substituto parcial do agregado na produção de argamassas. Para tanto, foi realizada a substituição, em massa, do agregado natural pelo RSPC nos teores de 10, 20 e 30%. O traço utilizado foi 1:5, em massa, e o índice de consistência foi fixado em  $260 \pm 5$  mm. Foram determinadas as propriedades das argamassas no estado fresco (retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa e reologia por meio do *squeeze-flow*) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração, retração por secagem, absorção por imersão e índice de vazios e absorção por capilaridade). A substituição da areia natural pelo RSPC proporcionou melhoria tanto nas propriedades da argamassa no estado fresco, quanto no estado endurecido. Com exceção da retração, que foi maior para as argamassas com RSPC, e da resistência de aderência à tração, que foi equivalente à argamassa de referência. Desta forma, conclui-se que é possível utilizar até 30% de RSPC em substituição ao agregado natural .

Palavras chave: Argamassa, Resíduo de Serragem de Pedra Cariri, Agregado

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## EVALUATION OF THE USE OF CARIRI STONE WASTE IN THE PRODUCTION OF MORTAR

Safira Ferreira de Melo Rios

August, 2017

Advisor: Washington Almeida Moura

Department: Civil and Environment Engineering

The process of extraction and processing of limestone rocks from the Cariri region of Ceará generates an estimated loss of 70% of the total extracted. The volume of waste generated is significant. To mitigate the environmental impacts generated by the inadequate disposition of the sawdust waste from the Cariri stone (RSPC), the aim of this current study is verify the influence of the use of this waste as a partial replacement of the aggregate in the production of mortars. For this, the natural aggregate was replaced by the RSPC at a rate of 10, 20 and 30%. The cement/sand ratio used was 1: 5 by mass, and the consistency index was fixed in  $260 \pm 5$  mm. Were evaluated the properties of the mortars in the fresh state (water retention, incorporated air content, mass density and rheology through squeeze-flow) and in the hardened state (flexural tensile strength, compressive strength, adhesive strength ,drying shrinkage, absorption byimmersion and void index, and absorption by capillary). The replacement of the natural sand by the RSPC provided an improvement both in the properties of the mortar in the fresh state and in the hardened state. With the exception of the shrinkage, which was higher for the mortars with RSPC, and the adhesive strength, which was equivalent to the reference mortar. In this way, it concludes is possible use of the RSPC as a partial replacement of the natural aggregate.

Key words: Mortar, Cariri stone waste, aggregate

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2. ROCHAS ORNAMENTAIS E A PEDRA CARIRI.....</b>	<b>20</b>
2.1 PANORAMA NACIONAL DO MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	20
2.2. PEDRA CARIRI .....	22
2.2.1. Lavra da Pedra Cariri.....	24
2.2.2. Beneficiamento.....	26
2.2.3. Geração de Resíduos de Pedra Cariri .....	28
<b>3. RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E SUA UTILIZAÇÃO EM</b>	
<b>Matrizes cimentícias .....</b>	<b>31</b>
3.1 ADIÇÃO MINERAL - FÍLERES .....	32
3.2 APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATRIZES	
CIMENTÍCIAS .....	34
3.2.1 Substituição do agregado natural por resíduo de rochas ornamentais em	
argamassas .....	38
<b>4. APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI</b>	
<b>(RSPC).....</b>	<b>52</b>
4.1 APLICAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	52
4.2 APLICAÇÕES DIVERSAS .....	62
<b>5. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>68</b>
5.1 MATERIAIS .....	70
5.1.1 Cimento .....	70
5.1.2 Agregado Natural .....	71
5.1.3 Resíduo de Serragem de Pedra Cariri - RSPC .....	72



5.1.3.1 Beneficiamento do RSPC .....	72
5.1.3.2 Caracterização mineralógica do RSPC.....	75
5.1.3.3 Caracterização física do RSPC .....	76
5.1.3.3.1 Granulometria do RSPC .....	76
5.1.3.3.2 Massa unitária, massa específica .....	77
5.1.3.3.3 Plasticidade.....	77
5.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	78
5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....	80
<b>5.3.1 Retenção de água .....</b>	<b>81</b>
<b>5.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado .....</b>	<b>81</b>
<b>5.3.3 Comportamento reológico .....</b>	<b>81</b>
5.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	83
<b>5.4.1 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão .....</b>	<b>83</b>
<b>5.4.2 Resistência de aderência à tração .....</b>	<b>84</b>
<b>5.4.3 Retração por secagem .....</b>	<b>86</b>
<b>5.4.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios.....</b>	<b>87</b>
<b>5.4.5 Absorção de água por capilaridade .....</b>	<b>87</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>89</b>
6.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	89
<b>6.1.1 Retenção de água .....</b>	<b>89</b>
<b>6.1.2 Densidade de massa .....</b>	<b>91</b>
<b>6.1.3 Teor de ar incorporado .....</b>	<b>93</b>
<b>6.1.4 Comportamento reológico das argamassas medido pelo <i>squeeze-flow</i> ...</b>	<b>95</b>
6.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	100
<b>6.2.1 Resistência à tração na flexão.....</b>	<b>100</b>
<b>6.2.2 Resistência à compressão .....</b>	<b>103</b>
<b>6.2.3 Resistência de aderência à tração .....</b>	<b>106</b>
<b>6.2.4 Retração por secagem .....</b>	<b>109</b>
<b>6.2.5 Absorção por imersão e índice de vazios .....</b>	<b>112</b>
<b>6.2.6 Absorção por capilaridade.....</b>	<b>115</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
<b>8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>121</b>

<b>9. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE 1 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE 2 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA DENSIDADE DE MASSA DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE 3 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE 4 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE 5 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS .....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE 6 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE 7 - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA E RETRAÇÃO POR SECAGEM.....</b>	<b>136</b>
<b>APÊNDICE 8 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE 9 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....</b>	<b>137</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Bacia Sedimentar do Araripe (Fonte: MANSO; HESSEL, 2012, modificado de ASSINE, 2007).....	22
Figura 2 - Material fossilífero proveniente da Formação Santana – CE: a) planta; b) invertebrado (Fonte: CORDEIRO <i>et al.</i> , 2015).....	23
Figura 3- Calcários laminados da Formação Santana(Fonte: HASUI <i>et al.</i> , 2012). ....	24
Figura 4–Lavra rudimentar: a) processo de extração (Fonte: BASTOS, 2014); b) aspecto das placas extraídas (Fonte: ADEODATO; VIDAL, 2005).....	25
Figura 5 - Processo de lavra semimecanizado (Fonte: MENDES FILHO, 2009).....	26
Figura 6 - Aspecto do deslocamento manual das lajotas (Fonte: BASTOS, 2014).....	27
Figura 7 - Processo de serragem da pedra Cariri (Fonte: ADEODATO; VIDAL, 2005). .....	28
Figura 8 - Rejeito proveniente da lavra, deslocamento e calibração da pedra Cariri (Fonte: BASTOS, 2014). ....	29
Figura 9- Rejeitos de serragem: a) na forma de lascas e aparas; b) na forma fluida (Fonte: SUASSUNA <i>et al.</i> , 2012). ....	29
Figura 10 - Esquema dos resíduos gerados em cada etapa do processo produtivo de rochas ornamentais (Fonte: Adaptado de GONÇALVES, 2000).....	31
Figura 11 -Resistência à compressão das argamassas produzidas (Fonte: MOURA <i>et al.</i> , 2002).....	39
Figura 12 - Micrografias das argamassas: a) com 15% de fíler calcário e b) com 45% de fíler calcário (Fonte: BENACHOUR <i>et al.</i> , 2008) .....	43
Figura 13– Resistência à compressão das argmassas: (a) sem aditivo e (b) com aditivo superplastificante (Fonte: CORINALDESI <i>et al.</i> , 2010) .....	44
Figura 14 - Tempo médio de ocorrência da primeira fissura, comprimento e área total das mesmas nos revestimentos de argamassa produzidos com areia natural e areia britada (Fonte: SILVA <i>et al.</i> , 2011) .....	47
Figura 15 - Aspecto da argamassa com traço 1:1:6: (a) sem resíduo (b) com 40% de resíduo (Fonte: SALES <i>et al.</i> , 2014). ....	48
Figura 16 - Resistência à compressão de argmassas (Fonte: JEYAPRABHA <i>et al.</i> , 2016).....	51
Figura 17 - Difratoograma de raio-X obtido do RSPC (Fonte: MOURA <i>et al.</i> , 2013)....	54

Figura 18–Curva de comportamento dos blocos: (a) resistência à compressão;(b) absorção de água (Fonte: GUIMARÃES, 2013).	56
Figura 19 - Resultados obtidos para a resistência à compressão axial: a) aos 7 dias; b) aos 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014).	57
Figura 20 - Absorção por sucção capilar (Fonte: BASTOS, 2014)	58
Figura 21– Absorção de água e índice de vazios das argamassas produzidas (Fonte: GALVÃO <i>et al.</i> , 2016)	60
Figura 22 - – Resistência à compressão (Fonte: MERCÊS; MOURA, 2016)	61
Figura 23 – Micrografia do resíduo de pedra cariri: a) amarelo; b) cinza (Fonte: MENEZES <i>et al.</i> , 2010)	63
Figura 24 - Difratoograma dos resíduos de pedra cariri amarelo e cinza (Fonte: MENEZES <i>et al.</i> , 2010)	64
Figura 25 – Organograma referente aos ensaios de caracterização dos materiais secos	68
Figura 26 – Organograma referente às propriedades avaliadas das argamassas produzidas	69
Figura 27– Curva granulométrica da areia natural (Fonte: Labotec, 2015)	72
Figura 28 - – Etapa de secagem do RSPC ao ar livre	73
Figura 29 – (a) Britador de mandíbulas; (b) aspecto do RSPC, após processo de destorroamento e peneiramento malha 4,8 mm	74
Figura 30– Aspecto do resíduo passante na peneira 2,4 mm	74
Figura 31 -Difratoograma do RSPC	75
Figura 32 – Curva granulométrica do RSPC	76
Figura 33- Aspecto do RSPC: (a) no início do ensaio e (b) na conclusão do ensaio	78
Figura 34- Aspectos das argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC e d) 30%RSPC	80
Figura 35– Perfil característico de uma curva carga versus deformação, obtido para o ensaio de <i>squeeze-flow</i> (Fonte: CARDOSO <i>et al.</i> , 2005; BETIOLI <i>et al.</i> 2009)	82
Figura 36 - Ensaio de <i>squeeze-flow</i>	83
Figura 37 - Aplicação da argamassa para ensaio de aderência	84
Figura 38– Aspectos dos painéis: a) corte para corpos de prova; b) colagem das pastilhas	85
Figura 39–Dinamômetro de tração utilizado no ensaio de aderência	86
Figura 40– Aspectos dos corpos de prova para ensaio de retração: a) nos moldes; b) após desmoldagem	86

Figura 41– Gráfico esquemático do ensaio de absorção por sucção capilar .....	88
Figura 42 – Influência do teor de RSPC sobre a retenção de água das argamassas produzidas.....	90
Figura 43– Retenção de água relativa para as argamassas produzidas.....	90
Figura 44 - Efeito do teor de RSPC na densidade de massa das argamassas produzidas .....	92
Figura 45 - Densidade de massa relativa das argamassas produzidas.....	92
Figura 46- Efeito do teor de RSPC sobre o teor de ar incorporado das argamassas produzidas.....	94
Figura 47 – Teor de ar incorporado relativo das argamassas produzidas.....	94
Figura 48 - Curvas da carga versus deslocamento do ensaio de <i>squeeze-flow</i> : para as argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC; d) 30%RSPC .....	95
Figura 49 – Curvas da carga versus deslocamento obtidas para as argamassas no ensaio de <i>squeeze-flow</i> .....	97
Figura 50 - Curvas de <i>squeeze-flow</i> : (a) Perfil típico; (b) maximização das curvas, através da redução de escala, com identificação do limite da região I + II (Fonte: Silva, 2015).....	98
Figura 51 - Maximização das curvas das argamassas, através da redução de escala com identificação do limite da região elástica .....	99
Figura 52 - Comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão aos 7 dias e aos 28 dias de cura.....	101
Figura 53 - Resistência à tração na flexão relativa: a) aos 7 dias; b) aos 28 dias de cura .....	102
Figura 54- Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias de cura .....	104
Figura 55 - Resistência à compressão relativa: a) aos sete dias; b) aos vinte e oito dias de cura.....	104
Figura 56 - Comportamento das argamassas quanto à resistência de aderência à tração .....	107
Figura 57 - Fissuras presentes no painel produzido com a argamassa 20%RSPC .....	108
Figura 58 - Resultados médios da (a) retração por secagem e da (b) perda de massa .	109
Figura 59 – Retração por secagem versus a perda de massa para as argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC; d) 30%RSPC .....	111

Figura 60 - Comportamento das argamassas quanto: a) absorção de água; b) índice de vazios.....	114
Figura 61 - a) Absorção de água por imersão relativa e b) Índice de vazios relativo ..	114
Figura 62 - Relação entre o ganho de massa médio e a raiz do tempo das argamassas produzidas.....	115
Figura 63 - Comportamento das argamassas quanto à taxa de absorção por capilaridade .....	117
Figura 64- Taxa de absorção por capilaridade relativa das argamassas produzidas....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados conclusivos de estudos, quanto à possibilidade de substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais em concretos.....	35
Tabela 2 - Resultados conclusivos de pesquisas, cujo agregado miúdo foi substituído parcialmente por resíduo de serragem de rochas ornamentais, em concretos. ....	37
Tabela 3 - Propriedades no estado fresco das argamassas produzidas por Tenório <i>et al.</i> (2005) .....	40
Tabela 4 - Resistência à compressão das argamassas produzidas por Tenório <i>et al.</i> (2005) .....	40
Tabela 5 - Parâmetros de durabilidade avaliados por Tenório <i>et al.</i> (2005) .....	41
Tabela 6 - Resistências à compressão e à tração na flexão das argamassas produzidas por Silva <i>et al.</i> (2005).....	41
Tabela 7 - Índice de consistência das argamassas produzidas por Al-Akhras <i>et al.</i> (2010) .....	44
Tabela 8 - Teor de finos das areias estudadas por Freitas e Costa (2010).....	45
Tabela 9 - Propriedades das argamassas estudadas no estado endurecido produzidas por Freitas e Costa (2010).....	46
Tabela 10 – Espalhamento e relação a/c das argamassas do estudo de Sales <i>et al.</i> (2014) .....	48
Tabela 11 - Resistência à compressão axial das argamassas produzidas por Sales <i>et al.</i> (2014) .....	49
Tabela 12 - Absorção de água para as argamassas produzidas por Sales <i>et al.</i> (2014)..	49
Tabela 13 - Resistência à compressão das argamassas desenvolvidas por Silva (2008): RSPC em substituição ao cimento.....	52
Tabela 14 - Resistência à compressão das argamassas desenvolvidas por Silva (2008): RSPC em substituição ao agregado natural .....	53
Tabela 15 – Resistência à compressão dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC em substituição ao cimento.....	55
Tabela 16 - Absorção de água dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC em substituição ao cimento .....	55
Tabela 17 - Quantidade de materiais utilizados para a produção dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC substituindo os finos de britagem.....	56

Tabela 18 - Diâmetro médio de espalhamento das argamassas produzidas por Galvão <i>et al.</i> (2016) .....	59
Tabela 19 - Resistências das argamassas produzidas por Galvão <i>et al.</i> (2016).....	60
Tabela 20 - Absorção de água e índice de vazios das argamassas produzidas por Mercês e Moura (2016) .....	62
Tabela 21 - Resultados da análise química dos resíduos de pedra cariri analisados por Menezes <i>et al.</i> (2010) .....	64
Tabela 22 - Análise química dos resíduos avaliados por Queiroz <i>et al.</i> (2014).....	66
Tabela 23 – Propriedades do cimento utilizado na pesquisa .....	70
Tabela 24 - Distribuição de tamanhos de partículas do cimento utilizado.....	71
Tabela 25 – Propriedades do agregado natural utilizado na pesquisa .....	71
Tabela 26 – Composição química do RSPC avaliada por Bastos (2014).....	75
Tabela 27 - Distribuição de tamanhos de partículas do RSPC utilizado .....	76
Tabela 28 - Resultados de massa unitária e específica do RSPC .....	77
Tabela 29 - Índice de consistência e relação a/c das argamassas produzidas.....	79
Tabela 30 - Resultados de médias de retenção de água das argamassas produzidas.....	89
Tabela 31 - Análise de variância para retenção de água.....	89
Tabela 32 - Médias de densidade de massa das argamassas produzidas.....	91
Tabela 33 - Análise de Variância para densidade de massa .....	91
Tabela 34– Teor de ar incorporado médio das argamassas produzidas .....	93
Tabela 35 - Análise de Variância para teor de ar incorporado .....	93
Tabela 36 - Valores de carga, deslocamento e módulo de escoamento, obtidos do limite de transição entre a região elástica e plástica das curvas de <i>squeeze-flow</i> .....	99
Tabela 37 - Resultados de médias de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.....	100
Tabela 38 - Análise de Variância para resistência à tração na flexão .....	101
Tabela 39 - Resultados de médias de resistência à compressão das argamassas .....	103
Tabela 40 - Resultados de ANOVA para a resistência à compressão das argamassas	103
Tabela 41 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração.....	106
Tabela 42 - Análise de Variância para resistência de aderência à tração .....	106
Tabela 43 - Resultados de médias de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas produzidas .....	113
Tabela 44 - Análise de Variância para absorção de água por imersão e índice de vazios .....	113



Tabela 45 - Resultados de médias de taxa de absorção por capilaridade das argamassas .....	116
Tabela 46 - Análise de Variância para a taxa de absorção .....	116
Tabela 47 – Resultados individuais de retenção de água das argamassas produzidas .	132
Tabela 48 – Resultados individuais de densidade de massa das argamassas produzidas .....	132
Tabela 49 – Resultados individuais de teor de ar incorporado das argamassas produzidas .....	132
Tabela 50 – Resultados individuais de resistência à flexão das argamassas produzidas .....	133
Tabela 51 – Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas produzidas.....	134
Tabela 52 – Resultados individuais de resistência de aderência à tração.....	135
Tabela 53 – Resultados de perda de massa e retração por secagem das argamassas produzidas.....	136
Tabela 54 – Resultados individuais de absorção por imersão e índice de vazios .....	137
Tabela 55– Resultados individuais da taxa de absorção de água por capilaridade .....	137

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o aumento no consumo de bens industrializados trazem como consequência o aumento na exploração de matérias-primas utilizadas na fabricação dos diversos produtos consumidos (ASHBY *et al.*, 2012). O aumento na exploração destes materiais leva à escassez dos mesmos. Os recursos minerais, por exemplo, que são provenientes de fontes esgotáveis, requerem racionalização na exploração das suas jazidas ou reservas.

A preocupação com o uso racional dos recursos minerais precisa englobar todas as etapas de seu processo produtivo, desde a extração do recurso na jazida até a obtenção da matéria-prima pronta para uso. Na maioria das vezes, os resíduos gerados nas diferentes etapas do processo produtivo são eliminados de forma incorreta causando grande prejuízo ao meio ambiente e a saúde humana, tornando-se um problema a ser solucionado pelos diversos segmentos industriais, inclusive a mineradora (FERNANDES *et al.*, 2001).

Um dos segmentos industriais que provoca grande impacto ambiental é a indústria de beneficiamento de rochas ornamentais. Neste segmento, o volume de resíduos gerado é bastante expressivo, sendo estimado em cerca de 65 a 70% do total extraído, e em sua maioria, a destinação final dos mesmos é realizada de forma inadequada (CAMPOS *et al.*, 2009).

O Brasil se destaca no segmento de exploração e beneficiamento de rochas ornamentais (mármore, granito, ardósia, serpentinitos, xistos, dentre outras) estando entre os maiores exportadores e importadores de rochas ornamentais do mundo. Até o mês de setembro de 2016, o total exportado já se aproximava dos dois milhões de toneladas, sendo que os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará, Bahia, Rio Grande do Norte e Pernambuco contribuíram em maior proporção no beneficiamento de rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2016).

Sendo o Brasil um destaque na produção de rochas ornamentais, isso implica num volume considerável de resíduos gerados. Esse fato tem levado pesquisadores a buscarem alternativas de aproveitamento deste resíduo gerado. Como alternativa tem-se observado um crescente interesse em incorporar os resíduos minerais à composição de produtos à base de cimento Portland.

Muitos trabalhos vêm sendo realizados com intuito de avaliar a influência da introdução dos resíduos provenientes da extração e beneficiamento de minerais na composição de matrizes cimentícias (TENÓRIO *et al.*, 2005; BINICI *et al.*, 2007; QUEIROZ;

FRASCÁ, 2008; REIS; TRISTÃO, 2010; CORINALDESI *et al.*, 2010; RAI *et al.*, 2011; MOURA; LEITE, 2011; ERGUN, 2011).

Muitos estudiosos têm buscando avaliar o efeito da adição de resíduos de rochas ornamentais na composição de argamassas (MOURA *et al.*, 2002; CRUZ *et al.*, 2003; TENÓRIO *et al.*, 2005; MENEZES *et al.*, 2009; MATTA *et al.*, 2013).

Dentre os seis maiores estados exportadores de rochas ornamentais, quatro estão na região nordeste do Brasil. Isto porque esta região é possuidora de um enorme potencial geológico. No estado do Ceará, por exemplo, mais precisamente nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, estão localizadas grandes concentrações de calcário sedimentar laminado (VIDAL *et al.*, 2007). Este calcário é comercialmente conhecido como Pedra Cariri e é utilizado na indústria de rochas ornamentais, sendo comercializado na forma de placas.

Durante a extração e beneficiamento da Pedra Cariri, o percentual de perda é estimado em 70% do total extraído, gerando um significativo volume de resíduos gerados (VIDAL; PADILHA, 2003).

O fato do processo produtivo da Pedra Cariri possuir um elevado percentual de perda, é explicado pela adoção de métodos de lavra e beneficiamento muito rudimentares. Em 2005, Vidal *et al.* fizeram um estudo para estimar a quantidade de resíduos já gerada apenas no processo de extração das lajotas de Pedra Cariri e chegaram a um montante de mais de um milhão de metros cúbicos. Logo, a compatibilização ambiental deste tipo de empreendimento exigirá das empresas mineradoras instrumentos de gerenciamento e controle cada vez mais rígidos para implantação e continuação das atividades. Assim, pode-se reduzir significativamente os impactos decorrentes desta atividade.

Nas diversas etapas do processo de extração e beneficiamento da Pedra Cariri são gerados resíduos com diferentes morfologias. A serragem da Pedra Cariri para padronização das dimensões das placas gera um resíduo na forma de pó, ao que alguns pesquisadores denominaram de Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC). Através de levantamento bibliográfico verificou-se que foram realizados poucos estudos avaliando a possibilidade de utilização do RSPC em matrizes cimentícias (SILVA *et al.*, 2008; MOURA *et al.*, 2013, GUIMARÃES, 2013; BASTOS, 2014; GALVÃO *et al.*, 2016; MERCÊS; MOURA, 2016).

Neste contexto, propõe-se estudar a utilização de RSPC como substituição parcial do agregado miúdo para produção de argamassa. Este estudo se justifica pela necessidade de encontrar uma alternativa de aplicação deste resíduo de modo a mitigar os impactos ambientais decorrentes da deposição inadequada do mesmo, além de contribuir para reduzir o problema de escassez de matérias-primas enfrentado pela construção civil.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Verificar a influência da utilização de Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC), como substituto parcial do agregado miúdo, na produção de argamassa.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos destaca-se:

- caracterizar o RSPC do ponto de vista químico e físico;
- avaliar a influência da utilização de diferentes teores de RSPC, em substituição ao agregado natural, em propriedades das argamassas no estado fresco (retenção de água, densidade de massa, teor de ar incorporado e comportamento reológico);
- verificar a influência da utilização de diferentes teores de RSPC, em substituição ao agregado natural, em propriedades das argamassas, no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração, retração por secagem, absorção por capilaridade, absorção por imersão e índice de vazios).

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em 7 capítulos.

No capítulo 1 é feita uma contextualização sobre o tema, abordando o impacto decorrente das atividades de beneficiamento de rochas ornamentais e a possibilidade de utilização dos resíduos gerados neste processo de beneficiamento. Neste capítulo são destacados os objetivos e a relevância do estudo proposto.

O capítulo 2 tratado panorama nacional da produção de rochas ornamentais, com ênfase na Pedra Cariri, a qual origina o resíduo estudado.

No capítulo 3 serão apresentados resultados de estudos envolvendo a utilização de resíduos de rochas ornamentais em matrizes cimentícias, destacando a substituição ao agregado natural em argamassas.

O capítulo 4 apresenta os resultados de trabalhos realizados envolvendo o reaproveitamento do Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC) em matrizes cimentícias e em aplicações diversas.

O capítulo 5 descreve o programa experimental. São relacionados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas, bem como, as características a serem avaliadas nas argamassas, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no programa experimental, bem como a análise dos mesmos.

O capítulo 7 trata das conclusões e considerações finais sobre o estudo realizado.

## 2. ROCHAS ORNAMENTAIS E A PEDRA CARIRI

As rochas ornamentais e de revestimento são comercialmente conhecidas como mármore e granitos, uma vez que correspondem a cerca de 90% da produção mundial de rochas ornamentais. Os granitos designam um amplo conjunto de rochas silicáticas que, além de granitos, abrange outros tipos de rochas. Já o mármore, representa as rochas carbonáticas que possuem em mais de 50% de sua composição os minerais calcita e dolomita (CHIODI FILHO, 2002).

### 2.1 PANORAMA NACIONAL DO MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O maior campo de utilização das rochas ornamentais é na construção civil. São diversas aplicações, sendo usualmente utilizadas em pisos, fachadas, e em materiais decorativos. Porém seu emprego depende das características de durabilidade e resistência da rocha, que são dependentes de sua composição e morfologia mineralógica (CHIODI FILHO, 2002).

O Brasil possui uma diversidade mineral excepcional, abrangendo uma grande variedade de rochas ornamentais e de revestimento, tais como: granitos, mármore, quartizitos, ardósia, pedra-sabão, metaconglomerados, serpentinitos, travertino, calcário e outros tipos (MELLO *et al.*, 2011). Além desta variedade, destaca-se a alta capacidade de produção brasileira, que, conforme Montani (2015), foi estimada pela ABIROCHAS em cerca de 140 milhões de metros quadrados de pedra equivalente (chapas de 2cm de espessura) por ano.

A elevada capacidade de produção nacional de rochas ornamentais só foi possível devido ao desenvolvimento e emprego de tecnologias mais adequadas, tanto na lavra quanto no beneficiamento do material extraído, devido aos expressivos investimentos a partir da década de 90. Graças a esses investimentos, o país alavancou a produtividade neste segmento da indústria de mineração, atingindo uma produção anual acima de nove milhões de toneladas no ano de 2015, o que equivale a aproximadamente 7% da produção mundial (ABIROCHAS, 2015).

Dos mais de nove milhões de toneladas de rochas extraídas em 2015, o Espírito Santo contribuiu para mais de 40% da produção nacional, seguido dos estados de Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro (MELLO *et al.*, 2011). Na região nordeste do Brasil, além da Bahia, os

estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco merecem destaque neste segmento industrial (ABIROCHAS, 2016).

O estado do Ceará é o segundo maior produtor de rochas ornamentais da região Nordeste, posição que é devida a existência de um ambiente geológico propício. O embasamento cristalino abrange grande parte da extensão territorial do estado, chegando a cobrir 75% da mesma. Nos locais de sua ocorrência é possível verificar a extração e beneficiamento de diversos minerais, destacando-se no contexto das rochas ornamentais, o granito. Nos outros 25% do território do Ceará estão terrenos de características sedimentares, de onde são extraídos minerais carbonáticos, dentre eles a Pedra Cariri (ADECE, 2013).

O estado cearense se destaca no segmento das rochas ornamentais silicáticas, onde se sobressai o granito Branco Ceará, que responde a 37% da produção do estado. A principal jazida deste material granítico, uma das mais importantes do estado, é a Asa Branca, que fica localizada no município de Santa Quitéria, considerada de classe internacional (FERNANDES, 2004). Além disto, o estado também possui destaque para a produção de rochas ornamentais de natureza carbonática, como é o caso da produção de Pedra Cariri, que responde por mais de 20% da produção de rochas ornamentais do estado (VIDAL; ROBERTO, 2001).

Conforme o DNPM-CE (2000), as reservas de granitos aprovadas estão localizadas no noroeste do Estado, mais precisamente nos municípios de Alcântaras, Amontada, Aracoiaba, Boa Viagem, Cariré, Eusébio, Forquilha, Irauçuba, Independência, Itapajé, Itaitinga, Itapipoca, Itapiuna, Limoeiro do Norte, Marco, Massapé, Meruoca, Miraima, Monsenhor Tabosa, Santa Quitéria, São Luis do Curu, Sobral, Tamboril, Várzea Alegre e Potiretama. As reservas de mármore estão localizadas nos municípios de Boa Viagem, Cariús, Santa Quitéria e Uruari. As reservas de calcário sedimentar laminado (Pedra Cariri) estão situadas ao sul do Estado, abrangendo parte da Bacia Sedimentar do Araripe, nos municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda.

O setor de beneficiamento de rochas ornamentais do Ceará dispõe de um parque industrial relativamente moderno, com produção mensal em torno de 94.000 m<sup>2</sup> de chapas e ladrilhos. Porém, devido a grande demanda de mercado, este setor é voltado para o beneficiamento de material granítico (FERNANDES, 2004).

## 2.2. PEDRA CARIRI

A Bacia Sedimentar do Araripe está situada no interior da região Nordeste, abrangendo o estado de Pernambuco ao noroeste, o do Piauí ao leste e o do Ceará ao sul. Nela está localizada a Formação Santana que, além das jazidas de gipsita, exhibe extensos e abundantes depósitos carbonáticos que se apresentam na forma estratificada, intercalados por folhelhos, siltitos e arenitos depositados durante o Cretáceo Inferior, há cerca de 120 milhões de anos (VIANA; NEUMANN, 2002).

A Formação Santana compreende principalmente os municípios cearenses de Barbalha, Crato, Missão Velha, Porteiras, Jardim, Nova Olinda e Santana do Cariri. Porém, nos dois últimos é que estão localizadas as principais frentes de lavra do calcário laminado (VIDAL; PADILHA, 2003). São nestas cidades que os afloramentos estão bem expostos (MANSO; HESSEL, 2012). A Figura 1 ilustra o mapa de localização da Bacia Sedimentar do Araripe e onde ocorrem os afloramentos da Formação Santana.

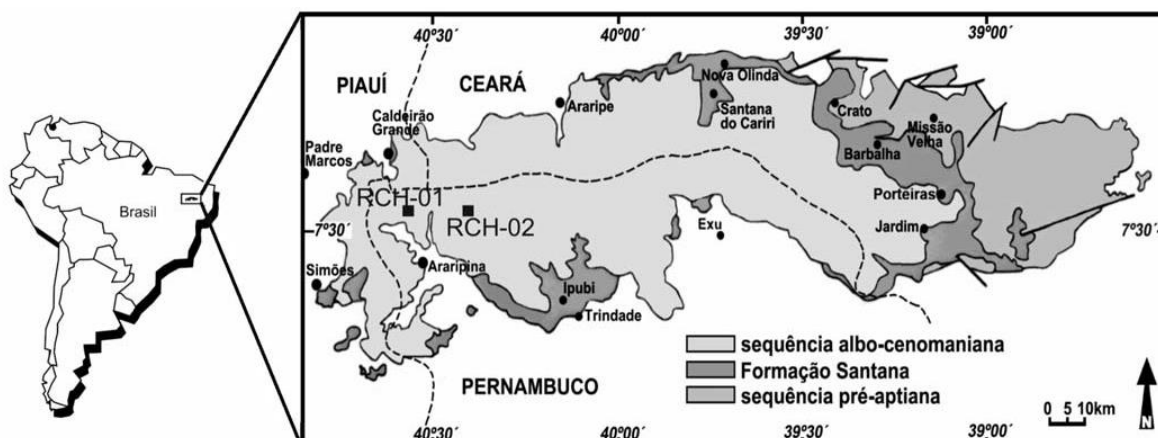


Figura 1- Bacia Sedimentar do Araripe (Fonte: MANSO; HESSEL, 2012, modificado de ASSINE, 2007).

Nova Olinda e Santana do Cariri, municípios que abrigam mais da metade das reservas de rochas carbonáticas do estado do Ceará, possuem, respectivamente, 14.256 e 17.170 habitantes (CENSO DEMOGRÁFICO, 2010). Os dois municípios somam uma extensão territorial de aproximadamente 1.140 km<sup>2</sup>, sendo que as reservas minerais medidas nos dois municípios são da ordem de pouco mais de 370 milhões de toneladas (DNPM, 2010).

Além de importante fonte de recursos minerais, a Formação Santana se destaca pelo seu valor paleontológico, pois são encontradas diversas formações fossilíferas bem



preservadas, como peixes, répteis, além de invertebrados e plantas, conforme ilustram as Figuras 2a e 2b (CORDEIRO *et al.*, 2015).



(a) (b)  
Figura 2 - Material fossilífero proveniente da Formação Santana – CE: a) planta; b) invertebrado (Fonte: CORDEIRO *et al.*, 2015).

Segundo Vidal *et al.*, (2005), o carbonato de cálcio é o principal constituinte do calcário sedimentar da Bacia do Araripe. Porém, pode conter óxido de magnésio na sua composição, geralmente na forma de dolomita, o que acarreta na diferença de coloração do material mineral. Materiais com a coloração cinza clara são característicos de rochas com presença de magnésio. Por outro lado, materiais compostos basicamente por calcita possuem coloração creme claro (MENEZES *et al.*, 2010).

O carbonato de cálcio é um material com relevante importância econômica, pois é matéria-prima de vários segmentos do mercado, como na indústria da construção civil, indústria açucareira, de alumínio, indústria de papel e celulose. Pode ser utilizado também na agroindústria, como insumo para a correção de solos (BEZERRA, 2015).

A rocha ornamental proveniente do calcário calcítico laminado é denominada de pedra Cariri, sendo um produto de acabamento simples, cujas peças normalmente são utilizadas com a superfície natural, não passando por nenhum processo de polimento. É obtida, portanto, quase que diretamente por delaminação mecânica e esquadrejamento de placas, o que é possível devido à característica estratificada das deposições calcárias (MELLO *et al.*, 2011). A Figura 3 ilustra a estratificação da Pedra Cariri.



Figura 3- Calcários laminados da Formação Santana(Fonte: HASUI *et al.*, 2012).

A simplicidade na forma de extração e beneficiamento deste material foi um fator determinante para o desenvolvimento da atividade de mineração nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri.

### **2.2.1. Lavra da Pedra Cariri**

A atividade de mineração dos depósitos de calcário laminado existentes na região do Cariri Cearense foi iniciada há mais de 30 anos. Esta atividade cresceu na contramão de todo o desenvolvimento econômico gerado pela atividade minerária do segmento de rochas ornamentais e de revestimento. Isto porque esta atividade geralmente é realizada por pequenas empresas, com baixos investimentos em tecnologia mineral e ambiental (CASTRO *et al.*, 2013).

De acordo com Bezerra (2015), os municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri tinham a pecuária e a agricultura como atividade econômica principal, porém com a descoberta da capacidade mineral da região a atividade de mineração da Pedra Cariri começou a sobressair.

O método de lavra utilizado para extração da Pedra Cariri nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri é o de céu aberto e lavra seletiva, que geralmente é o método aplicado para afloramentos. Este se inicia com o capeamento, que consiste na retirada da vegetação e do solo depositado sobre a rocha (VIDAL; PADILHA, 2003). Em algumas minas, a cobertura de vegetação e solo é de centímetros logo chegando à rocha desejada. Em

outras, é preciso retirar cerca de 10 a 15 metros de material de cobertura (VIDAL *et al.*, 2005).

A pequena produtividade e baixa taxa de recuperação são características da lavra da Pedra Cariri, demonstrando a carência, ou até mesmo a inexistência de planejamento operacional. Isto fica bastante evidenciado quando uma frente de lavra é obstruída pelo descarte das sobras, placas quebradas e de material estéril próximo ao acesso da mesma (VIDAL; PADILHA, 2003).

No início, o processo de lavra era executado de maneira bastante rudimentar, sem nenhum tipo de mecanização. As placas eram extraídas com o auxílio de talhadeiras e alavancas, sem nenhum controle dimensional, geralmente incorrendo em quebras e perdas de material (VIDAL; PADILHA, 2003). As Figuras 4a e 4b ilustram o processo de lavra rudimentar e aspecto das placas obtidas através da lavra manual, respectivamente.



Figura 4–Lavra rudimentar: a) processo de extração (Fonte: BASTOS, 2014); b) aspecto das placas extraídas (Fonte: ADEODATO; VIDAL, 2005)

Segundo Mendes Filho (2009), no ano de 1998, a Fundação Núcleo Tecnológico Industrial do Ceará – NUTEC desenvolveu máquinas de corte com disco diamantado, e as placas de Pedra Cariri começaram a ser extraídas com o novo equipamento. Trata-se do processo semimecanizado, no qual a espessura da placa extraída depende do diâmetro do disco diamantado utilizado, que possui dimensões de 350 a 500 mm (VIDAL; PADILHA, 2003). A Figura 5 ilustra processo semimecanizado de extração das placas de Pedra Cariri.



Figura 5 - Processo de lavra semimecanizado (Fonte: MENDES FILHO, 2009).

### **2.2.2. Beneficiamento**

A lavra e o beneficiamento do calcário laminado têm como principal objetivo a produção de lajotas voltadas para o mercado de rocha ornamental, utilizadas em pisos e paredes que podem ter as seguintes dimensões: 40x40 cm, 50x50 cm, 30x30 cm, 20x20 cm e 15x30 cm (VIDAL; PADILHA, 2003).

Para que as placas obtidas na lavra, apresentem espessura do produto mais comercializado, que são as lajotas com aproximadamente 2 cm de espessura, é necessário passem pelo processo de deslocamento. Este processo, conforme ilustrado pela Figura 6, é realizado de forma manual, uma vez que o trabalhador, com auxílio de espátulas e martelo, começa a deslocar o material de acordo com o plano de clivagem da rocha (BASTOS, 2014).



Figura 6 - Aspecto do deslocamento manual das lajotas (Fonte: BASTOS, 2014).

Após o deslocamento, alguns filetes ou irregularidades permanecem na superfície das lajotas, sendo estas submetidas ao processo de calibragem, também realizado manualmente com o auxílio de espátulas e martelos (BASTOS, 2014).

Um dos problemas do processo ser realizado de forma manual é a falta de uniformidade dimensional, que também dificulta a inserção do produto no mercado nacional e internacional (BASTOS, 2014).

A serragem das lajotas nas dimensões requeridas pelo mercado é uma das últimas etapas do processo de beneficiamento da Pedra Cariri. Este procedimento é realizado através de máquinas de esquadrejamento, porém nem todos os produtores realizam esta atividade, devido a impossibilidade de aquisição do equipamento necessário. Portanto, muitas vezes, o material deslocado e calibrado é repassado pelos pequenos produtores às serrarias da região (BASTOS, 2014). A Figura 7 mostra um aspecto do processo de serragem da Pedra Cariri.



Figura 7 - Processo de serragem da pedra Cariri (Fonte: ADEODATO; VIDAL, 2005).

### 2.2.3. Geração de Resíduos de Pedra Cariri

No ano de 2005 foi realizado um levantamento do total de rejeitos já gerados pela atividade de mineração do calcário laminado nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri e chegou-se a uma estimativa de mais de um milhão de metros cúbicos de resíduos já depositados ao longo dos anos de exploração das jazidas destes municípios (VIDAL *et al.*, 2005). Este grande volume de rejeitos deve-se às perdas durante o processo de extração e de beneficiamento da pedra Cariri, que é cerca de 70% do total da rocha lavrada (VIDAL; PADILHA, 2003).

De acordo com Bastos (2014), a morfologia do rejeito está intimamente relacionada ao processo no qual é gerado, sendo originados tanto no processo de lavra, quanto no beneficiamento da Pedra Cariri. Durante o processo de lavra são gerados rejeitos na forma de lascas de rochas, provenientes das quebras durante a extração, deslocamento e calibração das placas, conforme ilustra a Figura 8. O processo de serragem pode dar origem a dois tipos de rejeitos, as lascas e aparas, ilustrados pela Figura 9a e um resíduo fluido, ilustrado pela Figura 9b. O resíduo fluido tem aspecto de uma lama e é gerado no processo de esquadrejamento das placas, pois o mesmo é realizado por serragem via úmida.



Figura 8 - Rejeito proveniente da lavra, deslocamento e calibração da pedra Cariri (Fonte: BASTOS, 2014).



(a)

(b)

Figura 9- Rejeitos de serragem: a) na forma de lascas e aparas; b) na forma fluida (Fonte: SUASSUNA *et al.*, 2012).

Através do apoio tecnológico do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, os produtores de Pedra Cariri tiveram a oportunidade de encontrar uma destinação ambiental e economicamente viável aos resíduos gerados. Para atingir esse objetivo tentou-se implementar as seguintes diretrizes: melhorar a metodologia de lavra com maior planejamento, aperfeiçoar a tecnologia utilizada em cada caso, e buscar soluções para o aproveitamento de resíduos sólidos e líquidos da produção de Pedra Cariri (CASTRO *et al.*, 2007). Porém, o processo de transferência de tecnologia se depara com muitos problemas que dificultam a implantação das melhorias pretendidas. Este fato foi constatado por Bastos (2014), quando no desenvolvimento de trabalho científico esteve nos principais municípios exploradores da

Pedra Cariri e verificou que a deposição inadequada de rejeitos é uma prática que ainda persiste. Assim, como acontece com os demais resíduos de rochas ornamentais, ainda se busca alternativas de aproveitamento.

#### **2.2.4 Impactos gerados pela exploração da Pedra Cariri**

O principal impacto decorrente da exploração da Pedra Cariri é o ambiental. Uma vez que os resíduos são descartados nas margens dos rios, que trazem como consequência o assoreamento dos pequenos e intermitentes cursos de água da região. Parte dos resíduos são depositados também nos arredores da própria mina e nas margens das rodovias, causando poluição do solo (CASTRO *et al.*, 2009).

Segundo Bezerra (2015), diversas frentes de lavra são abandonadas por não estarem devidamente regularizadas junto ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), e constituem outra problemática quanto à exploração da Pedra Cariri, pois é impraticável a retomada da agricultura nos terrenos já explorados e não recuperados.

Além da preocupação ambiental, há outro impacto gerado pela extração desordenada da Pedra Cariri, que é a destruição do patrimônio paleontológico, seja pela extração ilegal de espécimes fósseis, seja pela expansão das pedreiras (CASTRO *et al.*, 2009).



### 3. RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E SUA UTILIZAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A geração de resíduos é inerente a todo processo de transformação de materiais ou de produção. O setor de rochas ornamentais também incorre na geração dos mesmos, porém as características dos resíduos gerados dependem bastante da rocha que deu origem ao rejeito, da etapa em que foi gerado e se foram utilizados insumos para auxiliar no processo produtivo, a exemplo de pós abrasivos e água de arrefecimento (BRAGA *et.al*, 2010).

De acordo com Gonçalves (2000), no processo produtivo de rochas ornamentais são gerados, comumente, dois tipos de resíduos: um na forma de cacos ou lascas de pedras, podendo ser originado tanto na etapa de lavra, quanto na de beneficiamento, e outro na forma de lama proveniente dos processos de serragem dos blocos de rocha em placas e do polimento da superfície das placas. A Figura 10 ilustra um esquema que destaca os resíduos gerados em cada etapa do processo de extração, beneficiamento e produção das rochas ornamentais.

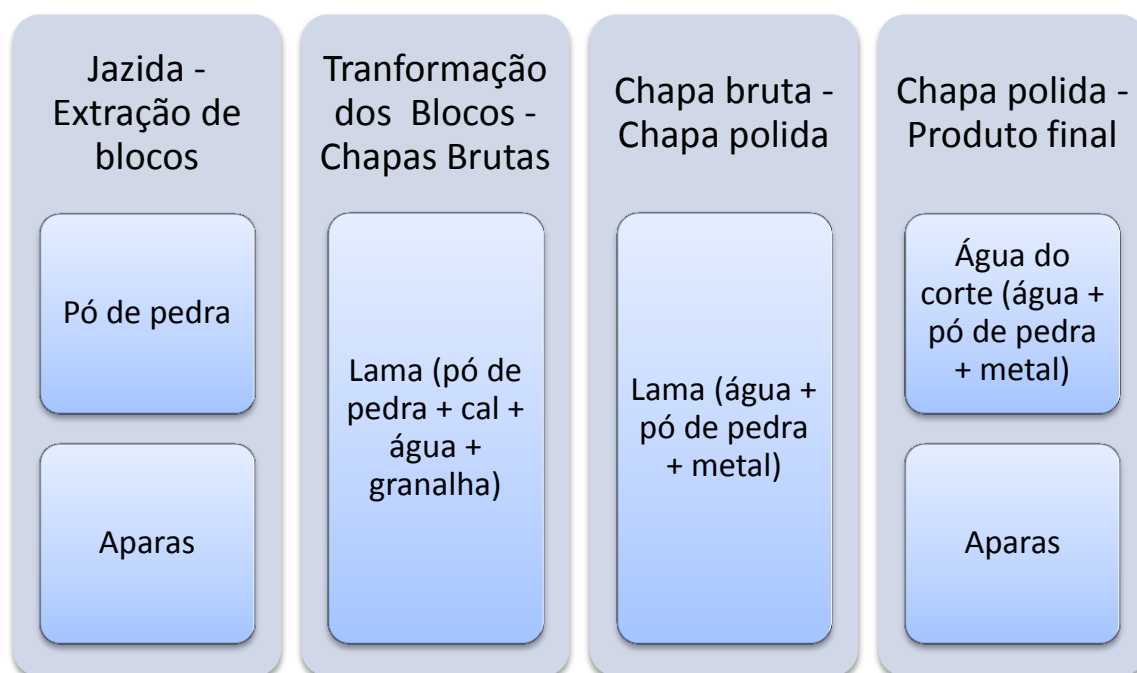


Figura 10 - Esquema dos resíduos gerados em cada etapa do processo produtivo de rochas ornamentais (Fonte: Adaptado de GONÇALVES, 2000)

Não existem dados precisos que especifiquem a quantidade de resíduos gerados no processo produtivo de rochas ornamentais, porém estima-se que cerca de 70% do total de rochas extraídas seja convertido em perdas (CAMPOS *et al.*, 2009). O fato é que é grande o impacto ambiental gerado pela disposição inadequada dos mesmos. Por se tratar de um rejeito

que preserva algumas características da rocha matriz, várias pesquisas foram e ainda são realizadas no intuito de propiciar ao resíduo uma destinação mais adequada.

De acordo com Shirazi (2011), os resíduos de rochas ornamentais têm possibilidades de utilização na indústria da construção civil, na fabricação de papel, em segmentos industriais como indústria cerâmica, de tintas, de polímeros, siderúrgica e de fertilizantes. Das possibilidades de utilização elencadas, a construção civil é um segmento do mercado que apresenta grande potencial para absorver os resíduos de rochas ornamentais, pois é um setor que apresenta um elevado consumo de recursos minerais. Além disso, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, como o granito e o mármore, possui características físicas, mecânicas e mineralógicas que o habilita para ser usado em matrizes cimentícias, como fíler, em substituição ao agregado miúdo natural, ou, no caso de argamassas, em substituição à cal (GONÇALVES *et al.*, 2010).

### 3.1 ADIÇÃO MINERAL - FÍLERES

As adições minerais podem ser entendidas como materiais utilizados conjuntamente com o cimento Portland para que se obtenha um produto cimentício com um elevado desempenho tecnológico. Estes materiais podem provocar efeitos físicos e químicos à matriz de cimento.

Mehta e Monteiro (2015) definem adições minerais como sendo materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em teores altos, 6 a 70% da massa de material cimentício total. São acrescentados à mistura cimentícia para melhorar algumas de suas propriedades como resistência à fissuração, resistência à compressão final e permeabilidade.

A definição de adição mineral feita por Mehta e Monteiro (2015) não abrange o conceito geral de adições minerais, pois compreende apenas as adições com características pozolânicas. São excluídos os materiais cimentantes e os fíleres, que também são adições minerais.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define o material pozolânico como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que quando finamente dividido e na presença de umidade reage com o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento Portland, formando compostos com propriedades cimentantes.

As adições minerais cimentantes, são aquelas que não necessitam do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar compostos hidratados cimentantes, como o C-S-H. A baixa velocidade de hidratação desses materiais é uma característica que impossibilita a utilização dos mesmos apenas como cimentante único. A utilização conjugada como adição ou substituição do cimento Portland, e na presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória de alto forno (DAL MOLIN, 2011).

Já o fíler é um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento, sem atividade química, ou seja, não reage quimicamente com os produtos de hidratação do cimento possuindo apenas efeito físico na matriz de cimento. Os efeitos físicos podem ocorrer tanto com a melhora do empacotamento granulométrico da mistura, quanto com a atuação do material como pontos de nucleação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Neville e Brooks (2013), apesar de inerte, este material favorece a melhoria em algumas propriedades dos concretos, dentre elas pode-se citar a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade, exsudação capilar e tendência à fissuração. São exemplos de fíler, o calcário, pó de quartzo e pó de pedra.

A possibilidade da adição de fíleres melhorar o desempenho tecnológico de matrizes cimentícias sempre foi objeto de pesquisas. Soroka e Setter (1977) foram alguns dos precursores destes estudos. Estes autores observaram que a finura e o teor das adições minerais utilizadas em compostos à base de cimento estão diretamente relacionados com o incremento na resistência mecânica dos materiais estudados. Os autores atribuíram esta melhoria ao aumento na velocidade de hidratação do cimento proporcionada pelos fíleres, tal mecanismo atualmente é conhecido como efeito de nucleação.

O efeito de nucleação e diminuição da porosidade foi bem esclarecido por Dal Molin (2011), que explicou que, as adições minerais com efeito fíler, por possuir uma área específica elevada, ocupam os espaços entre os grãos de cimento. Dessa forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície destes grãos, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água, influenciando a cinética da hidratação e os tipos de produtos de hidratação formados. As adições restringem os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos hidratos, ao invés de poucos hidratos de grande tamanho.

De acordo com Mehta e Monteiro (2015), quanto à atuação como pontos de nucleação, o fíler auxilia na melhoria da interface matriz agregado (zona de transição), considerada geralmente o “elo mais fraco da corrente”. Segundo os autores, quando adicionadas ao cimento, as partículas das adições se instalam nessa região afetando o arranjo físico do

sistema, atuando como pontos de nucleação das partículas, aumentando as reações de hidratação e a redução da porosidade da zona de transição.

Os fíleres quanto à origem podem ser tanto naturais quanto processados, sendo importante que apresentem propriedades uniformes, especialmente a finura. A adição de fíleres pode aumentar a demanda de água das matrizes cimentícias. Porém, quando isto ocorrer pode-se utilizar aditivos redutores de água para não prejudicar a resistência mecânica da matriz cimentícia (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O aumento da demanda de água de matrizes cimentícias, quando adicionadas de fíleres, está relacionado com os tamanhos das partículas de material fino, que possuem uma elevada área superficial. Por conseguinte, quanto maior a área superficial das partículas, maior será a demanda tanto de água quanto de pasta para o recobrimento dos grãos das adições na matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 2015).

Os fíleres também podem, dependendo da forma e textura dos grãos das adições minerais, tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, uma vez que as partículas desses materiais se alojam entre as partículas dos demais componentes do cimento funcionando como lubrificante (ABCP, 2002).

### 3.2 APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Quando avalia-se a possibilidade de um resíduo tornar-se matéria-prima para compor algum produto, inicialmente faz-se uma análise das características do material a ser substituído e do resíduo que se pretende incorporar. No caso dos resíduos de serragem e polimento de rochas ornamentais, a finura é a principal característica deste resíduo. Desta forma, vários pesquisadores, com o intuito de agregar maior valor ao resíduo e de obter uma diminuição no custo energético, buscam a sua utilização principalmente em substituição ao cimento Portland. (GONÇALVES, 2000; KAVAS; OLGUN, 2007; ERGUN, 2011; BEDERINA *et al.*, 2011; MOHAMADIEN, 2012; SHIRULE *et al.*, 2012; ELMOATY, 2013; DEGEN *et al.*, 2013).

Levando-se em consideração o somatório do teor dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presentes no resíduo de serragem e polimento de placas de rochas ornamentais, cogita-se a possibilidade da utilização deste material como uma pozolana. Porém, devido às características da rocha mãe, estes componentes encontram-se na forma de minerais cristalinos, o que desfavorece o desenvolvimento da atividade pozolânica.

Alves (2008) avaliou a atividade pozolânica do resíduo de serragem de granitos quando estudou a possibilidade de utilização deste resíduo como adição em concretos. Os ensaios de pozolanicidade, pelo método mecânico, com argamassas com cimento, apresentaram resultado de índice de pozolanicidade na ordem de 60%. Portanto, bastante inferior ao estabelecido pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014), que é de 90%. Porém, os resultados de outros ensaios, levaram o autor a concluir que o referido resíduo comporta-se como fíler.

No que se refere à produção de concretos, devido à característica de fíler dos resíduos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais, pesquisadores, entre eles Gonçalves (2000); Ergun (2011); Shirule *et al.*, (2012) e Arel (2016), já comprovaram o potencial de utilização deste resíduo na forma de pó, em substituição parcial ao cimento. A Tabela 1 mostra, de forma resumida, os resultados obtidos nestes estudos.

Tabela 1 - Resultados conclusivos de estudos, quanto à possibilidade de substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais em concretos

<b>AUTORES</b>	<b>GONÇALVES (2000)</b>	<b>ERGUN (2011)</b>	<b>SHIRULLE <i>et al.</i>, (2012)</b>	<b>AREL (2016)</b>
<b>RESÍDUO ESTUDADO</b>	Granito	Mármore	Mármore	Mármore
<b>CONCLUSÃO</b>	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 pela autora

A partir dos resultados apresentados pela Tabela 1, verifica-se que os teores de substituição do cimento Portland por resíduo de rochas ornamentais, em concreto, oscilam entre 5 a 10%.

De acordo com alguns autores (ALVES, 2008; MOURA *et al.*, 2013), os resíduos de rochas ornamentais como não apresentam características pozolânicas, podem substituir o cimento Portland apenas em pequenas quantidades, chegando a no máximo 10%. Logo, esta alternativa de uso deste resíduo não é capaz de absorver o seu volume gerado. Por outro lado, alguns destes resíduos possuem características compatíveis com as dos agregados naturais, e podem, portanto, substituí-los na produção de concretos ou argamassas.

Diversas pesquisas foram realizadas na tentativa de se utilizar resíduos de serragem de rochas ornamentais, como substitutivo ao agregado miúdo natural em concretos (BINICI, *et al.*, 2007; DEMIREL, 2010; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013; ALIABDO *et al.*, 2014;

SINGH *et al.*, 2016). A Tabela 2 mostra, de forma resumida, os resultados obtidos nestas pesquisas.

Tabela 2 - Resultados conclusivos de pesquisas, cujo agregado miúdo foi substituído parcialmente por resíduo de serragem de rochas ornamentais, em concretos.

<b>AUTORES</b>	<b>BINICI <i>et al.</i>, (2007)</b>	<b>DEMIREL (2010)</b>	<b>VIJAYALAKSHMI, <i>et al.</i>, (2013)</b>	<b>ALIABDO <i>et al.</i>, (2014)</b>	<b>SINGH <i>et al.</i> (2016)</b>
<b>RESÍDUO</b>	Mármore	Mármore	Granito	Mármore	Granito
<b>TEORES (%)</b>	5, 10 e 15	25, 50 e 100*	5, 10, 15, 20 e 25	5; 7,5; 10 e 15	0, 10, 25, 40, 55 e 70
<b>TRABALHABILIDADE</b>	Diminuiu	-	Diminuiu	-	Diminuiu
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</b>	Aumentou	Aumentou	Equivalente até o teor de 15%	Aumentou para o teor de 10%	Melhor ou equivalente até o teor de 55%
<b>CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE</b>	Melhorou a resistência ao ataque por sulfatos. Diminuição da 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
<b>MELHOR TEOR DE RESÍDUO</b>	15%	100%	Resultados equivalentes até o teor de 15%	10%	Teor de 55%

\*Substituição a uma fração fina do agregado miúdo (material passante na peneira 0,25mm)

Fonte: BINICI *et al.*. (2007); DEMIREL (2010); VIJAYALAKSHMI *et al.*,(2013); ALIABDO *et al.*,(2014); SINGH *et al.* (2016), adaptado pela autora.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2 verifica-se que é possível a utilização do resíduo de rochas ornamentais, na forma de pó, em substituição ao agregado miúdo natural, em concretos.

Também foram realizados diversos estudos, com vistas ao aproveitamento de resíduo de rochas ornamentais em substituição ao agregado natural na produção de argamassas (MOURA *et al.*, 2002; CRUZ *et al.*, 2003; TENÓRIO *et al.*, 2005; CORINALDESI *et al.*, 2010; AL-AKHRAS *et al.*, 2010). A seguir serão apresentados os resultados de alguns destes estudos.

### **3.2.1 Substituição do agregado natural por resíduo de rochas ornamentais em argamassas**

Os resíduos utilizados nas pesquisas aqui apresentadas foram provenientes ou do processo de serragem de rochas para transformação em placas ou do processo de polimento das placas para acabamento final. Com exceção dos trabalhos realizados com rocha calcária.

Serão apresentados também alguns estudos que tratam da utilização de rochas calcárias britadas em argamassas (SILVA *et al.*, 2005; BENACHOUR *et al.*, 2008; FREITAS; COSTA, 2010; SILVA *et al.*, 2011). Esta abordagem se justifica considerando que as características físicas da fração fina das rochas calcárias britadas, assemelham-se às do resíduo de Pedra Cariri, utilizado no presente trabalho.

O trabalho desenvolvido por Moura *et al.* (2002) foi um dos primeiros no Brasil a abordar a possibilidade de utilização do resíduo de corte de mármore e granitos (RCMG) como substituto parcial do agregado miúdo em argamassas. O traço utilizado foi o de 1:6, em massa, e o índice de consistência foi fixado em  $260 \pm 10$  mm. Os teores de substituição do agregado natural pelo resíduo foram de 5 e 10%, em relação à massa de areia. Foi avaliada a resistência à compressão das argamassas, em diferentes idades, cujos resultados são ilustrados na Figura 11.



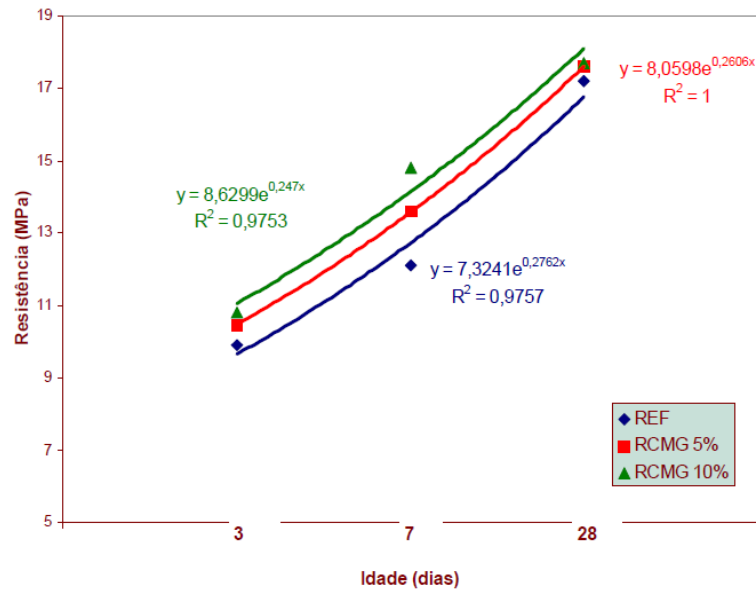


Figura 11 -Resistência à compressão das argamassas produzidas (Fonte: MOURA *et al.*, 2002)

Os resultados obtidos demonstram que a resistência à compressão das argamassas com RCMG aumentou para todos os teores estudados. O aumento na resistência chegou a 8% para a argamassa com 10% de RCMG. Este comportamento foi atribuído à granulometria do resíduo, que melhorou a distribuição do conjunto. Moura *et al.* (2002) concluíram pela viabilidade técnica da utilização de até 10% do resíduo como substituição do agregado miúdo natural.

Cruz *et al.* (2003) também verificaram a viabilidade de substituição da areia pelo resíduo de rochas ornamentais, baseados no trabalho desenvolvido por Moura *et al.* (2002). O traço de argamassa utilizado foi 1:3 (cimento: areia), em massa, e a relação a/c foi fixada em 0,48. Os teores de substituição da areia pelo resíduo de rochas foram de 5, 10, 15 e 20%, em massa. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Quanto à resistência à compressão axial das argamassas, verificou-se que os valores aumentaram com o aumento do teor de resíduo, sendo que os melhores resultados de resistência à compressão axial foram obtidos nas misturas com percentuais de resíduo de 15% e de 20%. Com relação ao módulo de elasticidade, houve um crescimento deste para as argamassas com até 15% de resíduo. Os autores atribuíram este comportamento a melhor distribuição granulométrica proporcionada pelo resíduo.

Tenório *et al.* (2005) avaliaram a influência da incorporação de diferentes proporções do resíduo do beneficiamento de chapas de granito, em substituição ao agregado natural, na produção de argamassa. O traço utilizado foi o 1:3, em massa, sendo fixado o índice de

consistência em  $250 \pm 10$  mm. Os teores de resíduo em substituição ao agregado natural foram de 5 e 10%. A Tabela 3 mostra os resultados para as propriedades das argamassas no estado fresco.

Tabela 3 - Propriedades no estado fresco das argamassas produzidas por Tenório *et al.* (2005)

Argamassa	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	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.

Segundo Tenório *et al.* (2005), o resíduo contribuiu para redução do teor de ar incorporado devido a sua maior finura, em relação ao agregado natural, contribuindo, desta forma, para um melhor preenchimento dos vazios.

No que se refere à trabalhabilidade das argamassas, Tenório *et al.* (2005) não apresentaram as relações a/c correspondentes para as consistências, embora mencionem que foi necessário um acréscimo de água para a argamassa cujo teor de substituição foi de 10%. Portanto, a substituição do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento de chapas de granito reduziu a trabalhabilidade das argamassas produzidas. Com relação à retenção de água, pode-se observar que não houve influência.

A Tabela 4 apresenta os valores de resistência à compressão, das argamassas estudadas por Tenório *et al.* (2005).

Tabela 4 - Resistência à compressão das argamassas produzidas por Tenório *et al.* (2005)

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

De acordo com Tenório *et al.* (2005), a utilização do resíduo de beneficiamento de chapas de granito como substituição parcial da areia provocou melhorias na resistência à compressão da argamassa. Os autores verificaram que a argamassa com 10% de resíduo de

granito apresentou o melhor comportamento, e que o resíduo utilizado na pesquisa atuou como fíler.

Tenório *et al.* (2005), também avaliaram características relacionadas à durabilidade das argamassas: absorção por imersão e índice de vazios. Os valores obtidos estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de durabilidade avaliados por Tenório *et al.*(2005)

<b>Argamassa</b>	<b>Índice de Vazios (%)</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>
REF	21,39	11,28
5AR	21,96	11,32
10AR	23,86	12,49

Fonte: TENÓRIO *et al.*, (2005)

O aumento do índice de vazios e de absorção de água da argamassa com 10% de resíduo, em relação aos da argamassa de referência, foi justificado por Tenório *et al.* (2005), como devido ao fato da argamassa com 10% de resíduo possuir maior relação a/c. No entanto, o comportamento das argamassas quanto aos parâmetros de durabilidade difere do comportamento mecânico.

Silva *et al.* (2005) estudaram a influência de agregados britados provenientes de rocha calcária calcítica, em particular a influência do teor de finos, nas propriedades de argamassas mistas de cimento, cal e areia. Os autores utilizaram cimento CP II Z 32, cal virgem moída e areia britada de rocha calcária calcítica. As argamassas foram preparadas no traço em volume 1:2:9 (cimento: cal: areia). Foram produzidas duas argamassas sendo uma com areia britada com finos (teor de material pulverulento de 6,0%) e outra com areia britada sem finos (teor de material pulverulento de 0,7%). O índice de consistência de ambas as argamassas foi fixado em  $275 \pm 5$  mm. Foram avaliadas a resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistências à compressão e à tração na flexão das argamassas produzidas por Silva *et al.* (2005)

<b>Argamassa</b>	<b>Resultado Médio (MPa)</b>		
	<b>Compressão</b>		<b>Tração na flexão</b>
	<b>14 dias</b>	<b>56 dias</b>	<b>56 dias</b>
0,7% finos	0,67	0,80	0,30
6,0% finos	1,09	1,35	0,44

Fonte: SILVA *et al.*,(2005)

Os autores verificaram que as argamassas contendo alto teor de finos apresentaram maiores valores de resistência à compressão e tração na flexão, quando comparado com a argamassa com menor teor de finos. Tal comportamento foi explicado por Silva *et al.* (2005), como devido ao efeito de empacotamento proporcionado pelas partículas finas, que ocupam os espaços vazios entre as partículas maiores.

Além da melhoria nas propriedades mecânicas já descritas, Silva *et al.* (2005) também verificaram que a argamassa produzida com maior teor de finos apresentou menor absorção de água, menor índice de vazios, maiores densidade de massa aparente e massa específica, menor permeabilidade à água, maior resistência de aderência à tração. O único fator negativo apontado pelos autores foi que, a argamassa com maior teor de finos apresentou maior incidência de fissuras visíveis. Porém não foi comentado sobre as razões para o aparecimento de fissuras.

Benachour *et al.* (2008) desenvolveram um estudo cujo objetivo foi verificar a quantidade de fíler que poderia ser adicionada aos materiais cimentícios, sem que houvesse perda de desempenho (relacionado com as propriedades microestruturais, mecânica e de durabilidade). Na pesquisa foram formuladas argamassas com várias quantidades de fíler calcário, estas variando entre 15 e 45%, em relação à massa de areia.

Como o índice de consistência das argamassas foi fixado, os autores verificaram que a relação a/c variou, de modo que houve uma diminuição para a argamassa com 15% de fíler calcário e um aumento para as argamassas com teores de fíler mais elevadas. Este comportamento, segundo Benachour *et al.* (2008), é consequência de dois efeitos opostos e concomitantes: em um, a água foi adsorvida na superfície das partículas de fíler, e como a área específica do fíler é maior do que a da areia, a demanda de água aumenta devido ao fenômeno da adsorção. No outro, as partículas de fíler preenchem os espaços vazios de modo que a água tenha menos espaço de poro disponível. No geral, a quantidade de água livre diminui enquanto que a quantidade de água adsorvida aumenta.

No que se refere ao desempenho mecânico das argamassas produzidas por Benachour *et al.* (2008), tanto de resistência à compressão, quanto de resistência à flexão, verificou-se que houve uma melhoria com o aumento do teor de fíler, ou que os resultados apresentaram-se equivalentes ao da resistência da argamassa de referência. Os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos para os teores de fíler entre 0 e 25%. Os autores justificaram este comportamento como sendo devido ao efeito de preenchimento de vazios e à densificação da pasta de cimento proporcionado pelo fíler. Este efeito foi comprovado através

das imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura, cujas micrografias estão ilustradas nas Figuras 12a e 12b.

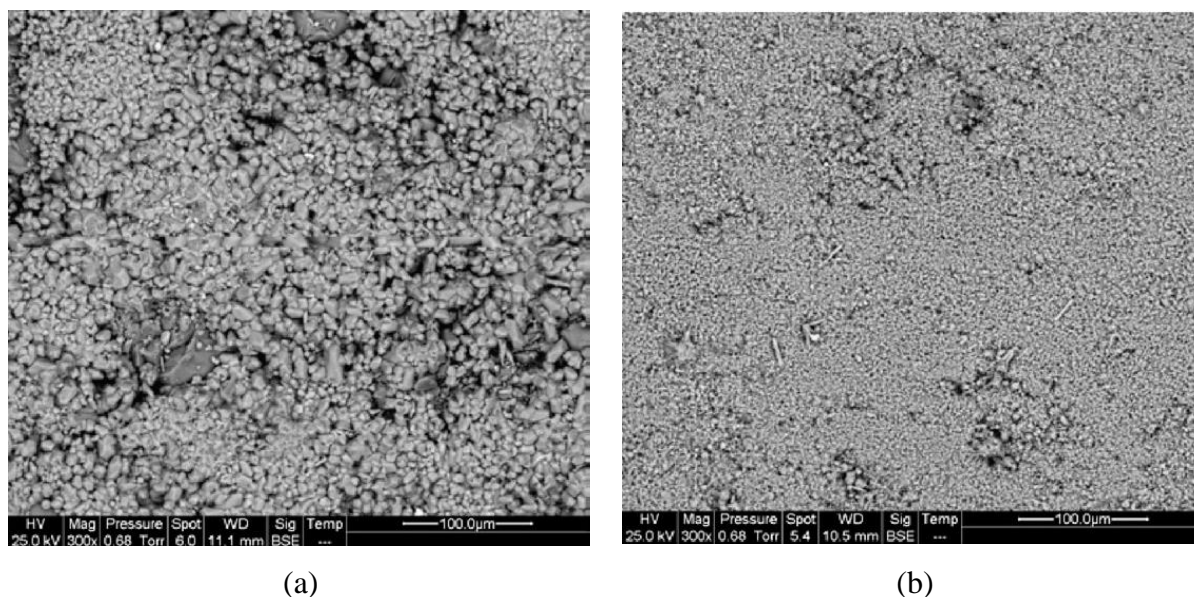


Figura 12 - Micrografias das argamassas: a) com 15% de fíler calcário e b) com 45% de fíler calcário (Fonte: BENACHOUR *et al.*, 2008)

Analisando as imagens das Figuras 12a e 12b, Benachour *et al.* (2008) verificaram que a adição de fíler calcário proporcionou o refinamento da estrutura de poros das argamassas estudadas. A argamassa com 45% de fíler calcário apresentou uma estrutura de poros mais fina quando comparado à argamassa com 15% de fíler.

Corinaldesi *et al.* (2010) verificaram o efeito da substituição de 10% do agregado natural, por resíduo de serragem de mármore. O resíduo de mármore utilizado apresentava uma finura *Blaine* de  $1500\text{m}^2/\text{kg}$ , com cerca de 90% das partículas com tamanhos inferiores a  $50\mu\text{m}$ . O traço empregado foi 1:3 (cimento: agregado), em massa. Os autores mantiveram fixo o índice de consistência das argamassas, o que implicou na variação da relação a/c. Algumas argamassas requereram aditivo superplastificante, cujo teor foi 0,5%, em relação à massa do cimento. Foi avaliada a resistência à compressão das argamassas produzidas, cujos resultados encontram-se ilustrados nas Figuras 13a e 13b.

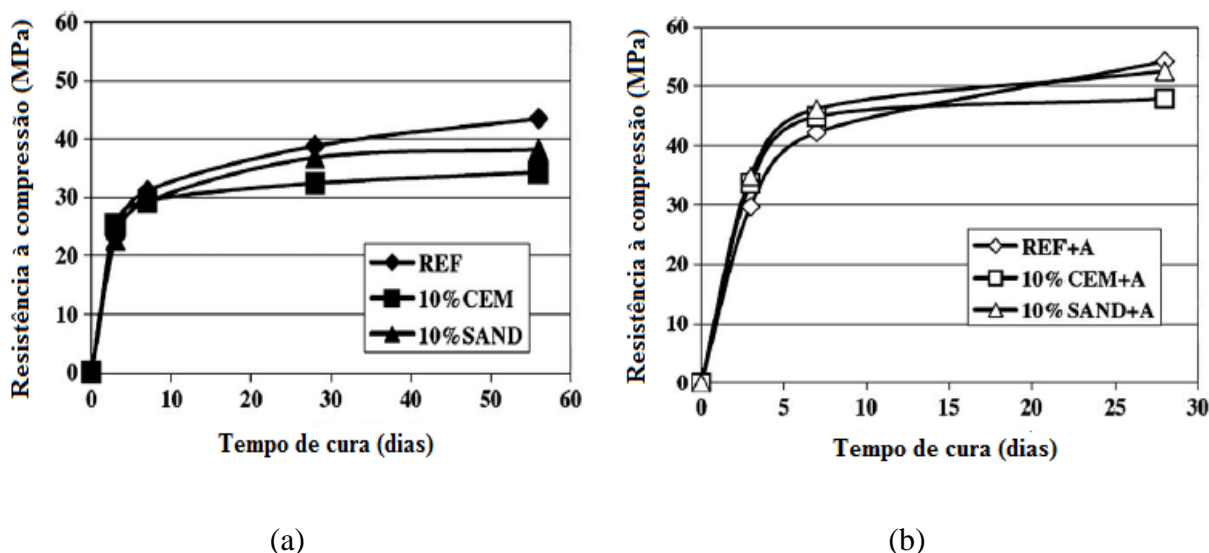


Figura 13– Resistência à compressão das argmassas: (a) sem aditivo e (b) com aditivo superplastificante (Fonte: CORINALDESI *et al.*, 2010)

De acordo com Corinaldesi *et al.* (2010), observando-se os resultados apresentados para a resistência à compressão, a utilização do resíduo de mármore como agregado miúdo foi compatível apenas para a argmassa com aditivo, cujo valor de resistência à compressão demonstrou-se equivalente à argmassa de referência. O mesmo comportamento não foi apresentado pela argmassa sem aditivo, cujo valor de resistência à compressão foi um pouco inferior.

Al-Akhras *et al.* (2010) estudaram o comportamento de argmassas com adição de resíduo de rocha calcária submetido a um processo de queima a 700°C. Inicialmente o objetivo do trabalho foi analisar como a substituição da areia pelo resíduo influenciava as propriedades das argmassas produzidas. Os teores de substituição foram 5, 10 e 15% e a relação a/c foi fixada em 0,7. Também foi investigada a influência de dois tipos de cura (cura úmida e cura por autoclave) nas propriedades das argmassas produzidas. O índice de consistência foi avaliado através da mesa de consistência. Os resultados estão ilustrados na Tabela 7

Tabela 7 - Índice de consistência das argmassas produzidas por Al-Akhras *et al.* (2010)

Teor de resíduo (%)	Índice de consistência (mm)
0	125
5	119
10	114
15	105

Fonte: AL-AKHRAS *et al.*, (2010)

Com base nos resultados, Al-Akhras *et al.*(2010) verificaram que a trabalhabilidade das argamassas diminui com o aumento do teor de resíduo na mistura. Observa-se que para o teor de 15% de resíduo, o índice de consistência apresentou-se 16% inferior ao valor de referência. Este comportamento é explicado pelos autores como devido à elevada área específica do resíduo, quando comparado com a da areia utilizada.

No que se refere à resistência à compressão, no estudo de Al-Akhras *et al.* (2010), a substituição parcial da areia pelo resíduo de rocha calcinado, para todos os teores estudados (5, 10 e 15%), influenciou positivamente os resultados. De acordo com os autores, o aumento na resistência à compressão proporcionado pelo resíduo chegou a ser de 42%, quando a cura dos corpos de prova foi realizada em autoclave. Nesse estudo os autores não discutiram uma possível influência da queima do resíduo nos resultados. Não ficou demonstrado, portanto, se a queima do resíduo proporcionou algum efeito químico nas misturas. Logo, não se pode afirmar se o mecanismo de ação do resíduo foi apenas físico (fíler) ou físico e químico.

Freitas e Costa (2010) estudaram a influência de agregados provenientes da britagem de rocha calcária, como substituição parcial da areia natural, em argamassas mistas para revestimento. O objetivo da pesquisa foi a avaliação dos efeitos da distribuição granulométrica deste tipo de agregado nas propriedades das argamassas mistas. Foram avaliados cinco tipos de agregados, um de origem aluvionar e outras quatro artificiais, provenientes da britagem de rocha calcária, cujo teor de finos é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Teor de finos das areias estudadas por Freitas e Costa (2010)

<b>Tipo de areia</b>	<b>Teor de finos(%)</b>
N- Natural Aluvionar	9
C1 – Calcário Calcítico	24
C2 – Calcário Calcítico	15
M – Calcário Migmatítico	24
D – Calcário Dolomítico	31

Fonte: FREITAS; COSTA (2010)

De acordo com os resultados, Freitas e Costa (2010) verificaram que os agregados de britagem de rochas apresentaram um elevado teor de fração fina (material passante na peneira 0,075 mm). Principalmente o agregado de britagem de calcário dolomítico (D), que apresentou 31% de finos. Após esta constatação, os autores avaliaram as propriedades das argamassas no estado endurecido, cujos resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades das argamassas estudadas no estado endurecido produzidas por Freitas e Costa (2010)

Argamassas	Densidade de massa ( $\text{kg/m}^3$ ) – CV (%)	Absorção de água imersão (%) – CV (%)	Absorção por capilaridade ( $\text{g/dm.min}^{1/2}$ ) – CV (%)	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Resistência à tração (MPa) – CV (%)
M	1757 (0,60)	15,5 (0,1)	22,2 (2,7)	2,1 (10,8)	0,6 (30,2)
N	1581 (0,60)	16,5 (0,8)	26,6 (5,8)	1,0 (9,5)	0,4 (5,2)
C1	1760 (1,10)	17,7 (0,5)	27,2 (2,2)	2,2 (3,9)	0,7 (21,8)
C2	1762 (0,50)	15,5 (0,3)	23,0 (1,5)	1,8 (4,3)	0,7 (3,0)
D	1780 (0,40)	17,1 (0,4)	31,9 (0,5)	1,6 (3,9)	0,6 (14,0)

Fonte: FREITAS; COSTA (2010)

M – Calcário Migmatítico, N - Natural Aluvionar, C1 – Calcário Calcítico, C2 – Calcário Calcítico, D – Calcário Dolomítico.

Com base nos resultados obtidos, Freitas e Costa (2010) tentaram estabelecer uma correlação entre as propriedades avaliadas e o teor de finos dos agregados utilizados. Um parâmetro adotado pelos autores foi a densidade de massa, cujo incremento foi relacionado diretamente ao teor de finos dos agregados utilizados. Porém, verifica-se que esta relação não pode ser realizada, pois, a argamassa produzida com agregado de rocha calcária, de origem dolomítica, que possui o maior teor de finos (31%), e maior densidade de massa, não apresentou o maior valor de resistência à compressão.

Silva *et al.* (2011) verificaram a possibilidade de utilização de agregado proveniente da britagem de rocha calcária, em substituição à areia natural, para produção de argamassas. Foi utilizado cimento Portland CPII-Z 32, cal hidratada CH III, areia natural e agregado artificial obtido através da britagem de rocha calcária calcítica. O agregado proveniente da britagem de rocha calcária britada apresentava um teor de finos cerca de 5% superior quando comparado à areia natural.

Foram produzidas por Silva *et al.* (2011), duas argamassas, uma com 100% da areia natural e outra com 100% de agregado proveniente da rocha calcária britada. Os autores verificaram melhoria das propriedades mecânicas da argamassa produzida com agregado artificial (proveniente da rocha calcária britada). Porém, a argamassa com agregado artificial apresentou maior índice de fissuração, o que foi considerado pelos autores, como fator crítico. A Figura 14 apresenta o tempo médio de ocorrência da primeira fissura, o comprimento e a área total das fissuras observadas nas argamassas produzidas.



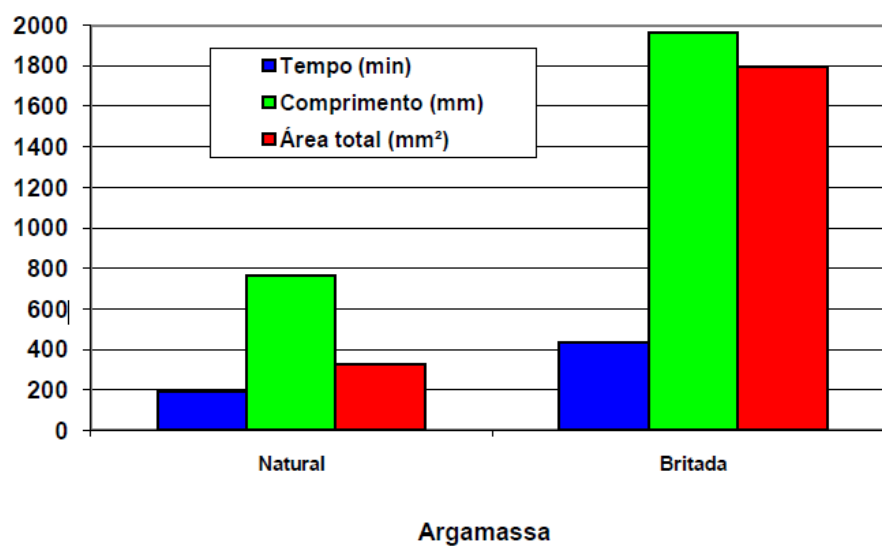


Figura 14 - Tempo médio de ocorrência da primeira fissura, comprimento e área total das mesmas nos revestimentos de argamassa produzidos com areia natural e areia britada (Fonte: SILVA *et al.*, 2011)

De acordo com Silva *et al.* (2011), a ocorrência de maior quantidade de fissuras nos revestimentos da argamassa produzida com areia de britagem de rocha calcária pode ser explicada da seguinte forma: as argamassas com areia britada exigem maior quantidade de pasta para obter a mesma consistência, somado ao fato de apresentarem maior teor de finos, o que conduziu ao refinamento dos poros, com a possível redução de capilares, o que proporciona uma maior tensão capilar. Devido a maior quantidade de pasta, melhor empacotamento da areia britada e menor consumo de água, há um aumento da densidade de massa no estado endurecido, aumento das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade.

Sales *et al.* (2014) analisaram o efeito da substituição parcial do agregado natural pelo resíduo de corte de mármore, em argamassas para assentamento e revestimento de alvenarias. No referido estudo foram produzidas seis misturas, com teores de substituição de 0, 20 e 40%, em dois diferentes traços de argamassas: 1:1:6 e 1:2:9, em volume, fixando-se a relação entre aglomerantes e agregados. Relações água/aglomerantes foram obtidas para que atendessem a faixa de consistência de  $250 \pm 20$  mm. A areia utilizada possuía módulo de finura de 1,69 e o resíduo de mármore módulo de finura de 0,36. Os resultados dos ensaios de consistência estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Espalhamento e relação a/c das argamassas do estudo de Sales *et al.* (2014)

Argamassa	Espalhamento (mm)	Relação a/c
A6P00	270	1,05
A6P20	240	0,88
A6P40	260	0,94
A9P00	260	1,03
A9P20	250	0,95
A9P40	260	0,99

Fonte: SALES *et al.*, (2014)

Nota: A6P00 – Traço 1:1:6 e 0% de resíduo; A6P20 - Traço 1:1:6 e 20% de resíduo; A6P40 - Traço 1:1:6 e 40% de resíduo; A9P00 - Traço 1:1:9 e 0% de resíduo; A9P20 - Traço 1:1:9 e 20% de resíduo; A9P40 - Traço 1:1:9 e 40% de resíduo

Com base nos resultados da Tabela 10 e no aspecto das argamassas, Sales *et al.*, (2014) comentam que a substituição de areia por resíduo implicou na redução da relação a/c e numa argamassa com melhor mobilidade e coesão. As Figuras 15a e 15b mostram as diferenças de aspecto entre a argamassa, de traço 1:1:6, sem resíduo (referência) e com 40% de resíduo substituindo a areia.



(a)



(b)

Figura 15 - Aspecto da argamassa com traço 1:1:6: (a) sem resíduo (b) com 40% de resíduo (Fonte: SALES *et al.*, 2014).

Nota-se que a argamassa com resíduo (Figura 15b), transparece ser mais coesa que a argamassa sem resíduo (Figura 15a).

Além das propriedades no estado fresco, Sales *et al.* (2014) avaliaram o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão, cujos resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistência à compressão axial das argamassas produzidas por Sales *et al.* (2014)

Argamassa	Resistência à compressão (Mpa) – CV (%)
A6P00	5,86 (7,42)
A6P20	6,44 (10,50)
A6P40	3,86 (8,70)
A9P00	3,01 (5,82)
A9P20	2,89 (5,94)
A9P40	2,16 (5,95)

Fonte: SALES *et al.*, (2014)

Nota: A6P00 – Traço 1:1:6 e 0% de resíduo; A6P20 - Traço 1:1:6 e 20% de resíduo; A6P40 - Traço 1:1:6 e 40% de resíduo; A9P00 - Traço 1:1:9 e 0% de resíduo; A9P20 - Traço 1:1:9 e 20% de resíduo; A9P40 - Traço 1:1:9 e 40% de resíduo

De acordo com os resultados do estudo, Sales *et al.* (2014) verificaram que as argamassas com resíduo de mármore apresentaram menores valores de resistência à compressão, quando comparadas à argamassa sem resíduo, com exceção da argamassa com 20% de resíduo, com o traço 1:1:6. Os autores não explicaram este comportamento. Observa-se que as argamassas do traço 1:1:6 apresentaram um elevado coeficiente de variação.

No que se refere à absorção de água das argamassas produzidas no trabalho desenvolvido por Sales *et al.*(2014), os resultados estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Absorção de água para as argamassas produzidas por Sales *et al.* (2014)

Argamassa	Absorção de água por imersão (%)
A6P00	16,6
A6P20	16,54
A6P40	18,18
A9P00	17,37
A9P20	16,87
A9P40	19,05

Fonte: SALES *et al.*, (2014)

Nota: A6P00 – Traço 1:1:6 e 0% de resíduo; A6P20 - Traço 1:1:6 e 20% de resíduo; A6P40 - Traço 1:1:6 e 40% de resíduo; A9P00 - Traço 1:1:9 e 0% de resíduo; A9P20 - Traço 1:1:9 e 20% de resíduo; A9P40 - Traço 1:1:9 e 40% de resíduo

Sales *et al.* (2014) comentam que para o traço 1:2:9 houve uma pequena redução na absorção das argamassas com 20% de resíduo, em relação à argamassa de referência. Entretanto, para o traço 1:1:6 não houve diferença entre as absorções da argamassa de referência e a argamassa com 20% de resíduo. Porém as argamassas com 40% de resíduo apresentaram aumento significativo da absorção, para ambos os traços. O aumento chegou a

9,8%, para argamassa de traço 1:2:9. Sales *et al.* (2014) explicaram que para as argamassas com 20% de resíduo ocorreu uma obturação dos poros pelo resíduo utilizado. No entanto, o teor de 40% de resíduo proporcionou a formação de mais vazios na argamassa.

Kelestemur *et al.* (2014) investigaram a utilização de resíduo de mármore, na forma de pó, e de fibra de vidro, contra os efeitos nocivos do gelo e degelo, em argamassas de cimento. Para atingir esta finalidade produziram corpos de prova de argamassa contendo resíduo de mármore, em substituição à areia, nos teores de 0, 20, 40 e 50%, em volume. As quantidades de fibra de vidro foram: 0,25kg/m<sup>3</sup>, 0,50kg/m<sup>3</sup> e 0,75kg/m<sup>3</sup>. Foi mantida a relação a/c constante e utilizado 1% de superplastificante, em relação ao peso do cimento. De acordo com os autores, os resultados da resistência à compressão para as argamassas produzidas com fibra de vidro não foram satisfatórios, apesar de ter melhorado o comportamento quanto à flexão. Porém, as argamassas produzidas apenas com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de pó de mármore apresentaram resistências à compressão superiores, para todos os teores de substituição estudados. O melhor comportamento quanto à resistência à compressão foi obtido pela argamassa com 20% de resíduo, cujo valor de resistência foi cerca de 8% superior à argamassa de referência. Kelestemur *et al.* (2014) atribuíram este resultado ao fato do resíduo de mármore possuir uma granulometria menor que a da areia utilizada, o que favoreceu a um melhor preenchimento de vazios na matriz cimentícia.

Jeyaprabha *et al.* (2016) avaliaram o efeito de temperaturas elevadas e também o efeito do processo de extinção do fogo por resfriamento em argamassas contendo resíduo de serragem de granito na forma de pó e areia artificial, ambos em substituição à areia de rio. Para isto foram produzidas três misturas, sendo uma de referência (RSM), uma contendo 15% de resíduo de serragem de granito, em substituição à areia natural (G15M), e outra com a areia artificial substituindo totalmente a areia natural (MSM).

As misturas produzidas por Jeyaprabha *et al.* (2016) foram submetidas a diversos ensaios, porém, pelo fato da influência da temperatura não ser objetivo da presente pesquisa, serão aqui demonstrados apenas os resultados de resistência à compressão, aos 3, 7, 14 e 28 dias, das argamassas produzidas. Estes estão ilustrados na Figura 16.

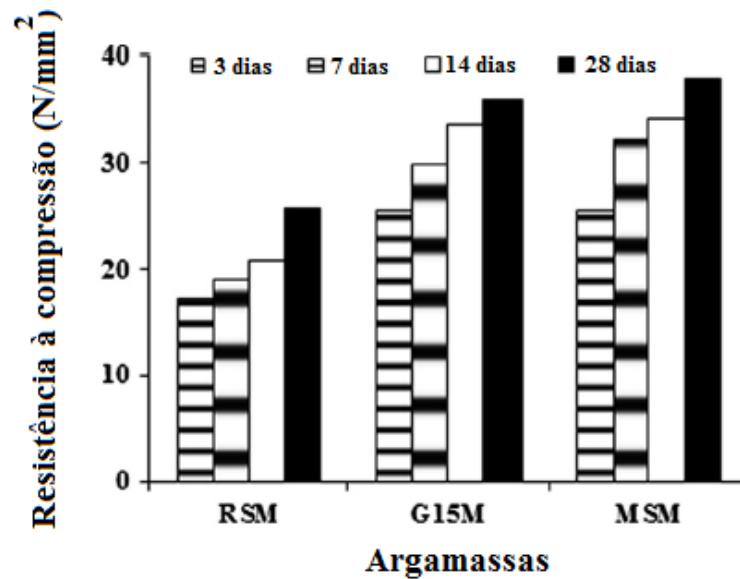


Figura 16 - Resistência à compressão de argamassas (Fonte: JEYAPRABHA *et al.*, 2016)

Com base nos resultados ilustrados pela Figura 16, os autores observaram que as argamassas contendo resíduo de granito (G15M) e areia artificial (MSM) apresentaram um aumento apreciável na resistência à compressão, para todos os períodos de cura, quando comparados com a argamassa de referência (RSM). O aumento da resistência à compressão para a argamassa contendo resíduo de granito, em comparação com a argamassa de referência, para o período de cura de 3, 7, 14 e 28 dias é de 48%, 57%, 61% e 43%, respectivamente. Jeyaprabha *et al.* (2016) atribuíram este incremento na resistência à compressão ao melhor efeito de preenchimento proporcionado pelo resíduo de granito, devido a sua elevada finura.

Com base nos estudos apresentados, pode-se concluir que é possível a substituição parcial do agregado natural, pelos resíduos de rochas ornamentais e pelo resíduo da britagem de rocha calcária, em argamassas. Os teores de substituição variam entre 10 a 25%, em massa do agregado, e são dependentes da granulometria dos materiais secos que irão compor a argamassa. O incremento proporcionado pelo resíduo nas propriedades avaliadas se deve ao efeito fíler proporcionado pelo alto teor de finos presente no resíduo. Assim, segundo os autores, ocorre um melhor empacotamento dos grãos dos componentes das misturas cimentícias, além de proporcionar o refinamento da estrutura de poros decorrente do efeito de nucleação.

#### 4. APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI (RSPC)

Neste capítulo serão apresentados os resultados de trabalhos realizados, nos quais se utilizou resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) em matrizes cimentícias e em outras aplicações diversas.

##### 4.1 APLICAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Com base em levantamento bibliográfico, verifica-se que até o ano de 2016 foram realizados alguns estudos no intuito de verificar a viabilidade da utilização do RSPC em compostos à base de cimento, como é o caso dos trabalhos desenvolvidos por Silva (2008), Guimarães e Moura (2013), Moura *et al.* (2013), Guimarães (2013), Bastos (2014), Queiroz *et al.* (2014), Galvão *et al.* (2016) e Mercês e Moura (2016).

Silva (2008) pesquisou a possibilidade de utilização do RSPC na formulação de argamassas. O resíduo foi utilizado em substituição ao cimento e ao agregado miúdo natural, ambos nos teores de 5, 10, 15, 20 e 25%, em massa. O resíduo utilizado possuía granulometria superior a 0,296 mm, tendo sido descartado a fração com dimensão inferior. O traço de argamassa utilizado foi 1:3 e a relação a/c foi mantida constante, sendo seu valor 0,6. As argamassas produzidas foram ensaiadas quanto à resistência à compressão. A Tabela 13 ilustra os resultados obtidos para as argamassas em que o cimento foi substituído pelo RSPC.

Tabela 13 - Resistência à compressão das argamassas desenvolvidas por Silva (2008): RSPC em substituição ao 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)

Com base nos resultados obtidos, pode-se verificar que as argamassas com RSPC apresentaram menor resistência à compressão do que a argamassa de referência, para todos os teores estudados. Observa-se ainda, que dentre as argamassas com o resíduo, as que apresentaram maior resistência à compressão foram as de teores de substituição de 15 e 20%.

O autor atribuiu o comportamento apresentado pelas argamassas à atividade pozolânica proporcionada pelo resíduo. No entanto, não há coerência desta observação, uma vez que não foi realizado o ensaio de pozolanicidade do resíduo. Além disto, as argamassas com 15 e 20% de resíduo apresentaram resistência à compressão 22 e 27% menor, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

No que se refere à substituição do agregado natural pelo RSPC, os resultados do estudo de Silva (2008) estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resistência à compressão das argamassas desenvolvidas por Silva (2008): RSPC em substituição ao 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)

Com base nos resultados obtidos, o autor conclui que a substituição do agregado natural pelo RSPC proporcionou redução na resistência à compressão das argamassas, para todos os teores de substituição estudados. Pode-se observar incoerência entre os resultados, uma vez que: a argamassa com 20% de resíduo apresentou resistência à compressão aos 7 dias de cura, superior à resistência aos 14 e 28 dias; a argamassa com 25% de resíduo apresentou resistência aos 7 dias de cura, superior à resistência aos 14 dias; as argamassas de referência, e as argamassas com 10, 15 e 20% apresentaram resistência à compressão aos 14 dias superior aos 28 dias. O autor não fez referência às incoerências citadas.

Guimarães e Moura (2013) verificaram a influência da adição do RSPC na alcalinidade de pasta de cimento Portland. Os autores concluíram que a adição de RSPC aumentou o pH da mistura à base de cimento Portland. Assim, o RSPC pode compensar a redução de alcalinidade promovida pelas adições pozolânicas.

Moura *et al.* (2013), avaliando a possibilidade do uso do RSPC em concretos convencionais, analisaram a atividade pozolânica deste resíduo, de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 1992). O índice de pozolanicidade obtido para o ensaio realizado foi de 56%, o que levou os autores a concluírem que o material não é pozolânico. Também foram realizados ensaios complementares, como análise química e difração de raios X. A análise química,

determinada através de espectroscopia de raios X por dispersão em energia - EDX, demonstrou que o resíduo é composto basicamente por óxido de cálcio, com mais de 95% deste constituinte em sua composição. A Figura 17 ilustra o difratograma de raio-X obtido para o RSPC.

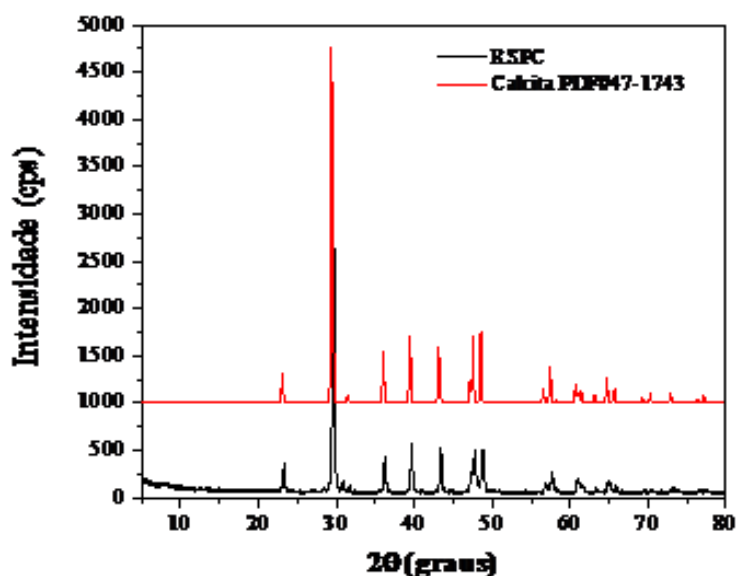


Figura 17 - Difratograma de raio-X obtido do RSPC (Fonte: MOURA *et al.*, 2013).

Moura *et al.* (2013), através do difratograma verificaram que o resíduo é tipicamente cristalino. Os picos identificados no RSPC são característicos da calcita. Portanto, complementando o resultado da análise química, o óxido de cálcio presente no RSPC está sob a forma de calcita.

Guimarães (2013), em sua pesquisa de mestrado, avaliou o desempenho de blocos de vedação produzidos com o RSPC. O resíduo entrou na composição dos blocos, tanto em substituição ao cimento quanto em substituição ao agregado miúdo (finos de britagem). Para avaliar o efeito da substituição do cimento Portland na fabricação dos blocos, o RSPC foi submetido a um processo de destorroamento para conferir ao mesmo a granulometria adequada para a substituição do cimento. O diâmetro médio do RSPC foi de 57  $\mu\text{m}$ . O traço adotado foi o de 1:15 (aglomerante: finos de britagem), em massa, os teores de substituição empregados foram de 10 e 15%, em relação à massa de cimento. A relação água/aglomerante foi fixada em 1,34. As propriedades avaliadas no referido estudo foram a resistência à compressão e a absorção de água dos blocos produzidos. Os resultados de resistência à compressão dos blocos produzidos estão apresentados na Tabela 15.



Tabela 15 – Resistência à compressão dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC em substituição ao cimento

Teor de RSPC	Resistência à compressão (MPa) ± Desv. Pad. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
0	3,1±0,7 (22,0)	3,1±0,7 (23,4)
10	2,7±0,6 (21,3)	3,0±0,5 (17,4)
15	2,9±0,2 (6,6)	2,9±0,5 (16,3)

Fonte: GUIMARÃES (2013).

Guimarães (2013) verificou que os resultados de resistência à compressão, tanto individuais quanto médios, atenderam a NBR 7173 (ABNT, 1982). O autor também realizou tratamento estatístico dos dados através da ANOVA e verificou que a substituição do cimento pelo RSPC não influenciou significativamente a resistência à compressão dos blocos produzidos. O autor, atribuiu este comportamento ao fato da distribuição granulométrica do RSPC ter favorecido a nucleação e o empacotamento das partículas, sendo preponderantes em relação ao efeito cimentante proporcionado pelo aglomerante. Vale salientar que o coeficiente de variação apresentado pelos resultados foi muito alto, o que diminui a confiabilidade da análise estatística realizada por Guimarães (2013).

Os resultados da absorção de água dos blocos, com o RSPC em substituição ao cimento estudados por Guimarães (2013) constam na Tabela 16.

Tabela 16 - Absorção de água dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC em substituição ao cimento

	REF	10%RSPC	15%RSPC
Média (%)	10,2	9,1	9,1
Desv. Padrão (%)	0,6	0,6	0,8
Coef. Var. (%)	6,3	6,7	8,3

Fonte: GUIMARÃES (2013).

Observando-se os valores obtidos para absorção de água, Guimarães (2013) verificou que os resultados obtidos atenderam a norma NBR 7173 (ABNT, 1982), e, ainda enfatizou que os blocos contendo 10 e 15% de RSPC em substituição ao cimento tiveram a absorção de água reduzida em até 10,8%. Tal comportamento foi explicado pelo autor, como sendo decorrente do efeito do empacotamento, favorecido pela granulometria do RSPC, que é bem mais fino do que o cimento utilizado.

No que se refere a etapa do estudo de Guimarães (2013) em que o RSPC foi utilizado em substituição aos finos de britagem, o resíduo foi destorroado em britador de mandíbulas,

com posterior peneiramento em peneira malha 2,4mm. Foi utilizado o material passante nesta peneira. O traço foi 1:15 (cimento : agregados), em massa. A quantidade, em massa, dos materiais utilizados, por traço, para a produção dos blocos está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Quantidade de materiais utilizados para a produção dos blocos produzidos por Guimarães (2013): RSPC substituindo os finos de britagem

	Quantidade de materiais utilizados (Kg)		
	REF	10%RSPC	20%RSPC
Cimento	20	20	20
Água	26,7	32	34
Finos de Britagem	300	270	240
RSPC britado e passante na peneira 2,4mm	0	30	60
Relação a/c	1,34	1,60	1,70

Fonte: GUIMARÃES (2013).

Observando os dados da Tabela 17 verifica-se que a utilização do RSPC implicou no aumento da relação a/c das misturas. Segundo Guimarães (2013), foi feita tentativa de moldar os blocos com a mesma relação a/c dos blocos de referência. Porém, a mistura com RSPC apresentou-se bastante seca, o que inviabilizou a moldagem dos blocos. Pode-se justificar este fato, uma vez que, o resíduo é mais fino do que os finos de britagem, o que implicou em maior demanda de água.

As Figuras 18a e 18b ilustram, respectivamente, os resultados obtidos para resistência à compressão e absorção de água dos blocos produzidos no estudo de Guimarães (2013). Nesta etapa, o RSPC substituiu parcialmente os finos de britagem.

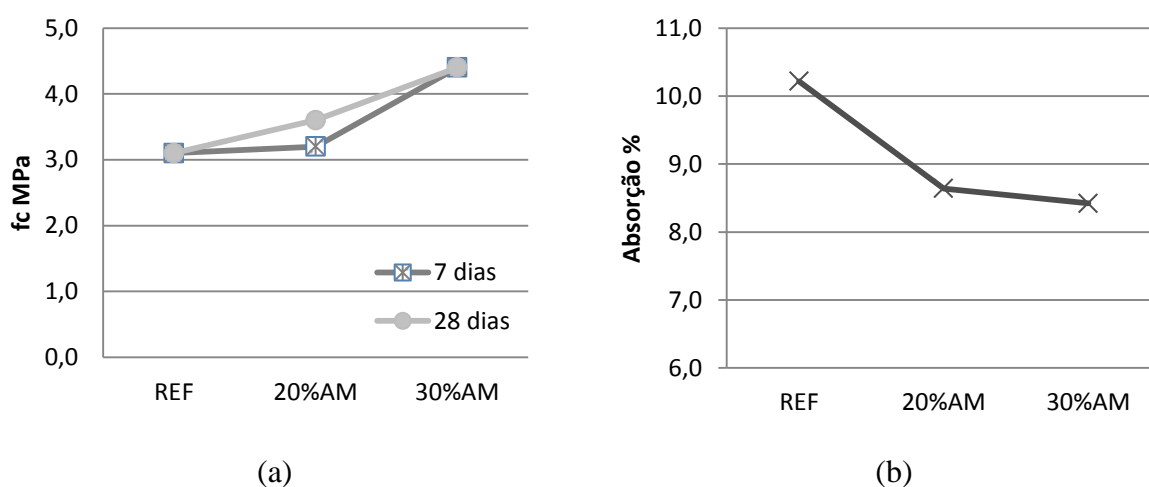


Figura 18—Curva de comportamento dos blocos: (a) resistência à compressão;(b) absorção de água (Fonte: GUIMARÃES, 2013).

Com base nos resultados obtidos, Guimarães (2013) concluiu que a utilização do RSPC, como substituição parcial do agregado miúdo (finos de britagem), proporcionou um aumento significativo na resistência à compressão dos blocos para todos os teores estudados. O aumento da resistência, aos 28 dias, chegou a 42%, em relação aos blocos de referência. Já para a absorção de água, o incremento da substituição dos finos de britagem pelo RSPC chegou a reduzir em 18% a absorção, isto em relação aos blocos de referência. Desta forma o autor conclui que é possível a utilização de até 20% de RSPC em substituição aos finos de britagem para a produção de blocos.

Bastos (2014) avaliou a viabilidade do uso de RSPC como substituição parcial do cimento na produção de concretos convencionais. Os teores de substituição de cimento por RSPC foram de 10 e 20%, em massa. Foram produzidos concretos com relações água/aglomerante de 0,45; 0,55; 0,65. Um dos parâmetros avaliados para verificar a influência da substituição foi a resistência à compressão axial dos concretos produzidos. As Figuras 19a e 19b ilustram os resultados obtidos para a resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, respectivamente.

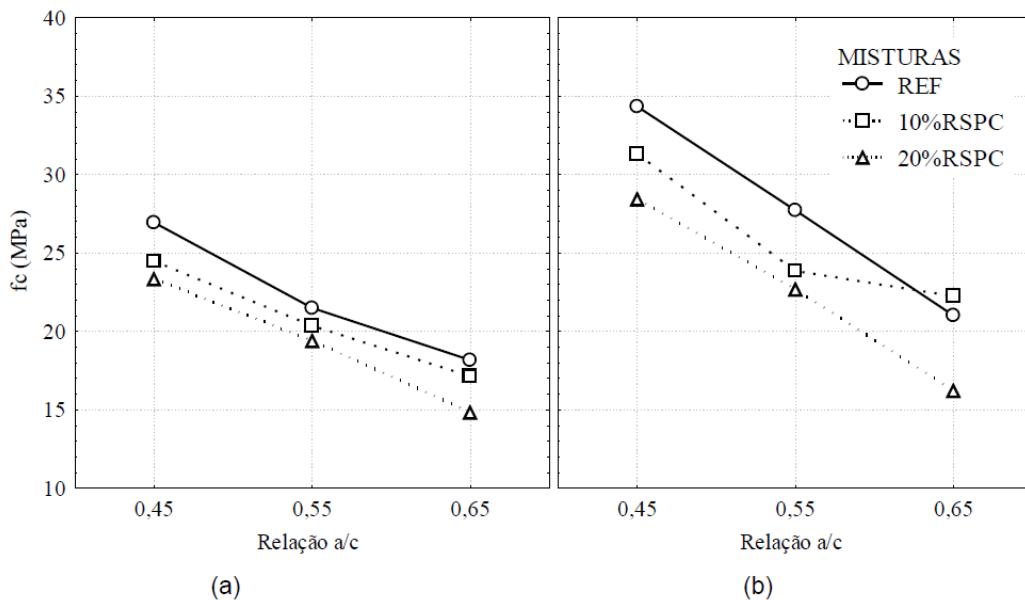


Figura 19 - Resultados obtidos para a resistência à compressão axial: a) aos 7 dias; b) aos 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014).

Com base nos resultados obtidos o autor observou que os concretos com resíduo apresentaram comportamento inferior ao concreto de referência. O autor explicou que a substituição do cimento pelo RSPC, implicou na perda do poder cimentante da mistura, que

não foi compensada pelo efeito fíler, proporcionado pelo resíduo. Este comportamento não foi observado quando analisados os resultados dos parâmetros de durabilidade avaliados. A Figura 20 ilustra o resultado de absorção por sucção capilar.

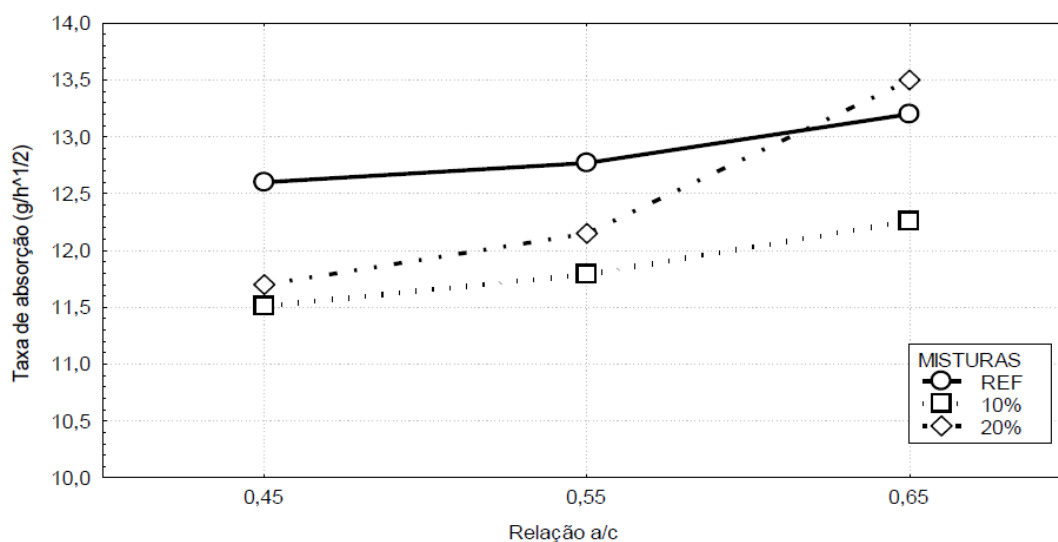


Figura 20 - Absorção por sucção capilar (Fonte: BASTOS, 2014)

Observando-se os resultados obtidos, verifica-se que os concretos com o resíduo apresentaram taxas de absorção por sucção capilar menores, quando comparadas ao concreto de referência. O melhor comportamento, quanto à taxa de absorção, foi o do concreto com 10% de RSPC. Bastos (2014) atribuiu o melhor comportamento dos concretos com RSPC ao possível efeito de preenchimento proporcionado pelo resíduo, reduzindo a formação de capilares.

Galvão *et al.* (2016) avaliaram a influência do uso do Resíduo de Serragem da Pedra Cariri – RSPC em substituição parcial da areia natural, na produção de argamassas autoadensáveis. Esse estudo fez parte de uma etapa preliminar de uma pesquisa mais ampla para posterior aplicação em concretos autoadensáveis – CAA.

No estudo em questão os autores utilizaram cimento CP II Z e dois tipos de agregados naturais, sendo uma areia fina, na proporção de 70% e um areia média na proporção de 30%, em massa. A utilização dos dois tipos de areia foi justificada pela necessidade de obtenção de uma curva granulométrica mais adequada à produção de argamassas autoadensáveis. O RSPC utilizado foi o mesmo empregado por Bastos (2014) em sua pesquisa de mestrado. Também foi empregado um aditivo superplastificante à base de carboxilato, o ADVA<sup>TM</sup> CAST 52, no

teor de 0,5%. A relação a/c foi ajustada conforme a faixa de espalhamento estabelecida, que foi de 200 a 280 mm.

Galvão *et al.*(2016) produziram cinco misturas de argamassas: uma de referência e quatro argamassas com diferentes teores de substituição da mistura das duas areias naturais, por RSPC. Os teores de substituição foram 15, 20, 25 e 30%, em massa. O traço empregado foi o de 1,0:1,4:0,6, em massa, (cimento: areia fina: areia média). As propriedades avaliadas nas argamassas no estado fresco foram o tempo de escoamento no Funil-V e aspecto visual. No estado endurecido foram resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios.

A Tabela 18 ilustra os resultados obtidos para o diâmetro médio de espalhamento e tempo de escoamento das argamassas produzidas.

Tabela 18 - Diâmetro médio de espalhamento das argamassas produzidas por Galvão *et al.* (2016)

Mistura	a/c	Diâmetro médio de espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
REF	0,33	269,5	14,44
15% RSPC	0,31	252,0	23,56
20% RSPC	0,33	238,5	14,53
25% RSPC	0,35	263,5	15,53
30% RSPC	0,37	268,5	14,21

Fonte: GALVÃO *et al.* (2016)

Para o estado fresco, os autores verificaram que, de uma forma geral, a substituição do agregado natural pelo RSPC promoveu uma maior coesão das argamassas autoadensáveis. A argamassa com 15% de RSPC apresentou menor relação água/cimento do que a de referência. O aumento do tempo de escoamento para a mistura com 15% de RSPC foi explicada pelos autores como sendo devido à redução da relação a/c. Por outro lado, as argamassas com 25 e 30% de RSPC apresentaram maior demanda de água para atingirem a faixa de espalhamento estabelecida. Os autores não justificaram este comportamento.

Os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas produzidas por Galvão *et al.* (2016) estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resistências das argamassas produzidas por Galvão *et al.* (2016)

Mistura	Resistência à tração na flexão			Resistência à compressão		
	$F_{t\text{méd}}\text{ (MPa)}$	$S_d\text{ (MPa)}$	$CV\text{ (\%)}$	$F_{c\text{méd}}\text{ (MPa)}$	$S_d\text{ (MPa)}$	$CV\text{ (\%)}$
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)

Os autores verificaram que o incremento da substituição das areias naturais por RSPC acarretou num aumento das resistências das argamassas produzidas, com exceção da resistência à tração na flexão para a mistura com 30% de RSPC. Para a resistência à compressão, esse aumento foi bastante significativo sendo, para todos os teores estudados, 50% superiores ao valor obtido para argamassa referência. Porém, devido ao elevado coeficiente de variação apresentado para a resistência à compressão da argamassa de referência, os autores sugeriram a repetição do ensaio para a argamassa em questão.

Galvão *et al.* (2016) relacionaram as melhorias nas resistências das argamassas ao efeito fíler promovido pelo RSPC, que segundo os autores, é ainda mais acentuado para teores abaixo de 20%. Completando a conclusão, os autores observaram que acima desse teor a quantidade material pulverulento total da mistura aumentou consideravelmente o que elevou a demanda de água das argamassas e afetou diretamente as resistências das mesmas. A demanda de água das argamassas também afetou diretamente a absorção de água e índice de vazios das mesmas. Os resultados para estas propriedades podem ser verificados nas Figuras 21a e 21b.

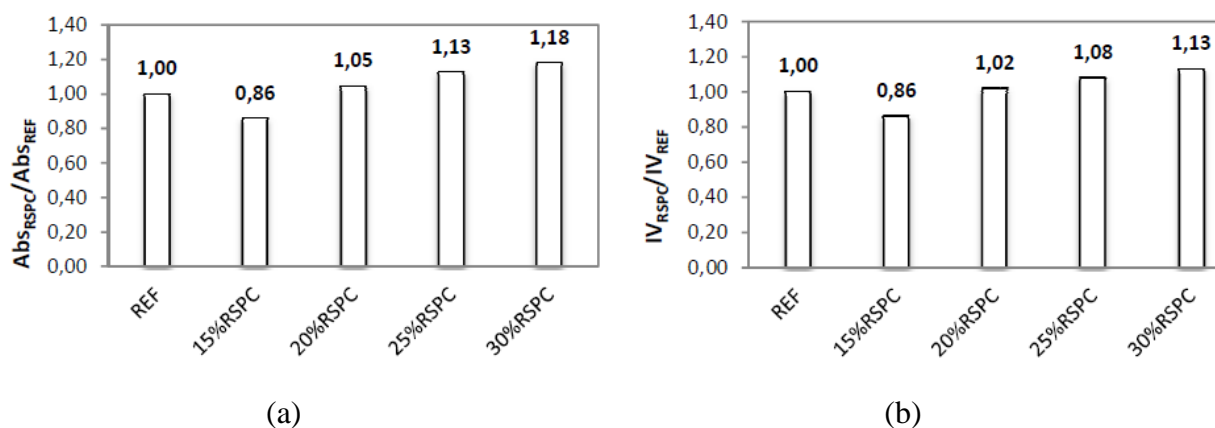


Figura 21– Absorção de água e índice de vazios das argamassas produzidas (Fonte: GALVÃO *et al.*, 2016)

Observando-se os resultados apresentados verifica-se que a mistura com 15% de RSPC foi a que apresentou a menor absorção de água e índice de vazios quando comparados com a argamassa de referência. Além da relação direta de tal comportamento com o menor valor da relação a/c, este também foi correlacionado, por Galvão *et al.* (2016), ao preenchimento de vazios proporcionado pelo RSPC.

Mercês e Moura (2016) realizaram um trabalho no intuito de verificar a possibilidade de utilização do RSPC em substituição ao cimento Portland em argamassas. Neste trabalho foram utilizados cimento Portland de alta resistência inicial (CPV – ARI), areia normal conforme NBR 7214 (ABNT, 2012), areia proveniente do município de Alagoinhas; além do RSPC proveniente da mesma amostra coletada por Bastos (2014). Neste estudo produziram-se três argamassas: uma referência e duas com os teores de substituição de 5 e 10%, em massa. O traço empregado foi de 1:3 (aglomerante: areia), e a relação a/c foi mantida constante em 0,48. Mercês e Moura (2016) avaliaram a pozzolanicidade do resíduo, além da resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios das argamassas produzidas.

O índice de atividade pozzolânica obtido foi de 86%, que se apresentou abaixo dos 90% preconizados pela norma NBR 12653 (ABNT,2014), portanto o resíduo foi classificado como não pozzolânico. Corroborando com ensaios anteriormente realizados por Moura, Leite e Bastos (2013).

Os resultados de resistência à compressão para o estudo desenvolvido por Mercês e Moura (2016) podem ser observados na Figura 22.

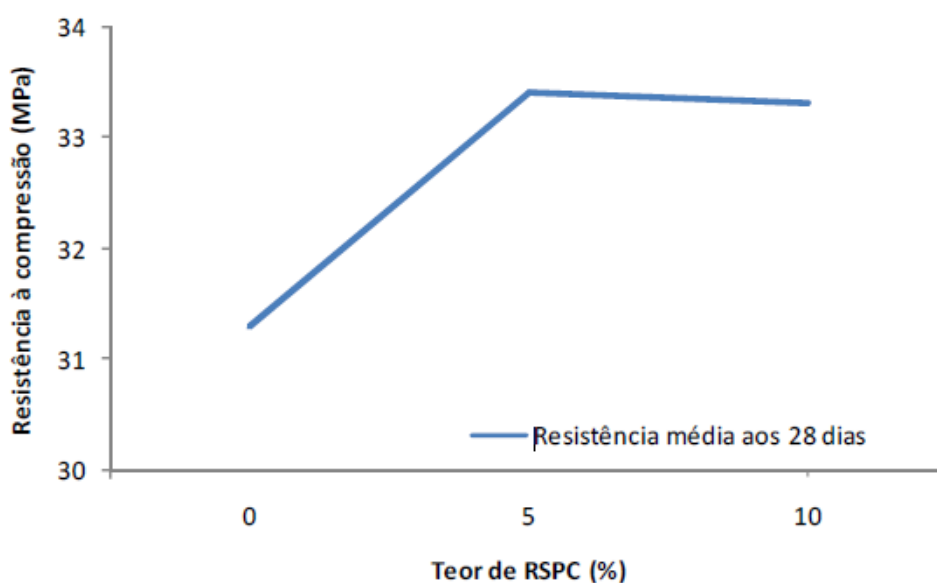


Figura 22 - – Resistência à compressão (Fonte: MERCÊS; MOURA, 2016).

Mercês e Moura (2016) verificaram que houve um aumento na resistência à compressão para todos os teores de substituição estudados, chegando este aumento ser 7% superior ao valor de referência para o teor de substituição de 10%. Como o resíduo não apresentou pozolanicidade, este efeito foi explicado pelos autores como sendo consequência do efeito fíler proporcionado pela RSPC. Porém este efeito não foi verificado quando avaliados os índices físicos de absorção de água e índice de vazios, ambos apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Absorção de água e índice de vazios das argamassas produzidas por Mercês e Moura (2016)

Mistura	Absorção média (%)	Sd (%)	C.V (%)	Índice de Vazios (%)	Sd (%)	C.V (%)
REF	8,63	0,10	1	14,99	0,56	4
ARSPC5	8,68	0,09	1	15,21	0,58	4
ARSPC10	9,01	0,18	2	15,38	0,61	4

Fonte: MERCÊS; MOURA (2016)

Nota: Sd – Desvio padrão; C.V – Coeficiente de variação

Mercês e Moura (2016) verificaram, através de tratamento estatístico dos resultados, que a substituição do cimento Portland pelo RSPC interfere significativamente nos índices físicos avaliados, sendo que para o teor de substituição de 10% o valor de absorção de água foi 4,4% superior à argamassa de referência. Por outro lado, ainda conforme os autores, a absorção de água da argamassa contendo 5% de RSPC apresentou resultado semelhante à argamassa sem resíduo.

Com exceção dos trabalhos desenvolvidos por Silva (2008) e por Bastos (2014), os trabalhos apresentados indicam a viabilidade de utilização do resíduo de serragem de pedra cariri em matrizes cimentícias, principalmente na produção de blocos de vedação e argamassa autoadensável.

#### 4.2 APLICAÇÕES DIVERSAS

Menezes *et al.* (2010) avaliaram a utilização do resíduo de serragem de Pedra Cariri na fabricação de telhas e blocos cerâmicos, em substituição à argila. Dois tipos de resíduos foram utilizados, o amarelo e o cinza, assim denominados pela coloração que apresentavam. O resíduo foi caracterizado através da composição química e mineralógica, por difração de raios



X, análise térmica diferencial, distribuição de tamanho de partículas e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.

A análise granulométrica dos resíduos demonstraram que os mesmos possuíam 100% das partículas com tamanho inferior a 25 $\mu$ m, sendo o tamanho médio de partícula de 4,9 e 6,1 $\mu$ m para o resíduo amarelo e cinza, respectivamente. A elevada finura do resíduo pôde ser ressaltada por Menezes *et al.* (2010) através da microscopia eletrônica de varredura, cujas imagens estão representadas pela Figura 23a e 23b.

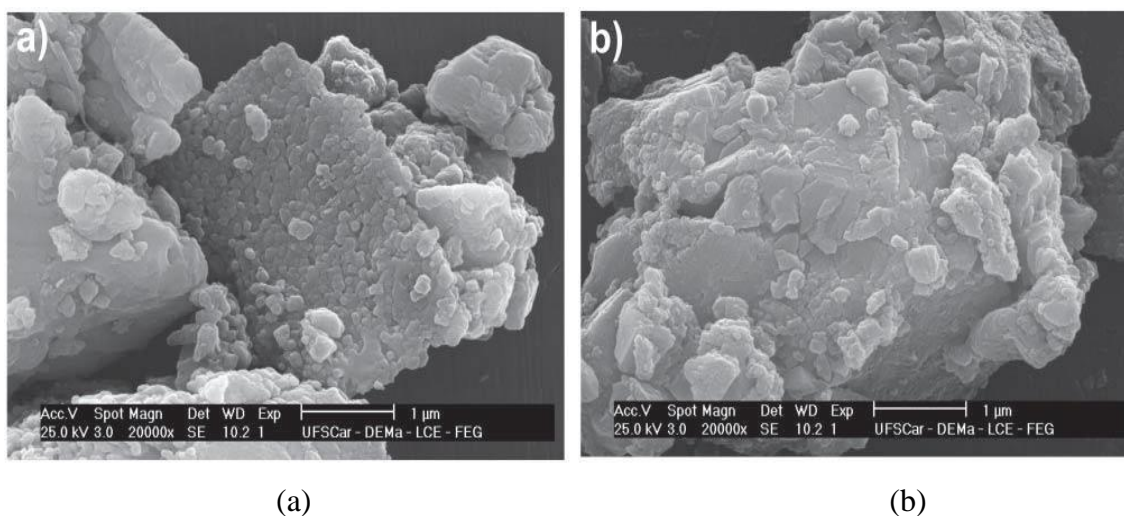


Figura 23 – Micrografia do resíduo de pedra cariri: a) amarelo; b) cinza (Fonte: MENEZES *et al.*, 2010)

Segundo Menezes *et al.* (2010), as amostras do resíduo de pedra Cariri são impregnadas por partículas menores que 1  $\mu$ m. Outra informação importante proveniente das micrografias, e destacada pelos autores, é quanto a forma das partículas de resíduo que é lamelar. Esta observação foi justificada pelos autores como sendo devido à origem geológica da rocha mãe que consistia de sedimentos estratificados.

Os resultados da análise química demonstrados na Tabela 21 mostram que os resíduos são compostos basicamente por óxido de cálcio e que apenas se diferencia pelo fato do resíduo cinza possuir óxido de magnésio em sua composição. Os autores ressaltaram que a presença deste óxido é indicativo da presença de dolomita.

Tabela 21 - Resultados da análise química dos resíduos de pedra cariri analisados por Menezes *et al.* (2010)

Amostras	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	ZnO	ZrO	CuO	PF
Res. Amarelo	53,39	0,85	-	0,66	0,22	0,03	0,09	0,01	43,74
Res. Cinza	51,79	0,57	2,04	1,41	0,34	0,01	0,08	0,01	43,75

Fonte: MENEZES *et al.* (2010)

Apenas com os resultados do ensaio de difração de raios X foi possível identificar que o magnésio presente no resíduo cinza é proveniente da dolomita. A Figura 24 apresenta os difratogramas obtidos para os resíduos amarelo e cinza, respectivamente.

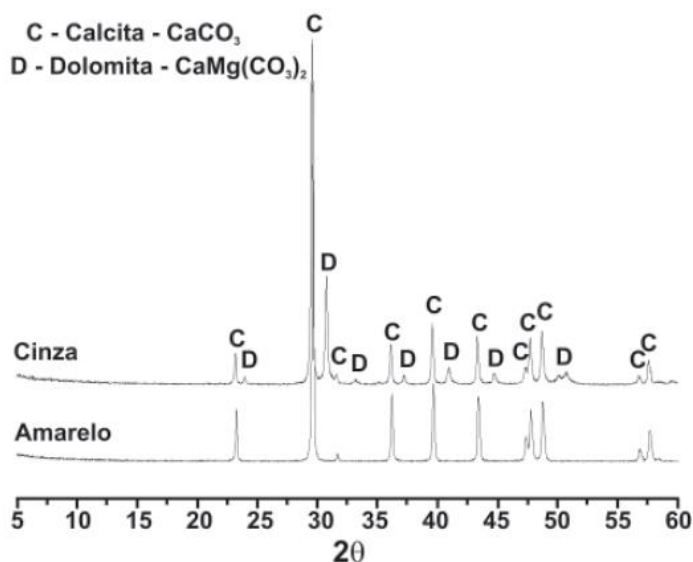


Figura 24 - Difratograma dos resíduos de pedra cariri amarelo e cinza (Fonte: MENEZES *et al.*, 2010)

A partir dos resultados da caracterização do resíduo, foram formuladas composições de misturas para produção de blocos cerâmicos, os teores de resíduos adicionados à argila foram de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Os corpos de prova foram produzidos por prensagem uniaxial e em seguida foram queimados nas temperatura de 900, 950 e 1000°C. Foram determinadas as propriedades de absorção de água e módulo de ruptura à flexão. Com base nos resultados e na bibliografia consultada, os autores concluíram que o resíduo é constituído por calcita e dolomita, e que é possível a incorporação de até 10% de resíduo em formulações para a produção de telhas e blocos cerâmicos.

Arruda e Ribeiro (2012) analisaram as modificações nas propriedades do polipropileno com a incorporação de diferentes resíduos oriundos do corte de rochas calcárias ou mármore, dentre eles o resíduo de Pedra Cariri. Os resíduos utilizados na pesquisa exercem a função de cargas na matriz polimérica. De acordo com os autores as cargas poliméricas são incorporadas visando melhorar as propriedades térmicas, mecânicas e termomecânicas, mudando a aparência superficial e as características de processamento, e em particular reduzindo os custos da composição polimérica. Os resíduos utilizados na pesquisa foram oriundos do corte das seguintes rochas: calcário Bege Bahia (BB), da cidade de Ouro-lândia – BA; do calcário Cariri (CC), da cidade de Santana do Cariri - CE; e dos mármore branco e cinza da região de Caicó – RN. Os mesmos foram incorporados à matriz polimérica nas seguintes proporções: 10, 20, 30, 40 e 50%, em massa.

No seu estudo, Arruda e Ribeiro (2012) caracterizaram os resíduos do ponto de vista químico e mineralógico. A análise química indicou que o elemento preponderante em todos os resíduos é o cálcio, com teor médio de 55%, sendo encontrado na forma de calcita, indicado nos difratogramas de raios-x. Os teores de sílica e óxido de ferro, foram baixos, o que favorece a utilização destes subprodutos como cargas minerais em matrizes poliméricas. Os compósitos com resíduo de Pedra Cariri e Bege Bahia apresentaram menor valor de densidade de massa quando comparados aos resíduos de mármore. Cumpre salientar que o controle de densidade é muito importante em diversos setores industriais, como automotivo e de aviação, em que a diminuição do peso final do produto é um fator de grande importância.

As propriedades mecânicas dos compósitos também foram avaliadas por Arruda e Ribeiro (2012), e se verificou que a adição dos resíduos conferia estabilização mecânica ao compósito. Com base nos resultados os autores concluíram pela possibilidade de utilização de até 50% dos resíduos de mármore e calcários como carga mineral na produção de compósitos de polipropileno.

Suassuna *et al.* (2012) desenvolveram um trabalho com o intuito de caracterizar química, física e mineralogicamente de forma sistemática os rejeitos dos calcários gerados durante a lavra e o beneficiamento da Pedra Cariri e propor possíveis usos para estes materiais.

No total foram coletadas seis amostras sendo as quatro primeiras provenientes do processo de lavra e assim denominadas ANAAM1 – Amostra Argilosa; ANAAM2 – Amostra Calcário Superior; ANAAM3 – Amostra Arenosa; ANAAM4 – Amostra Calcário Inferior. As duas últimas amostras são provenientes do processo de beneficiamento do calcário laminado extraído para a produção da pedra Cariri, sendo denominadas por ANAAM5 – Amostra

Resíduo Serraria (este na forma de lascas e aparas); e ANAAM6 – Amostra Rejeito de Calcário Laminado (na forma de lama).

As amostras de resíduo foram coletadas numa mineradora localizada na Bacia do Araripe, mais especificamente na Formação Santana e passaram por processo de secagem e moagem. Em seguida, foi determinado o pH e a perda ao fogo por calcinação a 1000°C, além da realização de análises químicas e mineralógicas dos resíduos.

Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização demonstraram que o resíduo ANAAM1 é uma argila que possui potencial de utilização em vários setores industriais, como perfuração de poços de petróleo. Para os resíduos ANAAM2, ANAAM3, ANAAM4, os ensaios não forneceram resultados conclusivos, motivo pelo qual Suassuna *et al.* (2012) indicam a necessidade de outros ensaios para obter indicação de uso para estes resíduos. Os resíduos provenientes do beneficiamento do calcário laminado, denominados de ANAAM5 e ANAAM6, são fontes de calcita de alta pureza (cerca de 94% a 96%), indicando que estes podem ser usados em diversas aplicações industriais e agrícolas.

Queiroz *et al.* (2014) estudaram a utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, dentre elas a Pedra Cariri, como material alternativo nas pastas de cimentação de poços de petróleo. Os resíduos de beneficiamento de rochas utilizados no estudo foram: Calcário Cariri – CE (RCC); Calcário Apodi - RN (RCA); Mármore Branco - ES (RMC); Mármore Bege Bahia – BA (RMB); Pegmatito – PB (RP); Granito – ES (RG) e Ardósia – MG (RA). Os resíduos foram submetidos à análise química que verificou a similaridade da composição com o cimento empregado na cimentação dos poços de petróleo. A Tabela 22 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 22 - Análise química dos resíduos avaliados por Queiroz *et al.* (2014)

<b>Análise Química dos Resíduos</b>				
<b>Resíduos</b>	<b>CaO (%)</b>	<b>SiO<sub>2</sub>(%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>
RCA	54,7	0,72	0,24	0,12
RMB	48,5	5,2	0,4	0,34
RCC	54	0,44	0,09	0,49
RMC	34	2,5	0,06	2,70
RP	0,02	67	18,2	0,41
RG	4,48	66,32	19,27	2,29
RA	1,15	57,7	17,21	7,28

Fonte: QUEIROZ *et al.*, (2014)

A utilização dos Resíduos do Mármore Bege Bahia, Calcário Cariri e Calcário Apodi, conforme Queiroz *et al.* (2014), é viável, uma vez que apresentam teores de óxidos de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro, condizentes com o do cimento. Portanto, conforme os autores, o resíduo de calcário Cariri (RCC) pode ter aplicabilidade para cimentação de poços de petróleo. Ainda de acordo com os autores, as propriedades reológicas das pastas foram melhoradas com a utilização de RCC, obtendo-se alta fluidez sem efeito de sedimentação.

Observa-se no estudo realizado por Queiroz *et al.* (2014), que as somas dos compostos não totalizam os cem por cento, em cada um dos resíduos. Os autores não informaram se o percentual faltante corresponderia à soma de óxidos que não foram determinados. Ademais, a análise da viabilidade de utilização dos resíduos baseou-se apenas na composição química do resíduo e propriedades reológicas das pastas. Porém, não ficou claro se os ensaios realizados são suficientes para concluir sobre a viabilidade da utilização dos resíduos.

Dos estudos até agora já realizados, apenas Silva (2008) pesquisou a utilização do RSPC como substitutivo do agregado natural na produção de argamassas, porém as características granulométricas do resíduo utilizado por este autor não eram as mesmas da pesquisa desenvolvida. Além disto, os resultados apresentados pelo autor apresentaram grandes variações, pois alguns valores de resistência mecânica das argamassas aos 7 e 14 dias de cura se apresentaram superiores aos resultados das argamassas aos 28 dias de cura.

## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo deste estudo é verificar a influência da substituição parcial do agregado natural por resíduo de serragem de pedra Cariri – RSPC, em argamassas. Para tanto, o programa experimental envolveu a caracterização dos materiais secos, ilustrados pela organograma da Figura 25, que foram utilizados para a produção das argamassas, bem como a determinação das propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido, ilustrada pelo organograma da Figura 26.

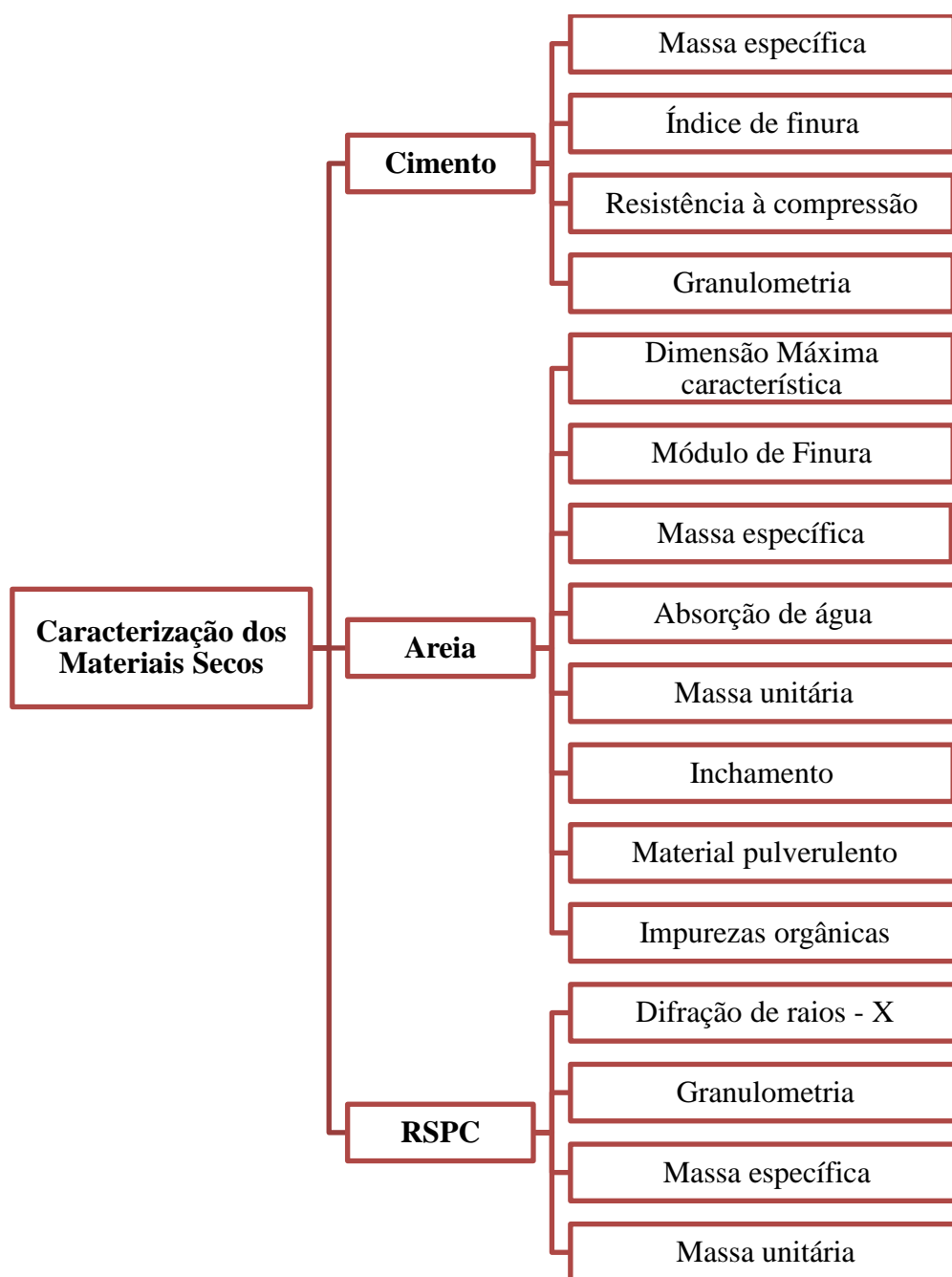


Figura 25 – Organograma referente aos ensaios de caracterização dos materiais secos

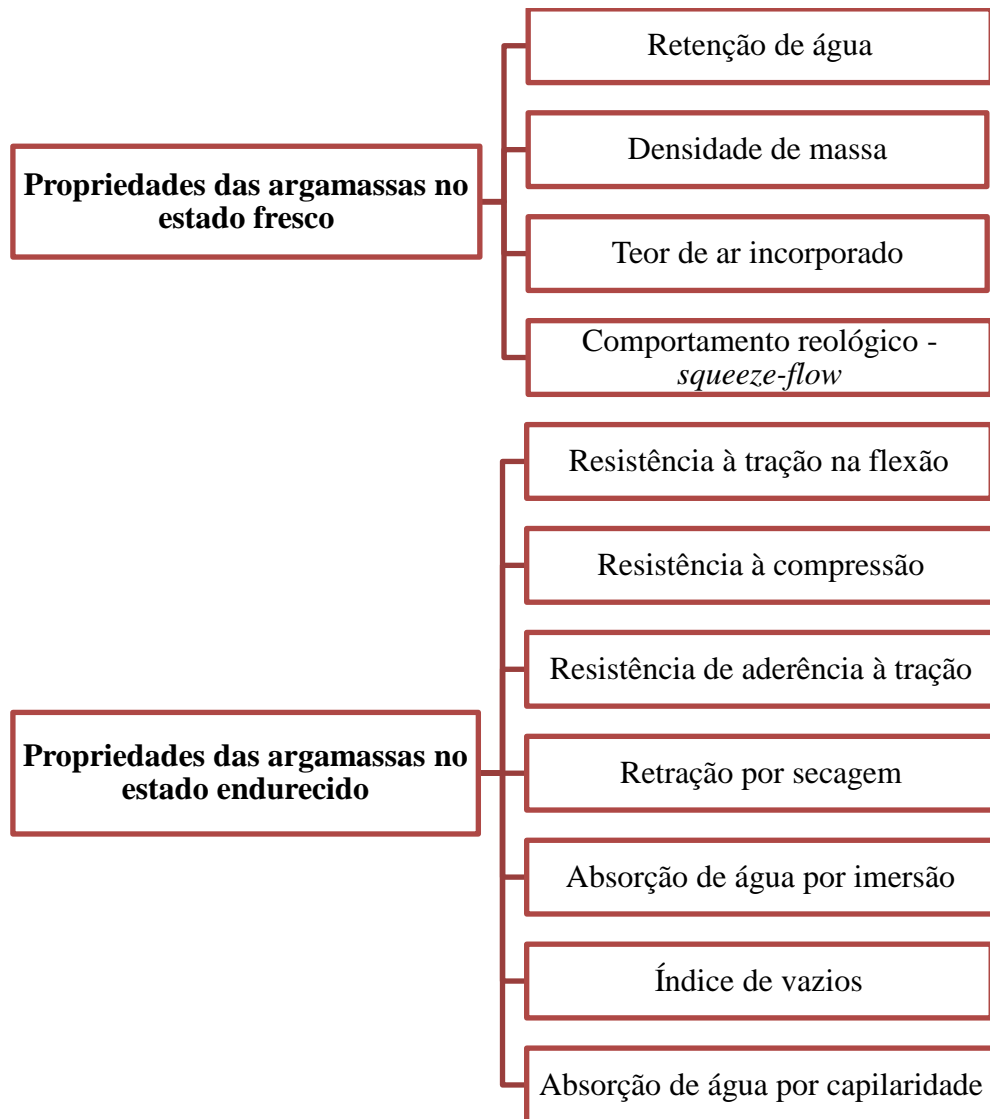


Figura 26 – Organograma referente às propriedades avaliadas das argamassas produzidas

O ensaio de reologia foi realizado no Laboratório de Construção e Estruturas, da Universidade Federal da Bahia, o de difração de raios-X (DRX) e de granulometria foram realizados no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, da Universidade Federal do Pará. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais, da Universidade Estadual de Feira de Santana. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente através de análises de variância (ANOVA) e dos testes de comparação múltipla de médias, utilizando o software STATISTIC 7.

## 5.1 MATERIAIS

Para realização do presente trabalho foram utilizados cimento Portland, areia quartzosa, resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) e água. Os materiais secos foram caracterizados segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, conforme descrito a seguir.

### 5.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CII Z-32, por ser atualmente o mais comumente utilizado na região de Feira de Santana. De acordo com Bastos (2014), este tipo de cimento é também bastante empregado na região do Cariri Cearense, local onde o maior montante do resíduo de Pedra Cariri é gerado. Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Propriedades do cimento utilizado na pesquisa

Propriedades avaliadas	Resultados	Limite da norma NBR 11758 (ABNT, 1991)	Norma
Massa específica	3,0 kg/dm <sup>3</sup>	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)

Como pode-se observar, o cimento atende aos limites estabelecido pela norma NBR 11758 (ABNT, 1991), quanto aos parâmetros avaliados.

Além dos ensaios acima descritos, também foi realizada a granulometria do cimento, através do analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec Plus, com unidade de dispersão úmida. Foi utilizado dispersante de pirofosfato de sódio, a 0,09 g/L-1. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, da Universidade Federal do Pará. A distribuição de tamanhos das partículas para D<sub>90</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>10</sub> estão apresentados na Tabela 24.



Tabela 24 - Distribuição de tamanhos de partículas do cimento utilizado

Distribuição de tamanhos	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
< 90 ( $D_{90}$ )	33
< 50 ( $D_{50}$ )	16
< 10 ( $D_{10}$ )	2

Com base nos resultados apresentados na Tabela 24 observa-se que o cimento utilizado apresentou um diâmetro médio de 16  $\mu\text{m}$ . Resultado compatível com os apresentados pelos cimentos com adição pozolânica.

### 5.1.2 Agregado Natural

O agregado natural utilizado consiste em uma areia proveniente do município de Alagoinhas –BA, comumente utilizada na região de Feira de Santana. A caracterização do agregado miúdo natural foi realizada de acordo com as normas brasileiras vigentes, e os resultados constam na Tabela 25.

Tabela 25 – Propriedades 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 ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,61	
	S.S.S ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,62	NBR NM 52 (ABNT, 1982)
	Agregado seco ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,62	
Absorção de água (%)	0,10	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	
Massa unitária ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	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: Laboratório de Tecnologia – UEFS

A curva granulométrica do agregado natural utilizado, determinada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2011), está ilustrada na Figura 27.

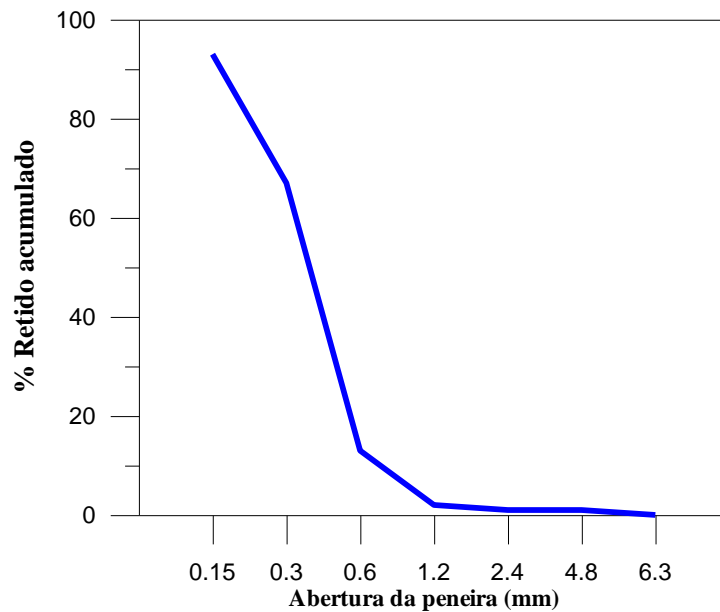


Figura 27– Curva granulométrica da areia natural (Fonte: Labotec, 2015)

A areia utilizada na produção das argamassas apresentou um módulo de finura de 1,77, o que a caracteriza como sendo uma areia fina.

### 5.1.3 Resíduo de Serragem de Pedra Cariri - RSPC

O RSPC empregado para o desenvolvimento deste trabalho foi proveniente da região de Nova Olinda, Ceará. O mesmo utilizado por Bastos (2014). A coleta e o acondicionamento do RSPC foram realizados pelo referido autor, conforme metodologia descrita minuciosamente em seu trabalho de pesquisa. Porém, nem toda a amostra do resíduo coletado por ele foi beneficiada. Portanto, para realização desta pesquisa foi dado continuidade ao processo de beneficiamento, conforme descrito a seguir.

#### 5.1.3.1 Beneficiamento do RSPC

O resíduo, na forma de torrões, estava acondicionado em baias localizadas no Laboratório de Tecnologia – LABOTEC da UEFS. Como o RSPC apresentava um pouco de umidade, passou pelo processo de secagem, realizado primeiramente ao ar livre, por 24 horas, através da exposição do material na forma de uma camada de não mais de 5cm, conforme ilustra a Figura 28. Posteriormente, o RSPC foi seco em estufa à 110°C por 24 horas.



Figura 28 - – Etapa de secagem do RSPC ao ar livre

Como o RSPC se apresentava em forma de torrões, foi submetido a um processo de desagregação, sendo utilizado para tanto um britador de mandíbulas. Posteriormente, o resíduo destorroado passou por uma peneira de 4,8 mm de abertura. O material retido foi novamente submetido ao processo de destorroamento no britador. As Figuras 29a e 29b ilustram, respectivamente, o aparelho de britagem utilizado, bem como o aspecto do resíduo após processo de destorroamento e peneiramento em peneira malha 4,8 mm.



(a)



(b)

Figura 29 – (a) Britador de mandíbulas; (b) aspecto do RSPC, após processo de destorroamento e peneiramento malha 4,8 mm

Considerando que o resíduo seria utilizado como agregado para argamassa, o mesmo passou por um processo de peneiramento, em malha de 2,4 mm, sendo utilizado o material passante. A Figura 30 ilustra o aspecto do material passante na peneira de 2,4 mm de abertura.



Figura 30– Aspecto do resíduo passante na peneira 2,4 mm

Após o beneficiamento do RSPC, este foi submetido à caracterização física e química, cujos resultados serão apresentados a seguir.

### 5.1.3.2 Caracterização química e mineralógica do RSPC

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

Tabela 26 – Composição química do RSPC avaliada por Bastos (2014)

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

Com o intuito de verificar a estrutura dos compostos do RSPC realizou-se o ensaio de difração de raios-X, no Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Foi utilizado um difratômetro PHILIPS – PW3710, com goniômetro PHILIPS – PW3020. O intervalo de varredura contínuo foi de 5 a 65° em 2 $\theta$ , voltagem de 45kV e corrente de 40mA. O difratograma obtido para o RSPC está ilustrado na Figura 31.

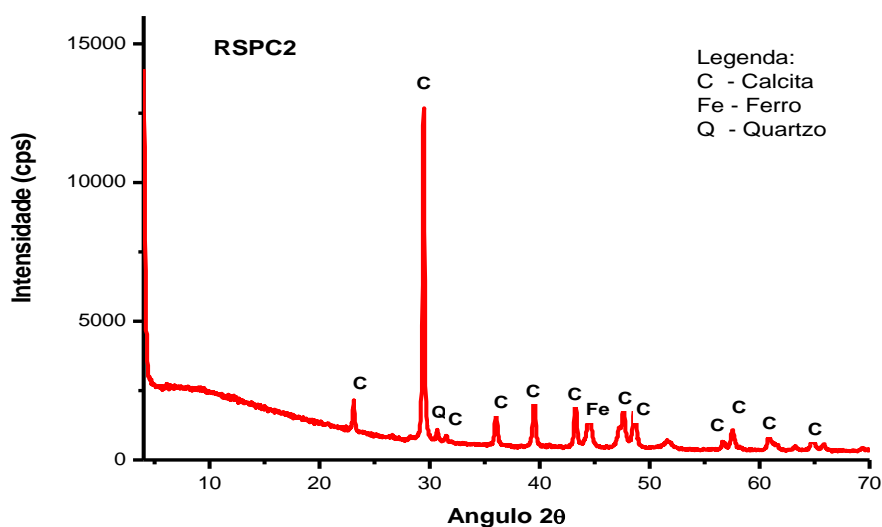


Figura 31 -Difratograma do RSPC

Observando-se o difratograma obtido, verifica-se que o RSPC é um material tipicamente cristalino, cujos picos são característicos da calcita. Portanto, o óxido de cálcio presente no RSPC está sob a forma de calcita. Observou-se ainda uma pequena incidência de

dolomita e ferro, sendo este último originário, provavelmente, do desgaste das serras, no processo de corte e serragem das lajotas da pedra Cariri.

### 5.1.3.3 Caracterização física do RSPC

Para a caracterização física do RSPC foram determinados a granulometria, massa unitária, massa específica e limite de plasticidade.

#### 5.1.3.3.1 Granulometria do RSPC

A granulometria do RSPC foi realizada através do analisador de partículas por difração a laser, Analysette 22 Micro Tec Plus, com unidade de dispersão úmida. Foi utilizado como dispersante água deionizada e o tempo de dispersão foi de 15 minutos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, da Universidade Federal do Pará. A Figura 32 ilustra a curva granulométrica.

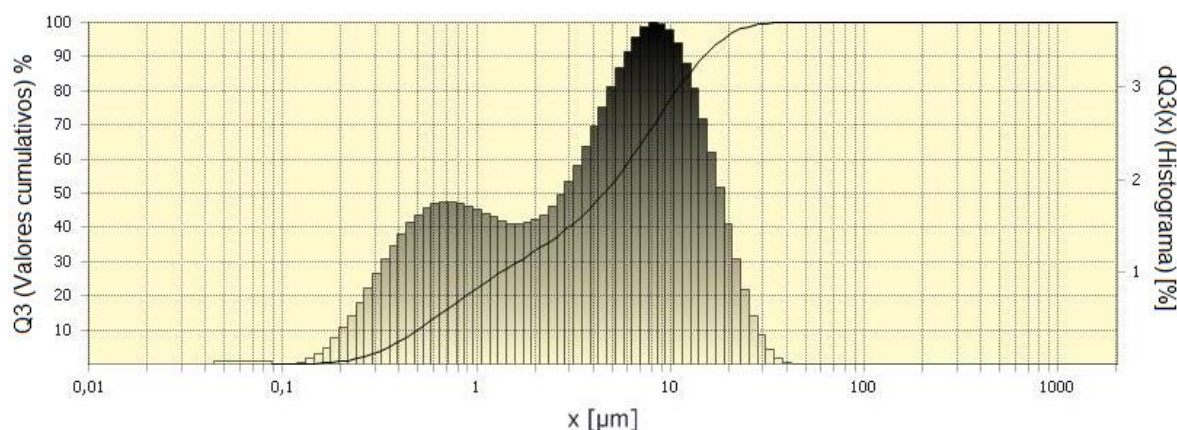


Figura 32 – Curva granulométrica do RSPC

Neste ensaio também foram obtidas as distribuições de tamanhos das partículas para  $D_{90}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{10}$ , 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 27.

Tabela 27 - Distribuição de tamanhos de partículas do RSPC utilizado

Distribuição de tamanhos	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
< 90 ( $D_{90}$ )	14,8
< 50 ( $D_{50}$ )	4,5
< 10 ( $D_{10}$ )	0,5

A dimensão média de 4,5 µm caracteriza o RSPC como sendo de granulometria bastante fina, um fíler. Isso se deve ao processo de beneficiamento ao qual a rocha foi submetida, que consistiu na serragem das mesmas, gerando, conseqüentemente, um resíduo muito fino.

#### 5.1.3.3.2 Massa unitária, massa específica

Os resultados para os ensaios de massa unitária e massa específica estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados de massa unitária e específica do RSPC

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>	<b>Norma</b>
Massa unitária	1,09 kg/dm <sup>3</sup>	NBR 7251 (ABNT, 1982)
Massa específica	2,69 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 23 (ABNT, 2001)

#### 5.1.3.3.3 Plasticidade

O RSPC foi avaliado quanto à plasticidade, por apresentar aspecto plástico quando a ele é adicionado água, e também pela tendência de formar torrões quando perde umidade. O limite de plasticidade foi avaliado de acordo com a NBR 7180 (ABNT 1984), que é um ensaio comumente utilizado para avaliar a plasticidade de solos. As Figuras 33a e 33b ilustram, respectivamente, o aspecto do RSPC no início do ensaio de plasticidade e na conclusão do mesmo.



(a)



(b)

Figura 33- Aspecto do RSPC: (a) no início do ensaio e (b) na conclusão do ensaio

De acordo com o que estabelece a 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 do agregado em argamassa pode ser uma característica importante para a produção das mesmas, uma vez que pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade e compactação das misturas. Também pode contribuir para maior aderência da argamassa ao substrato. Por outro lado, pode proporcionar fissuração devido ao ciclo de expansão e retração. Por este motivo, a utilização de agregado com característica de plasticidade, em matrizes cimentícias deve ser avaliada de forma criteriosa.

## 5.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a produção das argamassas foi utilizado o traço unitário de 1:5 (cimento: agregado), em massa. A substituição do agregado natural pelo RSPC se deu nos teores de 10, 20, e 30%, em massa.



Foram produzidas quatro misturas de argamassa, sendo uma de referência, denominada REF, e outras três com utilização de RSPC substituindo parcialmente a areia, denominadas de 10%RSPC, 20%RSPC e 30%RSPC, que correspondem aos teores de substituição de 10, 20 e 30%, respectivamente.

Na produção das argamassas a sequência e o tempo de mistura foram estabelecidos de acordo com NBR 7215 (ABNT, 1996). A mistura dos materiais foi realizada numa argamassadeira com capacidade máxima de 20 litros.

O índice de consistência das argamassas foi fixado em  $260 \pm 5$  mm, e determinado segundo a NBR 13276 (ABNT 2002). Após a obtenção das consistências das argamassas dentro dos limites estabelecidos, foi possível determinar a relação água/cimento das mesmas, cujos resultados estão demonstrados na Tabela 29.

Tabela 29 - Índice de consistência e relação a/c das argamassas produzidas

<b>Argamassas</b>	<b>Traço (cimento: areia: resíduo)</b>	<b>Índice de consistência (mm)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Consumo de cimento (kg/ m<sup>3</sup>)</b>
REF	1:5:0	263	0,86	300
10%RSPC	1;4,5:0,5	263	0,79	311
20%RSPC	1:4:1	263	0,83	311
30%RSPC	1;3,5:1,5	260	0,90	310

Com base nos resultados obtidos na Tabela 29, observou-se que o aumento do teor de resíduo na composição das misturas diminuiu a demanda de água das argamassas, para os teores de substituição de 10 e 20%. Por outro lado, a argamassa com 30% de RSPC em substituição à areia apresentou um aumento de 4,6% na relação a/c, em relação à argamassa de referência. Observa-se também, que quanto maior o teor de RSPC maior é a relação a/c da mistura.

O comportamento descrito no parágrafo anterior pode ser explicado pelo fato de que, até o teor de substituição de 20%, o RSPC, provavelmente, agiu como um lubrificante entre as partículas, o que favoreceu à diminuição da relação a/c. Porém, na argamassa com 30% de RSPC o efeito da maior quantidade de finos presentes na mistura foi preponderante sobre o efeito da plasticidade, conseqüentemente, houve maior demanda de água na mistura.

Além de alterar a relação água/cimento das argamassas produzidas, a substituição da areia natural pelo RSPC modificou visualmente o aspecto das misturas produzidas, conforme ilustrado nas Figuras 34a, 34b, 34c e 34d.

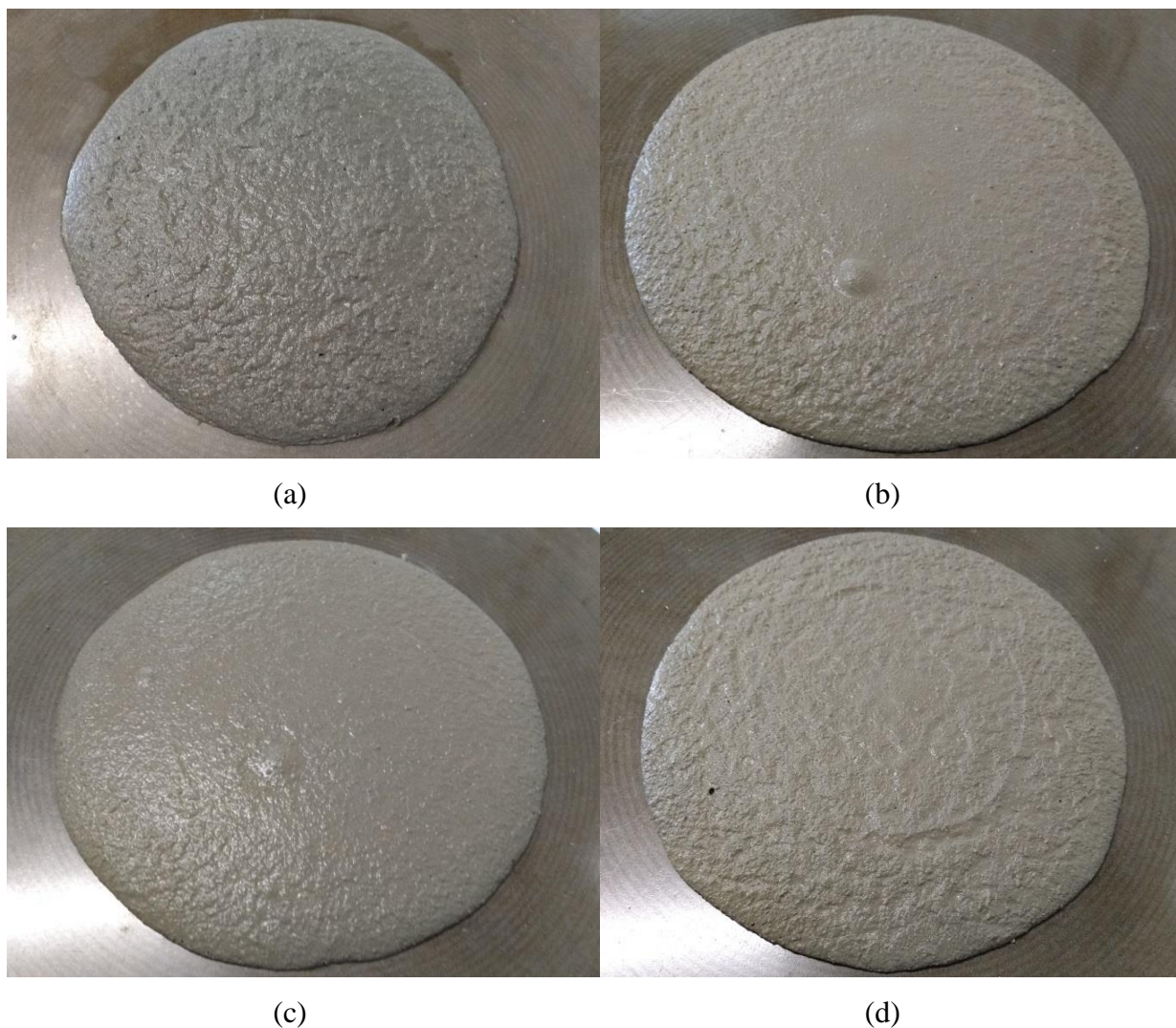


Figura 34- Aspectos das argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC e d) 30%RSPC

Analisando as imagens contidas na Figura 34 observa-se que o incremento no teor de RSPC melhorou a aparência das argamassas, transparecendo melhor coesão das misturas. Resultado semelhante foi verificado no trabalho desenvolvido por Sales *et al.* (2014), cujas argamassas produzidas com até 40% de pó de mármore, em substituição à areia, apresentaram maior mobilidade e coesão, com menor exsudação.

### 5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

No estado fresco, foram avaliadas as seguintes propriedades das argamassas: retenção de água, densidade de massa, teor de ar incorporado e comportamento reológico utilizando o método de *squeeze-flow*, que serão descritos a seguir.

### **5.3.1 Retenção de água**

O ensaio de determinação da retenção de água foi realizado através do método estabelecido pela NBR 13277 (ABNT, 2005), que foi desenvolvido para argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

### **5.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado**

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados através da metodologia prescrita na NBR 13278 (ABNT, 2005).

### **5.3.3 Comportamento reológico**

O comportamento reológico foi avaliado através do método *squeeze-flow*.

O ensaio consiste na medida do esforço necessário para a compressão axial de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, por força ou deformação controlada. 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  $D/h \gg 5$  (CARDOSO *et al.*, 2005).

De acordo com Cardoso (2009), o método fornece dados da carga aplicada em função do tempo ou do deslocamento do material. A Figura 35 ilustra o perfil típico obtido quando traça-se a curva carga versus deslocamento em um ensaio de *squeeze-flow*, com controle por deslocamento.

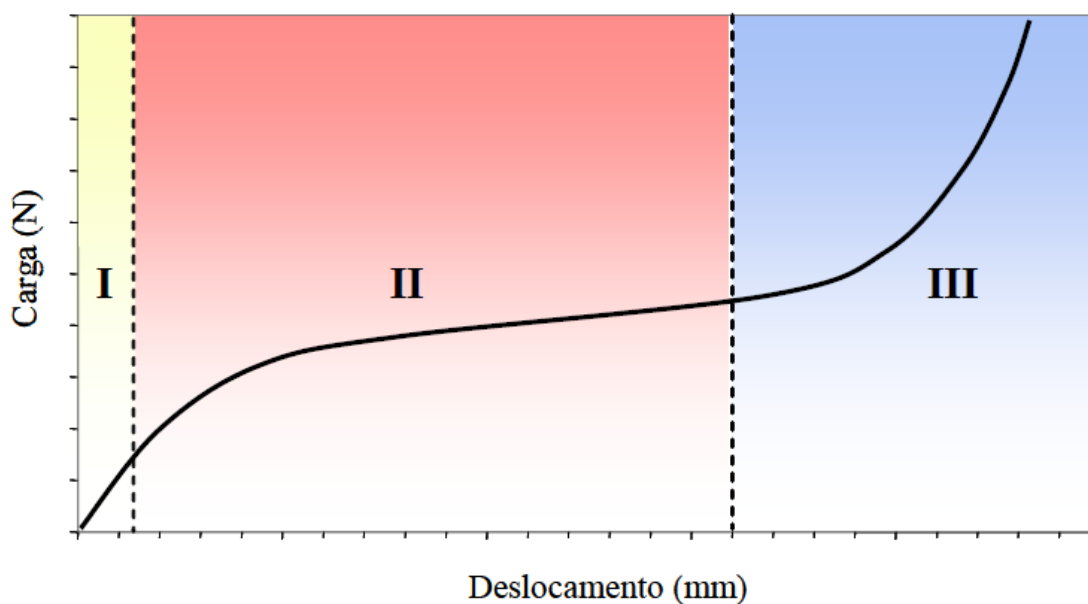


Figura 35– Perfil característico de uma curva carga versus deformação, obtido para o ensaio de *squeeze-flow* (Fonte: CARDOSO *et al.*, 2005; BETIOLI *et al.* 2009).

Através da imagem percebe-se que a curva obtida apresenta três estágios bastante definidos. Conforme explicado por Cardoso *et al.* (2005), Betioli *et al.* (2009) e Cardoso (2009), no primeiro estágio o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear, e está relacionado, provavelmente, à tensão de escoamento do material. No segundo estágio, caracterizado por deformação plástica ou fluxo viscoso, o material sofre um deslocamento significativo sem um aumento expressivo na força necessária para o deslocamento, comportamento que favorece a produtividade durante a aplicação das argamassas. O terceiro estágio é caracterizado por uma grande deformação associada ao aumento exponencial da carga necessária para o deslocamento do material.

Cardoso (2009) e Silva (2015) salientam que nem todas as curvas obtidas no ensaio de *squeeze-flow* apresentam a transição entre as regiões I e II bem definidas, pois estas se sobrepõem. Desta forma algumas curvas apresentam apenas duas regiões, a I+II e a III.

Nesta pesquisa, o ensaio de *squeeze-flow* foi realizado no Laboratório de Construção e Estruturas da UFBA, utilizando uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC com controle de deslocamento e capacidade 1 kN de carga compressiva com resolução mínima de 10 N. As misturas das argamassas foram colocadas em uma placa de 101 mm de diâmetro com altura de 10 mm. A Figura 36 ilustra uma mistura de argamassa sendo submetida ao ensaio de *squeeze-flow*.



Figura 36 - Ensaio de *squeeze-flow*

As misturas de argamassa foram submetidas ao esmagamento até atingir o limite de carga de 1 KN ou deslocamento de 9 mm. A velocidade de ensaio foi de 0,1 mm/s, com início logo após o processo de mistura dos materiais. A partir dos ensaios obteve-se as curvas carga versus deslocamento para as argamassas produzidas. Os resultados serão apresentados no capítulo 6.

#### 5.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido foram avaliadas a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração e retração por secagem das argamassas produzidas. Também foram avaliados alguns parâmetros de durabilidade, como absorção de água por imersão e índice de vazios e absorção de água por capilaridade.

##### 5.4.1 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas produzidas foram avaliadas conforme estabelece a NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram moldados três corpos de prova prismáticos, de 4 cm x 4 cm x 16 cm, para cada mistura de argamassa. Depois de moldados, os corpos de prova permaneceram no molde, em temperatura ambiente, por 24 horas, sendo desmoldados e colocados na cura em água com cal. Posteriormente, os mesmos foram ensaiados aos 07 e aos 28 dias de cura. Os corpos de prova foram ensaiados

em máquina de ensaios, estática, servo-elétrica, marca Shimadzu, modelo Autograph AGS-X, com célula de carga cuja capacidade máxima é de 100kN.

#### 5.4.2 Resistência de aderência à tração

Para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração os procedimentos basearam-se no que determina a NBR 13528 (ABNT, 2010). O substrato foi um painel de alvenaria de blocos de concreto, com 6 m de comprimento e 2 m de altura, chapiscado.

O ensaio foi realizado em duas misturas de argamassa, a de referência e a argamassa 20%RSPC, sendo esta última a que apresentou melhor comportamento quanto à resistência à compressão. As argamassas foram produzidas em argamassadeira, com capacidade máxima de 20 litros. A sequência e o tempo de mistura foram determinados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

A aplicação das argamassas no substrato, ilustrada pela Figura 37, foi realizada manualmente, por um experiente pedreiro. A cura foi realizada ao ar livre durante 70 dias, em função de impedimento de acesso à universidade, devido à greve de estudantes.



Figura 37 - Aplicação da argamassa para ensaio de aderência

O corte do revestimento de argamassa foi executado a seco, utilizando-se serra copo diamantada, conforme ilustrado pela Figura 38a. Evitou-se extrair corpos de prova das áreas correspondentes às juntas da argamassa de assentamento dos blocos.

Após o corte dos corpos de prova, foram coladas as pastilhas em cada um destes, com adesivo à base de epóxi de secagem rápida. Durante o processo de colagem das pastilhas, ilustrado pela Figura 38b, foram descartados alguns corpos de prova danificados durante o processo de corte. Foram ensaiados doze corpos de prova para cada mistura de argamassa.



(a)

(b)

Figura 38– Aspectos dos painéis: a) corte para corpos de prova; b) colagem das pastilhas

Decorrido o tempo de cura do adesivo utilizado na colagem das pastilhas, que foi de vinte e quatro horas, realizou-se o procedimento de ruptura dos corpos de prova. O aparelho de arrancamento utilizado no ensaio, ilustrado pela Figura 39, consistiu num dinamômetro de tração dotado de célula de carga, com capacidade máxima de 10kN, e indicador de pesagem, com escala digital e resolução de 0,05 kgf, ambos do fabricante Alfa Instrumentos.



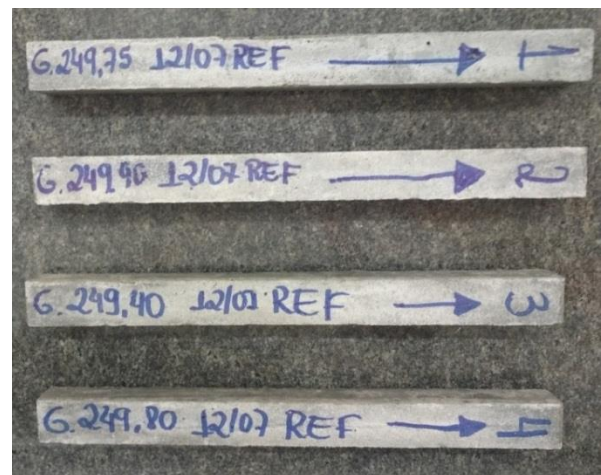
Figura 39–Dinamômetro de tração utilizado no ensaio de aderência

### 5.4.3 Retração por secagem

Realizou-se o ensaio de retração por secagem de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 8490 (ABNT, 1984), para todas as misturas de argamassa. Moldou-se quatro corpos de prova para cada mistura, com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm. O adensamento foi realizado em mesa de consistência, em duas camadas, sendo que para cada camada aplicou-se 15 golpes. As Figuras 40a e 40b ilustram, respectivamente, aspecto de corpos de prova na fôrma e após a desforma.



(a)



(b)

Figura 40– Aspectos dos corpos de prova para ensaio de retração: a) nos moldes; b) após desmoldagem



Os corpos de prova, após desmoldagem, permaneceram na cura com água e cal até a idade de 28 dias. Neste trabalho, a retração por secagem foi avaliada para as idades de 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 70, 84 e 140 dias, após o período de cura úmida, totalizando 20 semanas de secagem.

#### **5.4.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios**

A absorção de água por imersão foi avaliada para todas as misturas estudadas, com base na NBR 9778 (ABNT, 2005). Neste ensaio também determinou-se o índice de vazios das argamassas. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos 5 cm x 10 cm para cada argamassa produzida. Os CPs foram ensaiados aos 28 dias de cura.

#### **5.4.5 Absorção de água por capilaridade**

Realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, para todas as misturas estudadas, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram produzidos três corpos de prova prismáticos, de 4 cm x 4 cm x 16 cm, para cada mistura de argamassa produzida, os quais permaneceram em temperatura ambiente até a idade do ensaio, que foi de 28 dias. Porém, além do tempo de 10 e 90 minutos, também foram determinadas as massas dos corpos de prova para os tempos de 180, 360, 1440, 2880, 4320 e 5760 minutos.

A determinação da taxa de absorção foi feita baseado no método desenvolvido por Kelham (1988). De acordo com o método, a taxa de absorção é relacionada ao ganho de massa ao longo do tempo. Plota-se os pontos de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo. Após a plotagem dos pontos é possível traçar duas retas, sendo que a primeira corresponde ao período de absorção inicial e a segunda à saturação dos corpos de prova. O ponto cujas retas se interceptam corresponde ao início da saturação dos corpos de prova e é denominado de *nick point*. A Figura 41 ilustra as retas obtidas através da plotagem dos dados de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo.

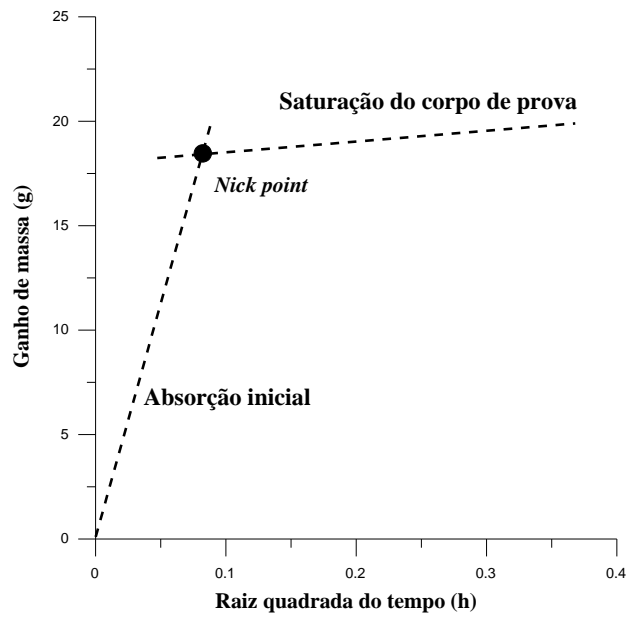


Figura 41– Gráfico esquemático do ensaio de absorção por sucção capilar

A taxa de absorção, segundo Kelham (1988), corresponde à relação entre a inclinação da reta referente à absorção inicial e à área do corpo de prova.

Os resultados dos ensaios realizados no programa experimental, bem como a discussão dos mesmos, serão apresentados no capítulo 6.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

### 6.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados das propriedades das argamassas no estado fresco: retenção de água, densidade de massa, teor de ar incorporado e reologia através do método *squeeze-flow*.

#### 6.1.1 Retenção de água

Os valores de médias obtidos para o ensaio de retenção de água estão apresentados na Tabela 30. Os valores individuais, em relação a esta propriedade constam no Apêndice 1.

Tabela 30 - Resultados de médias de retenção de água das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>Retenção de água (%) ± Sd. (%) (C.V. (%))</b>
REF	60±0,8 (1,4)
10%RSPC	78±0,1 (0,1)
20%RSPC	83±0,1 (0,1)
30%RSPC	86±0,1 (0,1)

Observa-se que quanto maior é o teor de RSPC na argamassa, maior o valor da retenção de água média. Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para verificar estatisticamente se o teor de RSPC influenciou significativamente nos resultados de retenção de água. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Análise de variância para retenção de água

<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>cal</sub></b>	<b>F<sub>0,05</sub></b>	<b>Significância</b>
Teor de RSPC	3	282,46	2259,7	6,59	S
Erro	4	0,13			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Pode-se observar que o teor de RSPC influenciou significativamente nos resultados de retenção de água. Realizou-se também a comparação múltipla de médias, e o resultado dessa análise demonstrou que a diferença foi significativa para todas as misturas estudadas.

A Figura 42 ilustra a curva de tendência dos resultados de retenção de água das argamassas e a Figura 43 ilustra a retenção de água relativa das argamassas produzidas.

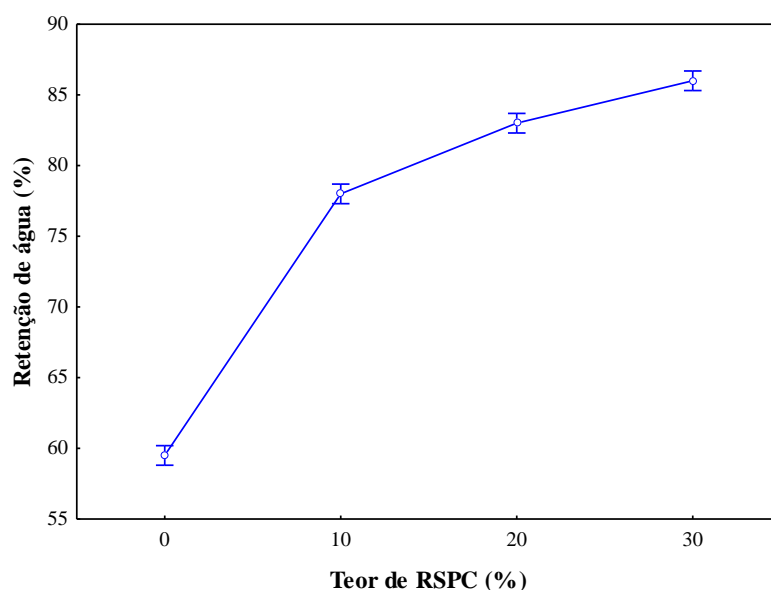


Figura 42 – Influência do teor de RSPC sobre a retenção de água das argamassas produzidas.

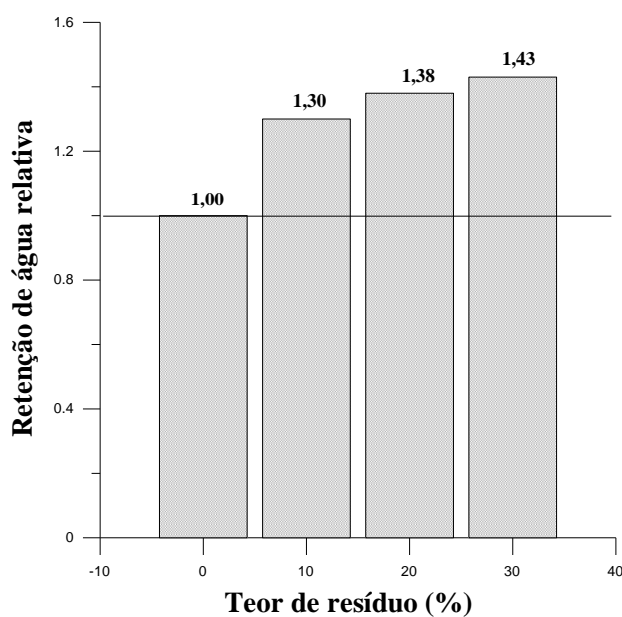


Figura 43– Retenção de água relativa para as argamassas produzidas

Observa-se que o incremento de RSPC em substituição da areia natural provocou um aumento na retenção de água das argamassas em 30, 38 e 43%, para os teores de 10, 20 e 30% de RSPC, respectivamente.

O aumento da retenção de água proporcionado pelo incremento no teor de RSPC na composição das argamassas pode ser atribuído à granulometria do resíduo que é bem mais fino do que o agregado natural. Materiais de elevada área superficial quando adicionados nas misturas com materiais cimentícios, tendem a demandar a água disponível para molhagem superficial. Além disso, o RSPC apresenta uma certa plasticidade, o que não se observa na areia. Desta forma, justifica-se o aumento na retenção de água pelas misturas com o resíduo.

Tenório *et al.* (2005) e Silva (2011) avaliando a retenção de água de diversas argamassas verificaram que o teor de finos não influenciou esta propriedade nas argamassas pesquisadas. Resultados que causaram surpresa aos autores, pois a retenção de água é influenciada pela área específica dos materiais constituintes. Quanto maior a área específica dos constituintes da argamassa, maior a área total de contato das partículas sólidas, o que leva, consequentemente, ao aumento da retenção de água.

### 6.1.2 Densidade de massa

Os resultados de médias dos ensaios de densidade de massa das argamassas produzidas neste trabalho estão apresentados na Tabela 32. Salienta-se que os resultados individuais encontram-se no Apêndice 2.

Tabela 32 - Médias de densidade de massa das argamassas produzidas

Argamassa	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> ) ± Sd. (kg/m <sup>3</sup> ) (C.V. (%))
REF	2006±2,80 (0,1)
10%RSPC	2055±3,41(0,2)
20%RSPC	2121±3,03 (0,1)
30%RSPC	2137±1,42 (0,1)

Observa-se que as argamassas com RSPC apresentaram maiores valores de densidade de massa. Com o intuito de verificar se a substituição da areia natural pelo RSPC exerceu influência significativa nestes resultados foi realizada a análise de variância. Na Tabela 33 estão apresentados os resultados da ANOVA.

Tabela 33 - Análise de Variância para densidade de massa

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
Teor de RSPC	3	7324	957	6,59	S
Erro	4	8			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Pode-se observar que foi significativo o efeito do teor de resíduo na densidade de massa das argamassas produzidas.

Realizou-se também a comparação múltipla de médias e constatou-se que há diferença significativa nos resultados de densidade massa apresentados pelas misturas produzidas.

A Figura 44 representa o efeito significativo do teor de resíduo na densidade de massa das argamassas produzidas.

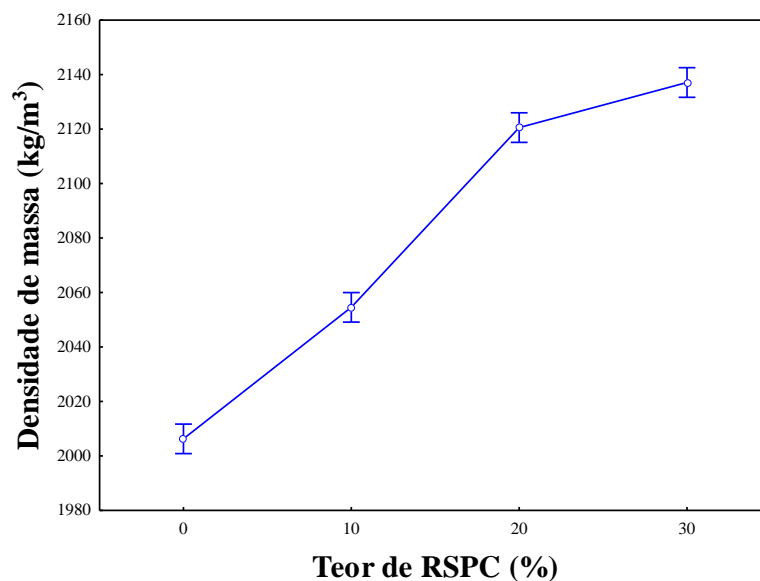


Figura 44 - Efeito do teor de RSPC na densidade de massa das argamassas produzidas

Foi determinada a densidade de massa relativa das argamassas, conforme apresentado na Figura 45.

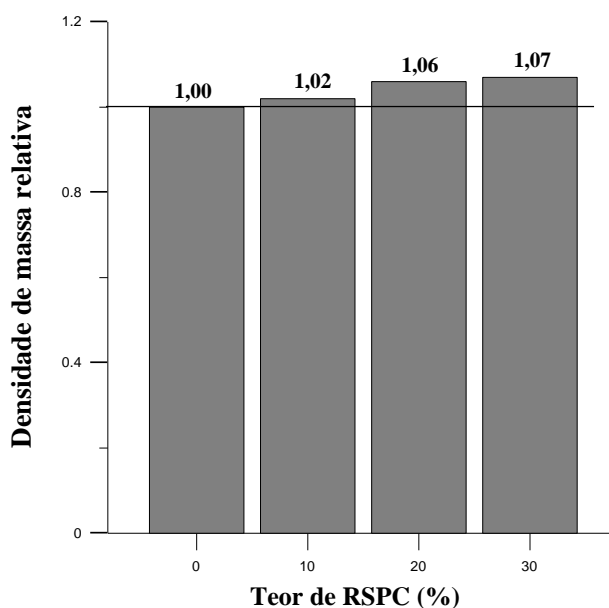


Figura 45 - Densidade de massa relativa das argamassas produzidas

Com base nos resultados pode-se afirmar que a densidade de massa aumentou quanto maior o teor de RSPC na composição das argamassas. O aumento da densidade chegou a 7%, para argamassa com 30% de RSPC, em relação à argamassa de referência. Este efeito pode ser atribuído ao fato do RSPC ser de granulometria muito fina, proporcionando melhor efeito de preenchimento nas misturas. Além disso, a massa específica do RSPC ( $2,69 \text{ kg/dm}^3$ ) é aproximadamente 2,7% superior à da areia natural ( $2,62 \text{ kg/dm}^3$ ).

### 6.1.3 Teor de ar incorporado

Os resultados de médias do ensaio de determinação teor de ar incorporado das misturas encontram-se na Tabela 34. Os resultados individuais constam no Apêndice 3.

Tabela 34– Teor de ar incorporado médio das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>Teor de ar incorporado (%) ± Sd. (%) (C.V. (%))</b>
REF	9,3±0,1 (1,4)
10% RSPC	8,4±0,1 (1,8)
20% RSPC	4,9±0,1 (2,7)
30% RSPC	3,2±0,1 (2,0)

Os valores obtidos para o teor de ar incorporado foram submetidos à análise de variância, cujos resultados estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Análise de Variância para teor de ar incorporado

<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>cal</sub></b>	<b>F<sub>0,05</sub></b>	<b>Significância</b>
Teor de RSPC	3	17,631	502,67	6,59	S
Erro	4	0,035			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Verifica-se que a substituição da areia natural pelo RSPC exerceu influência significativa sobre os resultados de teor de ar incorporado das misturas produzidas.

Foi realizada também a comparação múltipla de médias dos resultados e constatou-se que a substituição da areia natural pelo RSPC exerceu influência significativa sobre o teor de ar incorporado das misturas produzidas.

A Figura 46 ilustra o comportamento das argamassas, quanto ao teor de ar incorporado.

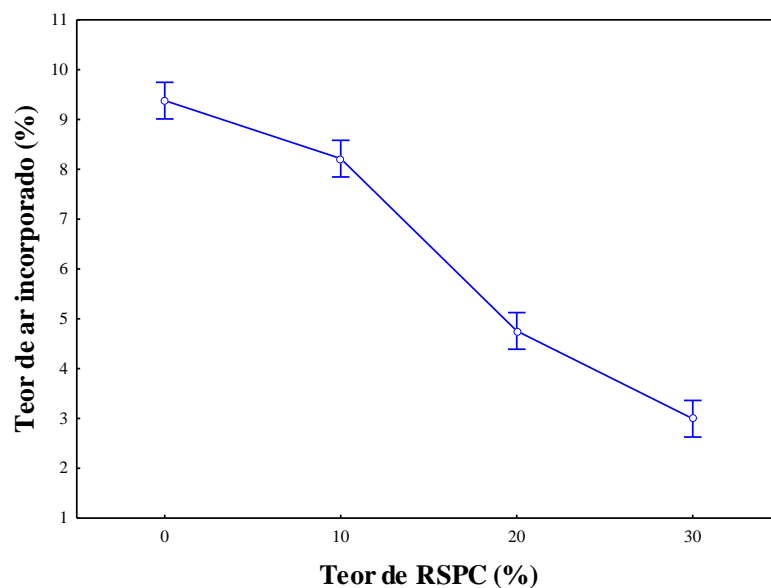


Figura 46- Efeito do teor de RSPC sobre o teor de ar incorporado das argamassas produzidas

Determinou-se o teor de ar incorporado relativo das misturas produzidas, cujos resultados estão apresentados na Figura 47.

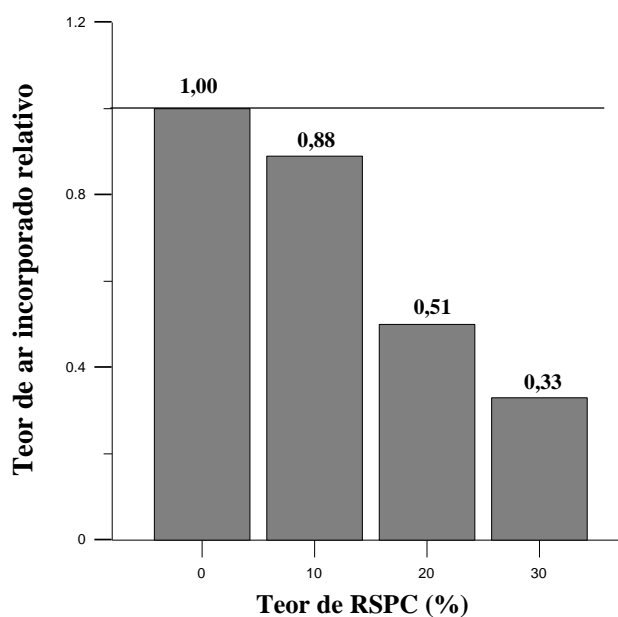


Figura 47 – Teor de ar incorporado relativo das argamassas produzidas

Observa-se que quanto maior foi o teor de RSPC na mistura, menor o teor de ar incorporado. A substituição da areia natural pelo RSPC proporcionou uma diminuição de até 67% do teor de ar incorporado, para a mistura contendo 30% de RSPC. Este comportamento pode ser atribuído ao fato do resíduo ser bem mais fino do que a areia, o que favoreceu a um



melhor preenchimento das misturas. Este mesmo comportamento foi observado por Tenório *et al.* (2005), que avaliando argamassas produzidas com resíduo de granito, verificaram que o teor de ar incorporado apresentou-se menor para as argamassas com maior teor de finos.

### 6.1.4 Comportamento reológico das argamassas medido pelo *squeeze-flow*

Os resultados obtidos do ensaio de *squeeze-flow* estão apresentados em curvas de carga versus deslocamento, conforme ilustra a Figura 48.

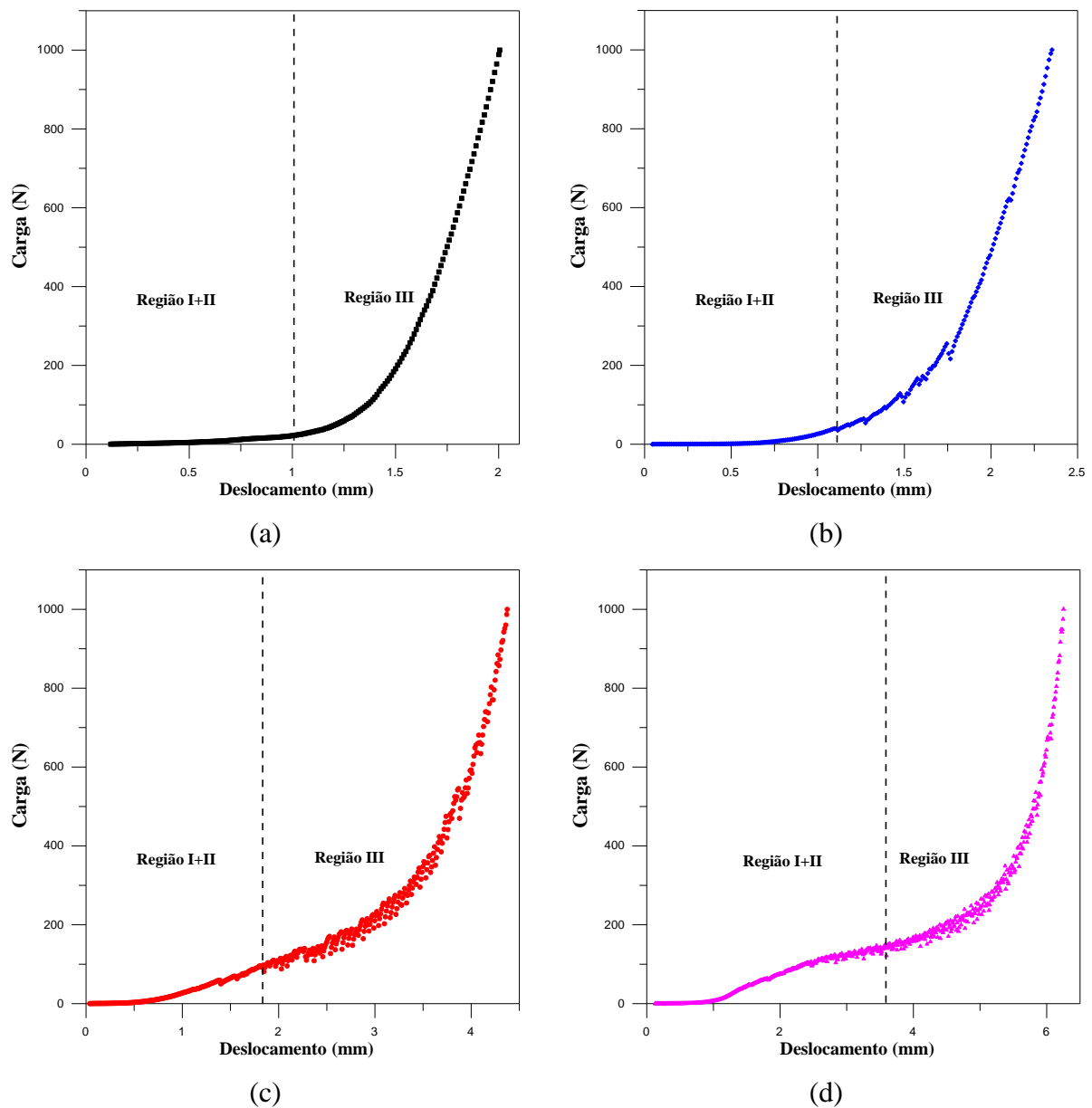


Figura 48 - Curvas da carga versus deslocamento do ensaio de *squeeze-flow*: para as argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC; d) 30%RSPC

A partir das curvas exibidas na Figura 48, é possível verificar que nenhuma das argamassas produzidas atingiu o deslocamento máximo programado pelo ensaio, que foi de 9 mm. Isto porque o limite da célula de carga (1000N) foi primeiramente atingido, o que demonstra que houve o imbricamento entre as partículas das misturas. Além disto, observa-se que as misturas apresentaram para um mesmo deslocamento diferentes valores de cargas máximas.

A argamassa REF foi a que apresentou maior carga por deslocamento dentre as misturas pesquisadas. Analisando-se a curva apresentada pela mesma, Figura 48a, observa-se que no início do ensaio a argamassa REF apresentou grande deformação para pequenas cargas aplicadas. Porém, após 1 mm de deslocamento, foram necessárias acentuadas cargas para a argamassa apresentar pequenas deformações. Desta forma, o estágio correspondente à resistência ao fluxo foi bastante pronunciado para argamassa REF.

O comportamento da argamassa REF pode ser explicado pelo atrito entre as partículas dos seus constituintes. A referida argamassa foi produzida com areia, que não apresenta nenhuma plasticidade. Além disso, durante a determinação do índice de consistência, verificou-se que a argamassa REF apresentou exsudação visivelmente superior às demais misturas produzidas. Desta forma, com a aplicação da carga houve aproximação rápida das partículas iniciando o imbricamento dos grãos de areia.

Mattana Júnior e Costa (2009) verificaram, através do ensaio de *squeeze-flow*, que a granulometria dos componentes das argamassas também influencia no comportamento reológico das mesmas. Segundo os autores, as argamassas cujos constituintes possuíam maior granulometria atingiram a fase do imbricamento dos grãos mais rapidamente. Como a argamassa REF foi produzida com uma areia natural que apresentou granulometria maior que as demais argamassas com RSPC, este fator também explica a maior necessidade de força requisitada pela argamassa REF.

Quando da substituição do agregado natural pelo RSPC, para o teor de 10%, observa-se que houve um aumento no deslocamento para que a mistura atingisse a carga de 1000N. Também se observou uma atenuação na transição entre a região elástica e plástica e a região de enrijecimento. Nas argamassas com 20 e 30% de RSPC verificou-se que a separação das partículas já é suficiente para manter níveis de atrito relativamente baixos. Desta forma, infere-se que o RSPC, além de ser uma matéria-prima que apresenta alguma plasticidade, também possui grande quantidade de partículas finas que adsorvem a água na superfície, o que favorece o deslizamento entre partículas dos agregados das argamassas produzidas, melhorando a plasticidade das mesmas.

O aumento da plasticidade das argamassas com o incremento da substituição da areia natural pelo RSPC pode ser mais bem percebido quando analisam-se as curvas obtidas para as misturas 20%RSPC e 30%RSPC, Figuras 48c e 48d, respectivamente. Nas mesmas é possível observar que a região secundária começa a se tornar mais pronunciada, sendo esta maior na curva apresentada pela argamassa 30%RSPC.

Com base nas curvas obtidas no ensaio de *squeeze-flow*, pode-se inferir que a argamassa REF exigiu maior carga para se deformar, apresentando-se menos plástica, e que esta propriedade foi maior para a argamassa 30%RSPC. Observou-se também que houve um incremento na plasticidade das argamassas com o aumento do teor de substituição da areia pelo RSPC, fato este comprovado pelo aumento gradativo da região I + II das argamassas contendo RSPC em sua composição. Este comportamento pode ser melhor percebido pela Figura 49, que apresenta todas as curvas de comportamento para as misturas produzidas.

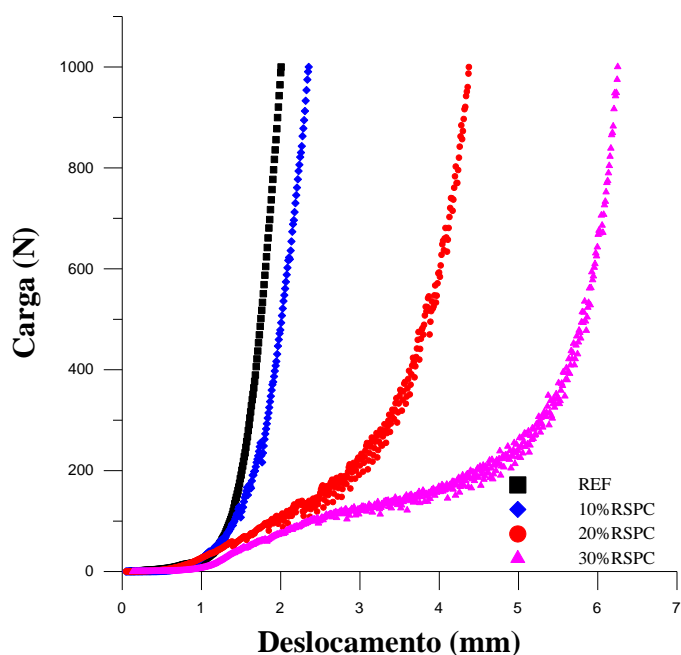


Figura 49 – Curvas da carga versus deslocamento obtidas para as argamassas no ensaio de *squeeze-flow*

Observando-se as curvas ilustradas pela Figura 49 percebe-se claramente que o aumento do teor de RSPC na argamassa proporcionou aumento da região referente ao estágio de deformação plástica.

Silva (2015) em seu estudo propôs uma nova metodologia de análise das curvas obtidas no ensaio de *squeeze-flow*, através do cálculo do módulo de escoamento, realizado da seguinte forma: primeiramente fez-se a maximização do gráfico por meio da redução da

escala, depois realizou-se a identificação, em cada curva, do limite da região I+II com a região III, registrando o valor da carga e do deslocamento. O módulo de escoamento foi considerado como sendo a razão entre os valores da carga e o deslocamento, no limite entre as regiões supracitadas. A Figura 50 ilustra o perfil típico das curvas obtidas por Silva (2015) e a maximização do gráfico por meio da redução de escala com a identificação do limite da região I + II, respectivamente.

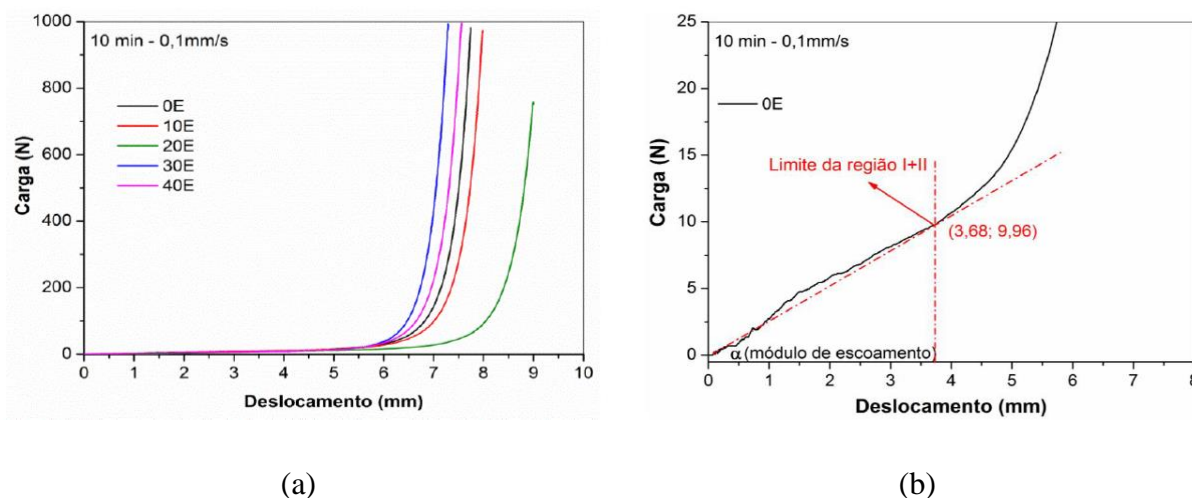


Figura 50 - Curvas de *squeeze-flow*: (a) Perfil típico; (b) maximização das curvas, através da redução de escala, com identificação do limite da região I + II (Fonte: Silva, 2015)

Conforme Silva (2015), o módulo de escoamento é um indicador do enrijecimento por deformação da argamassa no estado fresco. Ou seja, quanto maior o módulo de escoamento, mais rígida é a argamassa avaliada. Através dele é possível analisar a plasticidade das misturas produzidas.

No método proposto, Silva (2015) considerou para efeito de cálculo do módulo de elasticidade o limite da região I+II, isto porque, segundo ele, não há como identificar cada região nas curvas por ele obtidas.

Na presente pesquisa, para a avaliação da plasticidade das argamassas, foi necessária a realização de ajustes para aplicação do método proposto por Silva (2015). Somente as curvas obtidas para as argamassas REF e 10%RSPC apresentaram comportamento similar ao das pastas produzidas por Silva (2015). As argamassas 20%RSPC e 30%RSPC apresentaram as regiões I e II bem definidas. Desta forma, considerou-se para o cálculo do módulo de escoamento de todas as argamassas produzidas o limite entre a região elástica do material e o início do comportamento plástico. A Figura 51 ilustra a maximização das curvas *squeeze-flow* das argamassas, para a identificação da região elástica.

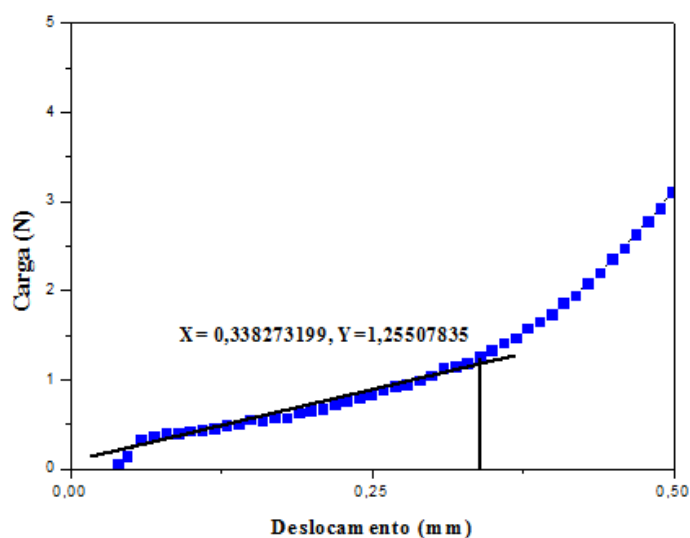


Figura 51 - Maximização das curvas das argamassas, através da redução de escala com identificação do limite da região elástica

A partir da maximização das curvas, identificação do limite entre a região elástica e plástica e posterior obtenção dos dados de carga e deslocamento, calculou-se o módulo de escoamento das argamassas produzidas. A Tabela 36 ilustra os resultados.

Tabela 36 - Valores de carga, deslocamento e módulo de escoamento, obtidos do limite de transição entre a região elástica e plástica das curvas de *squeeze-flow*

<b>Argamassa</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>	<b>Módulo de escoamento (N/mm)</b>
REF	5,21	0,54	9,65
10%RSPC	1,26	0,34	3,70
20%RSPC	1,28	0,38	3,37
30%RSPC	0,28	0,41	0,68

A partir dos resultados apresentados na Tabela 35, observa-se que o incremento do teor de RSPC acarretou na redução do módulo de escoamento das argamassas. Desta forma, infere-se que as argamassas com RSPC apresentaram-se menos rígidas, ou seja, mais trabalháveis.

Quando se avalia as curvas de *squeeze-flow* através da análise da carga por deslocamento, como também pelo método proposto por Silva (2015), verifica-se que, para ambos, o fluxo viscoso mostrou-se, de forma geral, proporcional à elevação do teor de RSPC na mistura. Ou seja, o aumento do teor de RSPC tornou as argamassas mais plásticas.

O aumento da plasticidade proporcionada pelo RSPC não foi expressivo para a argamassa 10% RSPC. Provavelmente devido à relação a/c da mistura, que foi menor que a argamassa REF, o que pode ter dificultado o deslizamento interpartículas de agregado.

Conforme exposto por Cardoso *et al.* (2005), a presença de água em argamassas proporciona aumento da distância interpartículas, o que torna a mistura menos viscosa e facilita o escorregamento relativo entre os agregados.

Analisando-se os resultados em termos práticos, ainda de acordo com Cardoso *et al.* (2005), quanto maior a região secundária, estágio de deformação plástica e fluxo viscoso no ensaio de *squeeze-flow*, mais o material apresenta um comportamento favorável a sua aplicação e seu espalhamento. Já na terceira região, estágio de resistência ao fluxo, o acabamento e aplicação são dificultados. Desta forma, infere-se que a utilização do RSPC em substituição da areia natural aumentou o estágio de deformação plástica e fluxo viscoso das argamassas, melhorando sua trabalhabilidade.

## 6.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

### 6.2.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados de médias dos ensaios de resistência à tração na flexão estão demonstrados na Tabela 37. Salienta-se que os resultados individuais estão no Apêndice 4.

Tabela 37 - Resultados de médias de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas

Argamassa	Resistência à tração na flexão média (MPa) ± Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	2,94 ± 0,08 (2,6)	4,26 ± 0,09 (2,0)
10%RSPC	3,72 ± 0,06 (1,5)	4,99 ± 0,09 (1,8)
20%RSPC	3,75 ± 0,06 (1,7)	5,14 ± 0,17 (3,2)
30%RSPC	3,84 ± 0,25 (6,6)	4,68 ± 0,24 (5,1)

Observa-se que as argamassas com RSPC apresentaram maiores valores de resistência à tração na flexão, em relação à argamassa de referência.

Foi realizada a análise de variância para verificar estatisticamente se a idade e o teor de RSPC influenciaram nos resultados de resistência à tração na flexão. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Análise de Variância para resistência à tração na flexão

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
A - Tempo de cura	1	9,5761	211,45	4,49	S
B - Teor de RSPC	3	0,6408	14,15	3,24	S
AB	3	0,1384	3,06	3,24	NS
Erro	16	0,0453			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Constatou-se que a idade e o teor de RSPC influenciaram significativamente nos resultados de tração na flexão das argamassas produzidas.

Foi realizada a comparação múltipla de médias, com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre os resultados de resistência à tração na flexão para todas as argamassas produzidas. Constatou-se que não houve diferença significativa entre os resultados de resistência a tração na flexão, aos sete dias, das argamassas com 10, 20 e 30% de RSPC. No entanto, para os vinte e oito dias, apenas os resultados das argamassas com 20 e 30% de RSPC apresentaram diferença significativa entre si. A Figura 52 mostra o comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão.

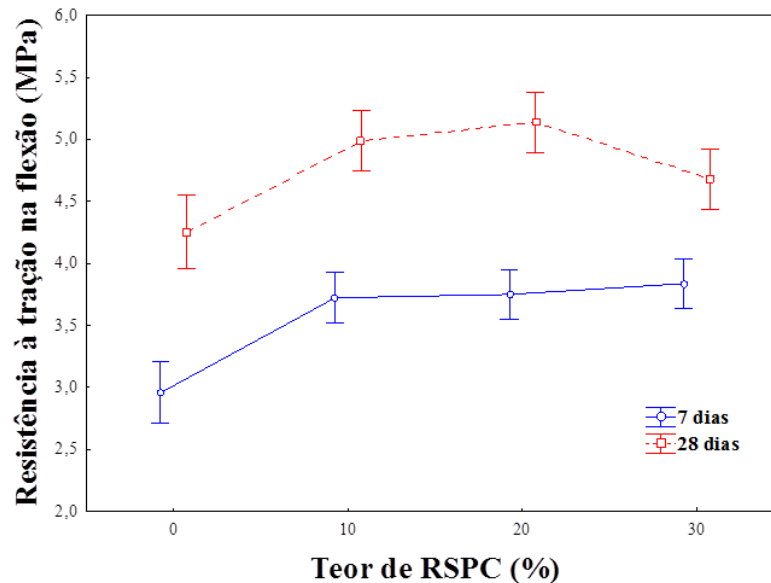


Figura 52 - Comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão aos 7 dias e aos 28 dias de cura

A resistência à tração na flexão relativa das argamassas, aos 07 e aos 28 dias de cura, está representada na Figura 53.

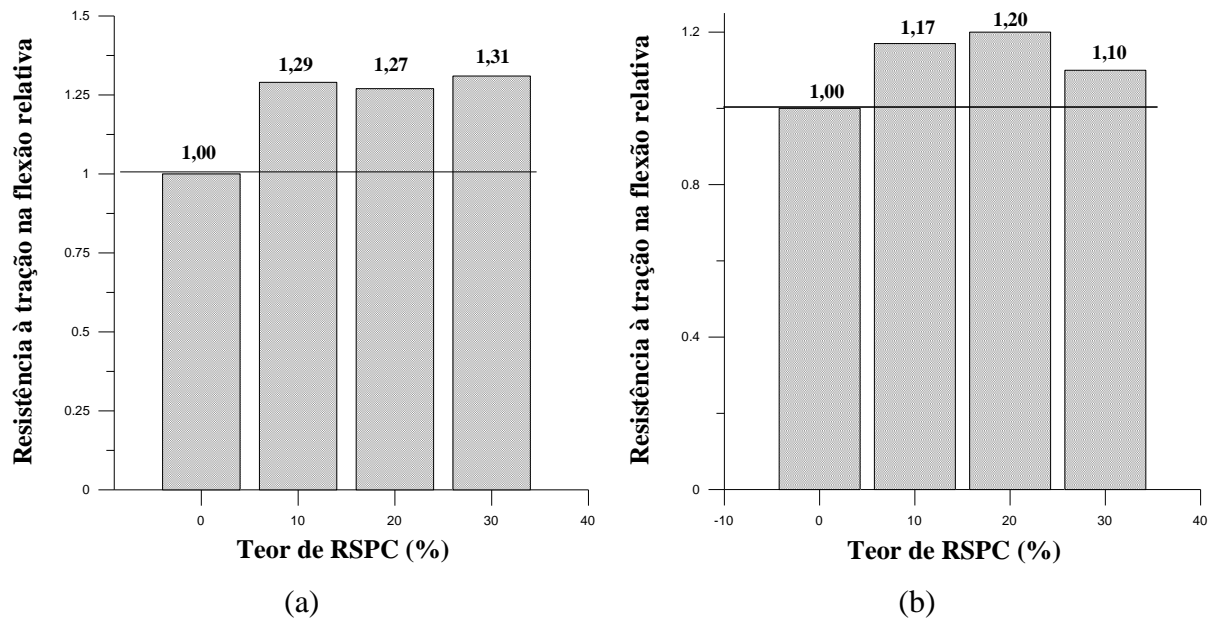


Figura 53 - Resistência à tração na flexão relativa: a) aos 7 dias; b) aos 28 dias de cura

Verifica-se que as argamassas com RSPC apresentaram resistência à tração na flexão, tanto aos 7, quanto aos 28 dias de idade, superior a da argamassa de referência, para todos os teores estudados. Aos 28 dias de cura o aumento chegou a 20% quando o teor de RSPC foi de 20%.

O melhor comportamento quanto à resistência à tração na flexão das argamassas contendo RSPC, pode ser atribuído ao fato do resíduo possuir um menor tamanho de partículas quando comparado à areia. Assim os grãos de RSPC favoreceram o efeito de preenchimento, densificando a mistura. Esta justificativa se confirma pelos resultados de absorção de água, apresentados nos itens 6.2.5 e 6.2.6. Além de atuar como fíler, o RSPC reduziu a relação a/c das argamassas, para os teores de substituição de 10 e 20%.

Comportamento semelhante foi encontrado por Kelestemur *et al.* (2014) quando utilizaram 20, 40 e 60% resíduo de serragem de mármore, em substituição à areia. As argamassas com resíduo apresentaram maior resistência à tração, em relação a de referência. O melhor comportamento foi o da argamassa com 20% do resíduo. Os autores atribuíram essa melhoria, à granulometria do resíduo de mármore, que era muito menor que a da areia utilizada, e, desta forma, o resíduo atuou como fíler, preenchendo os vazios e melhorando a interface agregado/pasta de cimento.

A argamassa com 30% de RSPC apresentou resistência à tração na flexão 10% superior a da argamassa de referência. Entretanto, proporcionou uma redução na resistência, quando comparada às argamassas 10% RSPC e 20% RSPC. Esta redução pode ser atribuída



ao fato da argamassa 30% RSPC possuir maior relação a/c que as demais argamassas contendo RSPC.

### 6.2.2 Resistência à compressão

Os resultados de médias obtidos para resistência à compressão das argamassas produzidas estão demonstrados na Tabela 39. Os resultados individuais estão expostos no Apêndice 5.

Tabela 39 - Resultados de médias de resistência à compressão das argamassas

Argamassa	Resistência à compressão (MPa) ± Sd. (MPa) (C.V. (%))	
	7 dias	28 dias
REF	7,58 ± 0,25 (3,3)	9,46 ± 0,28 (2,9)
10%RSPC	11,80 ± 0,24 (2,0)	15,66 ± 0,24 (1,5)
20%RSPC	12,88 ± 0,15 (1,1)	16,55 ± 0,22 (1,4)
30%RSPC	10,26 ± 0,38 (3,7)	15,36 ± 0,18 (1,2)

Verifica-se que o incremento no teor de RSPC proporcionou um aumento nos valores de resistência à compressão das argamassas.

Foi realizada a análise de variância para verificar estatisticamente se a idade e o teor de RSPC influenciaram os resultados de resistência à compressão. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Resultados de ANOVA para a resistência à compressão das argamassas

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
A - Tempo de cura	1	154,125	2098,86	4,08	S
B - Teor de RSPC	3	89,302	1216,12	2,84	S
AB	3	5,074	69,10	2,84	S
Erro	39	0,073			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Os resultados da ANOVA demonstraram que o teor de RSPC e a idade de cura influenciaram significativamente na resistência à compressão das argamassas estudadas.

Além da ANOVA, foi realizada a comparação múltiplas de médias e constatou-se que há diferenças significativas entre as resistências das argamassas. Verificou-se que, para a idade de 7 dias, os resultados de resistência à compressão diferiram significativamente para todos os teores pesquisados. Já para a idade de 28 dias, constatou-se que os resultados apresentados

pelas argamassas com 10% de RSPC e com 30% de RSPC não apresentaram diferença significativa entre si.

A Figura 54 mostra o comportamento das argamassas quanto a resistência à compressão.

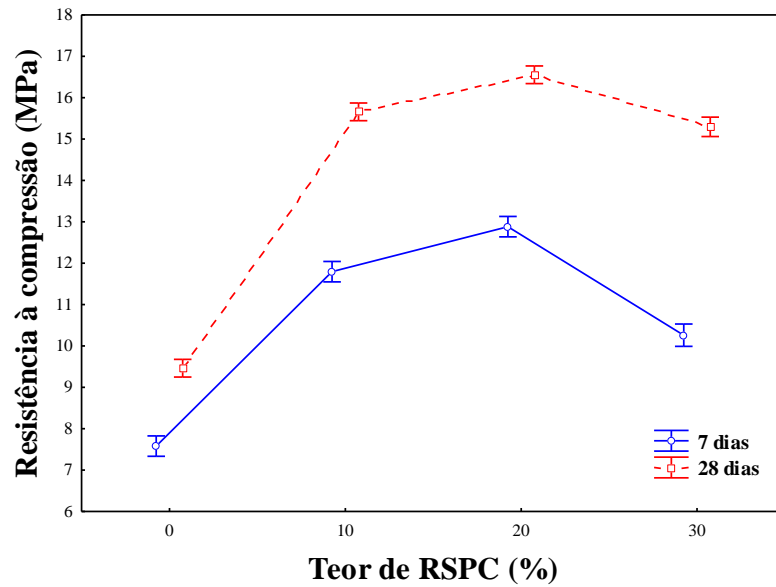


Figura 54- Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias de cura

Os resultados de resistência à compressão relativa das misturas, para as idades de 7 e 28 dias, estão apresentados na Figura 55.

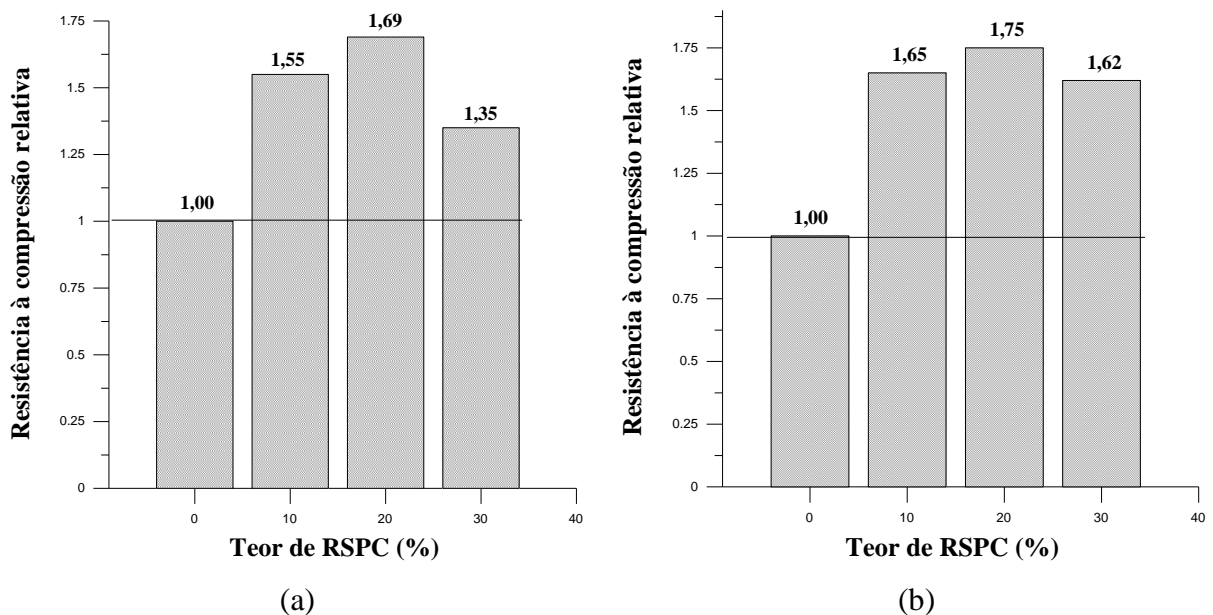


Figura 55 - Resistência à compressão relativa: a) aos sete dias; b) aos vinte e oito dias de cura

Para a idade de sete dias, a substituição de 10, 20 e 30% de areia natural por RSPC, proporcionou, respectivamente, aumento de 55, 69 e 35% na resistência à compressão, em relação à argamassa de referência. Para a idade de cura de 28 dias, as argamassas com 10, 20 e 30% de RSPC apresentaram aumento de 65, 75 e 62%, respectivamente, na resistência à compressão. Logo, o melhor resultado foi o apresentado pela argamassa 20% de RSPC.

Assim como para a resistência à tração na flexão, também pode-se atribuir a melhoria da resistência à compressão das argamassas com RSPC à granulometria do resíduo. Como o mesmo possui cerca de 90% das partículas com tamanho inferior a 14,8  $\mu\text{m}$ , o resíduo possivelmente atuou como um fíler calcário, melhorando a estrutura de poros e densificando a estrutura da argamassa. Este comportamento é semelhante aos de resistência à tração, item 6.2.1, e absorção de água, apresentados nos itens 6.2.5 e 6.2.6, o que reforça a justificativa. Salienta-se que as relações a/c das argamassas com 10% de RSPC e 20% de RSPC foram menores do que a da argamassa de referência, o que também contribuiu para essa melhoria nas resistências destas argamassas. Assim, pode-se afirmar que a substituição da areia natural pelo RSPC melhorou bastante o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão.

A argamassa com 30% de RSPC apresentou, aos 28 dias, resistência 62% superior a da argamassa de referência. Porém, este valor foi menor que os exibidos pelas argamassas 10%RSPC e 20%RSPC. Esta redução pode ser atribuída ao fato da argamassa 30%RSPC possuir maior relação a/c que as demais argamassas contendo RSPC.

Kelestemur *et al.* (2014) quando utilizaram 20, 40 e 60% resíduo de serragem de mármore, em substituição à areia encontraram comportamento semelhante. As argamassas com resíduo apresentaram maior resistência à compressão, em relação a de referência. O melhor comportamento foi o da argamassa com 20% do resíduo. Este comportamento foi atribuído pelos autores à granulometria do resíduo de mármore, que era muito menor que a da areia utilizada. Assim, o resíduo atuou como fíler, preenchendo os vazios e melhorando a interface agregado/pasta de cimento.

Balasubramanian *et al.* (2016) verificaram a influência de resíduo de granito, em substituição à areia natural, em argamassas. Os teores de substituição foram de 5, 10, 15, 20 e 25% em relação à massa de areia natural. Os resultados de resistência à compressão demonstraram que o melhor comportamento foi para a argamassa com 15% de resíduo, cuja resistência à compressão, aos 28 dias, foi 43% superior ao valor apresentado pela argamassa

de referência (sem resíduo). Os autores atribuíram esta melhoria ao melhor efeito de preenchimento proporcionado pelo resíduo de granito.

### 6.2.3 Resistência de aderência à tração

Como descrito no Capítulo 4 deste trabalho, determinou-se a resistência de aderência à tração apenas da argamassa de referência - REF e da argamassa que apresentou melhor resultado de resistência à compressão, que foi 20%RSPC.

Os resultados de médias de resistência de aderência à tração estão demonstrados na Tabela 41. Os resultados de resistência individuais encontram-se no Apêndice 6.

Tabela 41 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração

<b>Argamassa</b>	<b>Tipo de ruptura</b>	<b>Ra<sub>média</sub> (MPa) ± Sd. (MPa) (C.V. (%))</b>
REF	89% argamassa	0,67 ± 0,05 (7,7)
20%RSPC	89% argamassa	0,68 ± 0,07 (9,9)

Observa-se que o valor médio de resistência de aderência à tração apresentado pela argamassa com 20% de RSPC foi bastante próximo do valor médio apresentado pela argamassa REF. Com relação ao tipo de ruptura, verifica-se que dos doze corpos de prova ensaiados, dez (cerca de 89%), apresentaram ruptura na argamassa. Este percentual foi apresentado tanto pela argamassa REF quanto pela argamassa com 20% de RSPC.

Com o intuito de verificar se o RSPC exerceu influência na resistência de aderência à tração, foi realizada a análise de variância dos resultados, conforme exposto na Tabela 42.

Tabela 42 - Análise de Variância para resistência de aderência à tração

<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>cal</sub></b>	<b>F<sub>0,05</sub></b>	<b>Significância</b>
Teor de RSPC	1	0,00002	0,074	4,301	NS
Erro	22	0,00383			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Os resultados da ANOVA demonstraram que a substituição da areia natural pelo RSPC não exerceu influência significativa na resistência de aderência à tração.

A Figura 56 ilustra o comportamento das argamassas quanto à resistência de aderência à tração.

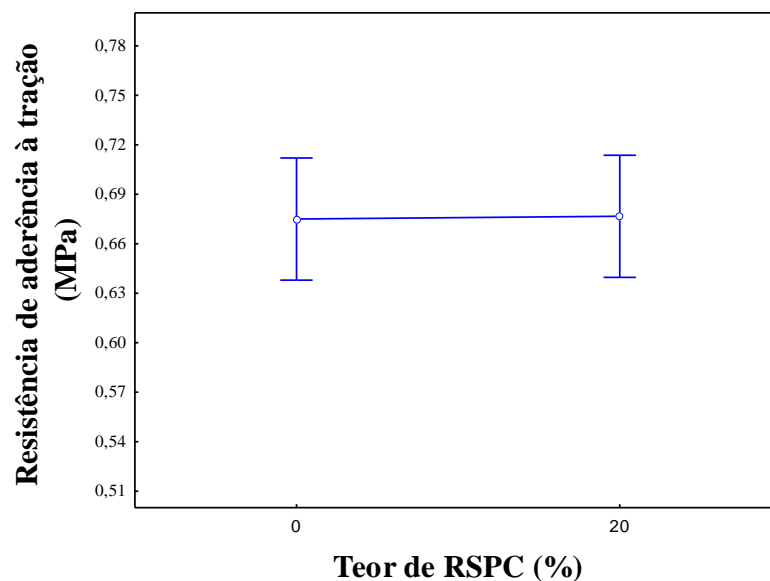


Figura 56 - Comportamento das argamassas quanto à resistência de aderência à tração

A aderência está relacionada com diversos fatores, tais como características das argamassas (reologia, adesão inicial, retenção de água, etc.), processo de execução, características do substrato e fatores externos (CARASEK, 2007)

Como o RSPC apresentou plasticidade, de acordo com o ensaio de reologia, esperava-se que a argamassa com esse resíduo apresentassem maior resistência de aderência, em relação à argamassa de referência. Porém, essa influência não se manifestou no ensaio, provavelmente devido ao fato de ter sido utilizado um traço de argamassa cujo consumo de cimento não permitiu que a plasticidade do RSPC contribuísse para adesividade da argamassa.

No ensaio de resistência de aderência à tração também foi avaliada a presença de fissuras nos painéis produzidos. Os painéis de revestimento da argamassa 20%RSPC apresentaram 2 fissuras visíveis. O que não ocorreu nos painéis da argamassa REF. A Figura 57 ilustra um aspecto das fissuras nos painéis produzidos com a argamassa 20%RSPC.



Figura 57 - Fissuras presentes no painel produzido com a argamassa 20%RSPC

A ocorrência de fissuras nos painéis produzidos com a argamassa contendo RSPC pode estar relacionada à granulometria do resíduo, que o caracteriza como filler.

Silva (2006) constatou, através da produção de painéis, que a argamassa produzida com areia de rocha calcária britada, em substituição total da areia natural, apresentou maior fissuração, quando comparada com a argamassa de referência. O autor justificou o comportamento devido ao fato da argamassa com areia de rocha britada apresentar maior módulo de elasticidade, quando comparada à argamassa com areia natural. Segundo o autor, quanto maior o módulo de elasticidade menor a capacidade do revestimento de argamassa resistir às deformações, levando à fissuração.

As argamassas contendo RSPC apresentaram maiores valores de resistência à compressão, indicando que estas também devem possuir maiores valores de módulo de elasticidade, quando comparados com a argamassa de referência. Desta forma, a argamassa 20%RSPC, como provavelmente possui maior módulo de elasticidade, é mais propícia à ocorrência de fissuras.

Deduz-se, portanto, que o elevado teor de finos do RSPC contribuíram para fissuração do painel de argamassa.

## 6.2.4 Retração por secagem

O comportamento das argamassas produzidas quanto à retração por secagem e perda de massa está apresentado na Figura 58. Salienta-se que os resultados de retração por secagem e perda de massa constam no Apêndice 7.

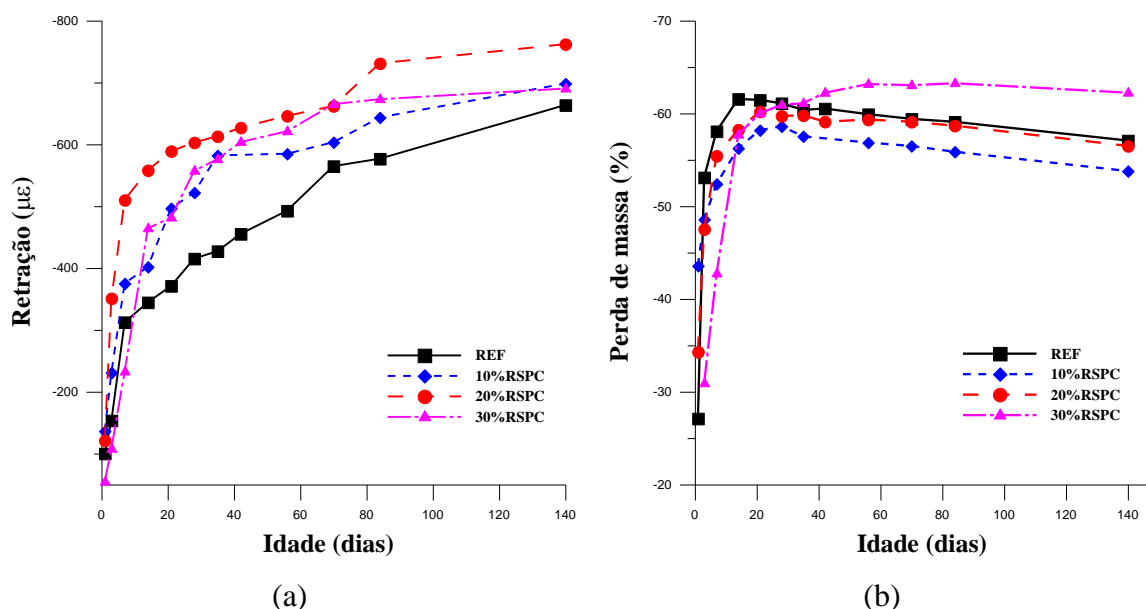


Figura 58 - Resultados médios da (a) retração por secagem e da (b) perda de massa

Com base nos resultados apresentados na Figura 58a observa-se que, de forma geral, a substituição da areia natural pelo RSPC provocou um aumento na retração por secagem das argamassas produzidas. Porém, esperava-se que a argamassa com 30%RSPC apresentasse maior valor de retração, uma vez que possui maior plasticidade, por possui maior teor de resíduo, e maior relação a/c que as demais.

Com relação aos resultados apresentados pela Figura 58b, estes demonstram que até a idade de 35 dias, após a cura úmida, as argamassas com RSPC apresentaram menor perda de massa que a argamassa de referência. Observa-se ainda, a partir dos 35 dias de cura, que a perda de massa das argamassas foi maior quanto maior foi a sua relação a/c. De fato, a relação a/c deve ser o principal fator que justifica a perda de massa das referidas misturas.

Como a argamassa REF apresentou menor retração, esperava-se que apresentasse menor perda de massa. Porém isto não ocorreu. Este comportamento pode ser explicado pelo fato do RSPC ter reduzido a formação de capilares e favorecido à redução do diâmetro destes, densificando a argamassa. Os resultados de absorção, apresentados nos itens 6.2.5 e 6.2.6, mostram que as argamassas com RSPC apresentaram menor índice de vazios e menor taxa de

absorção, o que reforça essa justificativa. Por outro lado, a plasticidade do RSPC favorece à retração. Por esta razão as argamassas contendo RSPC apresentaram uma maior retração com menor perda de massa.

A retração por secagem foi correlacionada com a perda de massa e as curvas obtidas para as misturas produzidas podem ser verificadas na Figura 59.



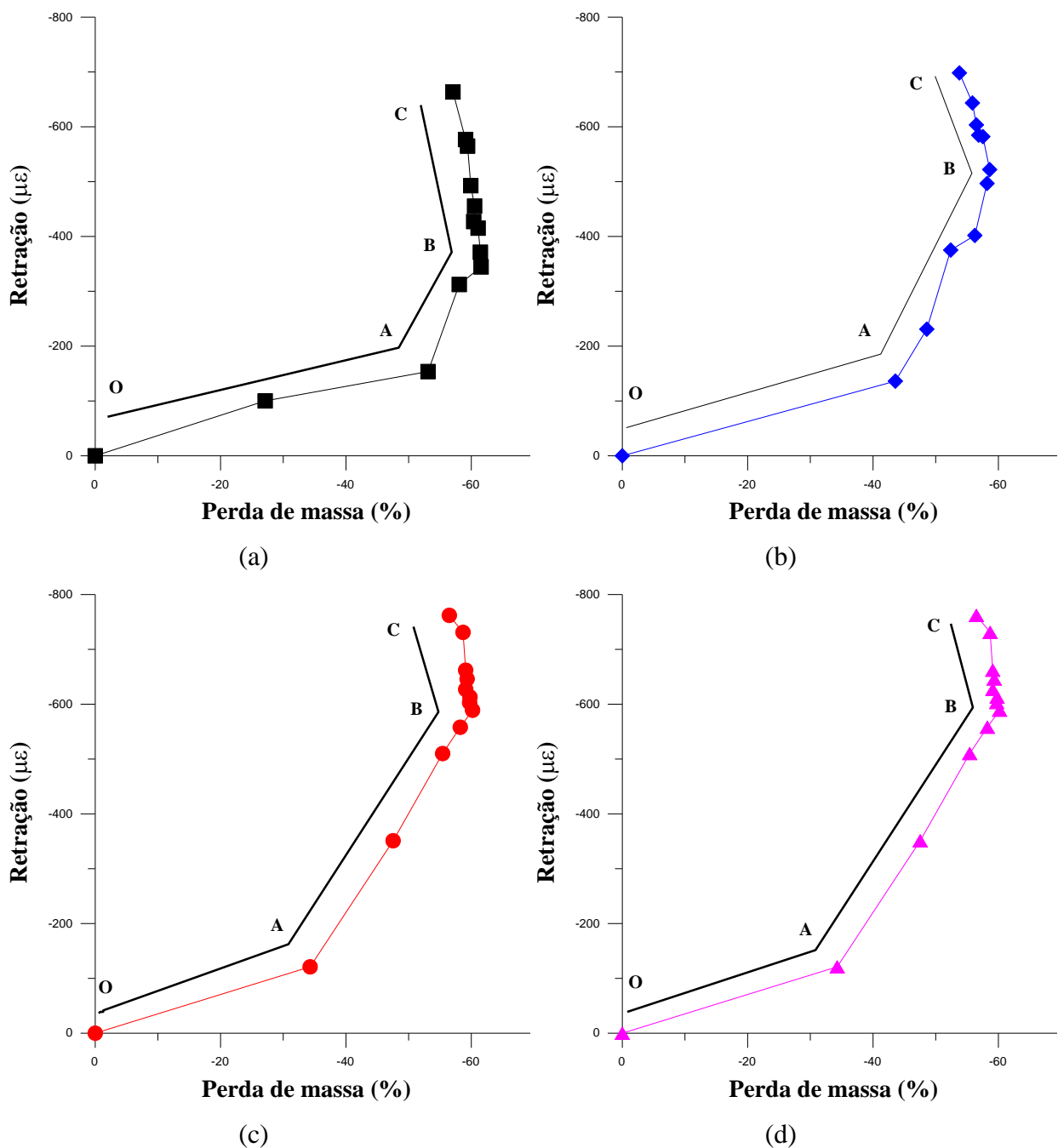


Figura 59 – Retração por secagem versus a perda de massa para as argamassas: a) REF; b) 10%RSPC; c) 20%RSPC; d) 30%RSPC

Pode-se observar nas curvas da Figura 59 três regiões distintas representadas pelas retas: OA, AB e BC. A região OA corresponde à retração devida à perda de água dos poros. A região AB, que diz respeito à retração por desprendimento de água dos capilares e a região BC geralmente está relacionada à estabilidade da perda de massa ou ao ganho de peso devido à carbonatação do material (MESBAH; BUYLE-BODIN, 1999).

Em relação às argamassas produzidas, as duas primeiras retas (OA e AB) são bem concebidas. Percebe-se uma redução do tamanho da região OA, com o incremento do teor de substituição da areia natural pelo RSPC. Como esta região corresponde à retração devida à perda de água dos poros, logo, está relacionada com a relação a/c das misturas cimentícias. Portanto, pode-se inferir que a redução desta região nas argamassas com RSPC ocorreu devido à diminuição da relação a/c, proporcionada pelo resíduo, bem como à diminuição de porosidade acarretada pelo seu efeito fíler.

Observa-se que à medida que há o incremento no teor de substituição a região correspondente à retração devida à perda de água dos capilares (região AB) é maior. Este comportamento pode ser explicado devido a maior tensão capilar decorrente do refinamento de poros proporcionado pelo RSPC.

Na terceira região, correspondente à zona BC, para as curvas obtidas observa-se que o ganho de massa foi de cerca de 2% para todas as argamassas pesquisadas. Este ganho pode ser atribuído à carbonatação da argamassa.

Os resultados de retração obtidos para as argamassas com RSPC diferem dos obtidos por Silva (2011). O referido autor verificou que uma argamassa produzida com agregado proveniente da britagem de rocha calcária (com teor de finos de 12,72%) apresentou menor retração por secagem, quando comparada à argamassa de referência (com teor de finos de 7,26%). O autor explicou que a relação água/cimento foi fator determinante no comportamento apresentado. A argamassa produzida com agregado natural apresentou relação a/c cerca de 9% superior à produzida com agregado de rocha calcária britada.

No presente estudo, as argamassas com RSPC, apesar de apresentarem menor relação a/c que a argamassa REF (com excessão à argamassa 30% de RSPC), apresentaram maiores valores de retração. Este efeito pode ser atribuído às características do RSPC, pois o finos do resíduo atuaram como fíler, reduzindo os capilares, acarretando num aumento da retração das argamassas.

### **6.2.5 Absorção por imersão e índice de vazios**

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção por imersão e índice de vazios estão apresentados na Tabela 43. Os resultados individuais constam no Apêndice 8.

Tabela 43 - Resultados de médias de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>A<sub>média</sub> (%) ± Sd (%) (CV (%))</b>	<b>IV<sub>médio</sub>(%) ± Sd (%) (CV (%))</b>	<b>ME<sub>médio</sub>(%) ± Sd (%) (CV (%))</b>
REF	14,77 ± 0,13 (0,8)	27,78 ± 0,13 (0,5)	2,60 ± 0,01 (0,1)
10%RSPC	13,42 ± 0,67 (5,0)	25,37 ± 1,02 (4,0)	2,53 ± 0,03 (1,3)
20%RSPC	11,00 ± 0,19 (1,7)	21,08 ± 0,41 (2,0)	2,43 ± 0,02 (0,8)
30%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.

A partir dos resultados apresentados, pode-se verificar que a substituição da areia natural pelo RSPC acarretou na redução dos valores obtidos para a absorção de água e o índice de vazios das argamassas produzidas.

A influência do teor de RSPC nos resultados foi avaliada estatisticamente através da análise de variância, cujos resultados estão apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 - Análise de Variância para absorção de água por imersão e índice de vazios

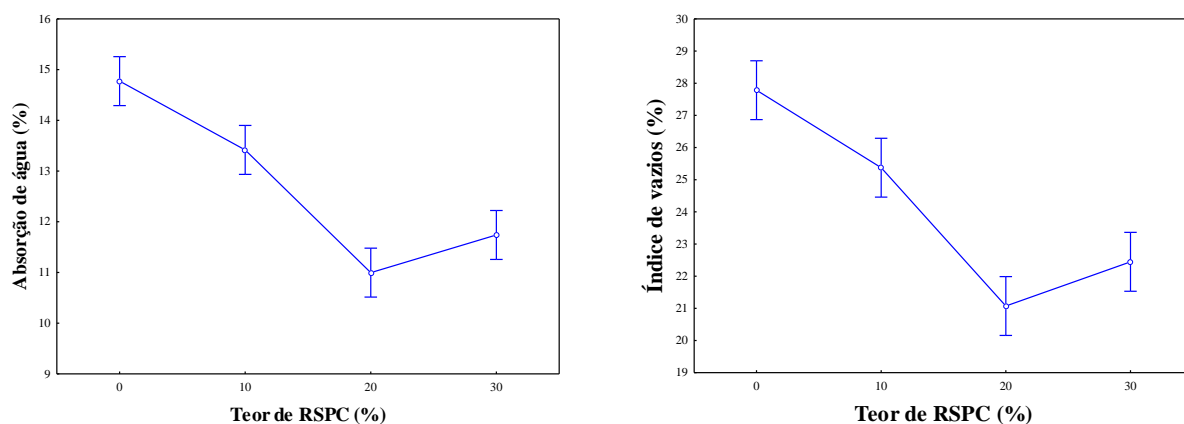
<b>Propriedade avaliada</b>	<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>cal</sub></b>	<b>F<sub>0,05</sub></b>	<b>Significância</b>
Absorção de água	Teor de RSPC	3	8,631	65,70	4,07	S
	Erro	8	0,131			
Índice de vazios	Teor de RSPC	3	27,063	57,28	4,07	S
	Erro	8	0,473			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

As avaliações estatísticas demonstraram que a substituição da areia pelo RSPC influenciou significativamente no comportamento das argamassas, tanto na absorção de água por imersão quanto no índice de vazios.

Foi realizada também a comparação múltipla de médias, tanto para propriedade de absorção de água, quanto para o índice de vazios e constatou-se que há diferença significativa entre todos os teores avaliados, para ambas as propriedades.

O comportamento das argamassas quanto à absorção de água por imersão e índice de vazios pode ser observado através da Figura 60.

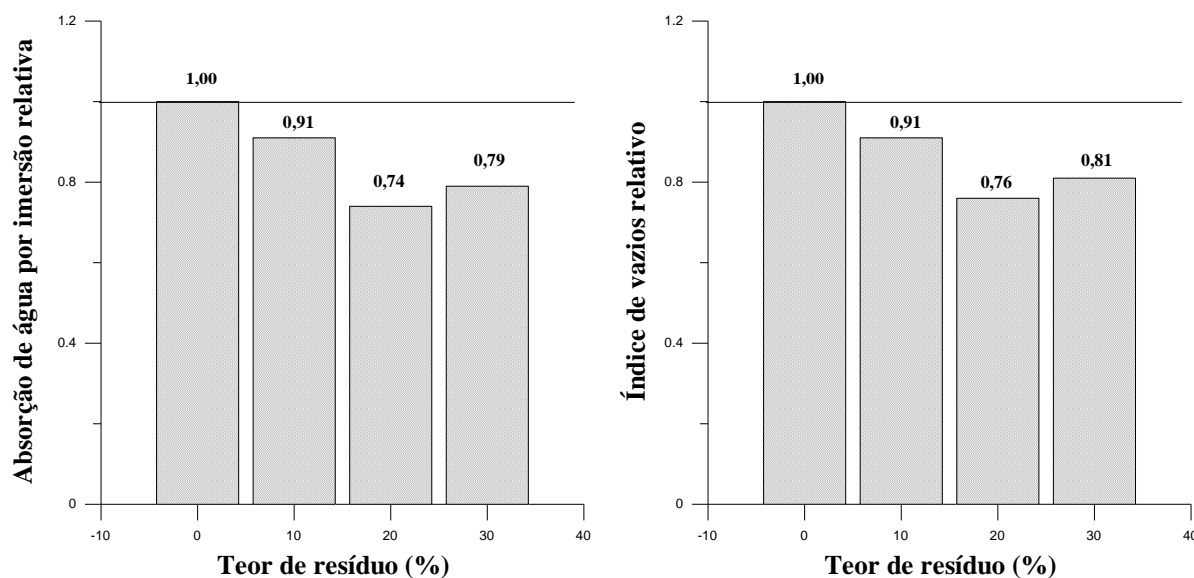


(a)

(b)

Figura 60 - Comportamento das argamassas quanto: a) absorção de água; b) índice de vazios

A Figura 61 ilustra os resultados de médias relativas das argamassas quanto à absorção de água por imersão e de índice de vazios, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 61 - a) Absorção de água por imersão relativa e b) Índice de vazios relativo

Verifica-se que houve uma diminuição na absorção de água e no índice de vazios devido à substituição da areia natural pelo RSPC. O melhor comportamento foi o apresentado pela argamassa com 20% de RSPC que apresentou uma redução de cerca de 25%, para ambas as características.

A melhoria na absorção de água e índice de vazios no presente trabalho pode ser atribuída à finura do RSPC, pois o mesmo por ser basicamente constituído por um material

com tamanho de partícula inferior a 75 µm, provavelmente atuou melhorando o empacotamento das partículas do sistema, reduzindo a porosidade das misturas.

O comportamento das argamassas quanto à absorção e índice de vazios está coerente com os resultados de resistência à compressão: as argamassas com RSPC apresentaram maior resistência à compressão. O que reforça a justificativa de que o resíduo proporcionou maior densificação da matriz.

Resultado semelhante ao apresentado nesta pesquisa foi encontrado por Silva (2011) quando avaliou a influência da areia de rocha calcária calcítica britada, na absorção de água por imersão e o índice de vazios de argamassas. A areia de rocha calcária calcítica britada apresentava um teor de finos cerca de duas vezes maior que o do agregado natural utilizado. A absorção de água da argamassa com agregado de britagem de rocha calcária foi 20% inferior em relação à absorção da argamassa de referência. Já o índice de vazios da argamassa com areia de rocha calcária britada foi 11% menor que o da argamassa de referência. Embora o autor não tenha justificado, este comportamento pode ser atribuído a melhor efeito de preenchimento proporcionado pela areia de rocha calcária britada.

### 6.2.6 Absorção por capilaridade

As curvas referentes ao ganho de massa médio versus a raiz do tempo de cada mistura de argamassa produzida estão ilustradas na Figura 62.

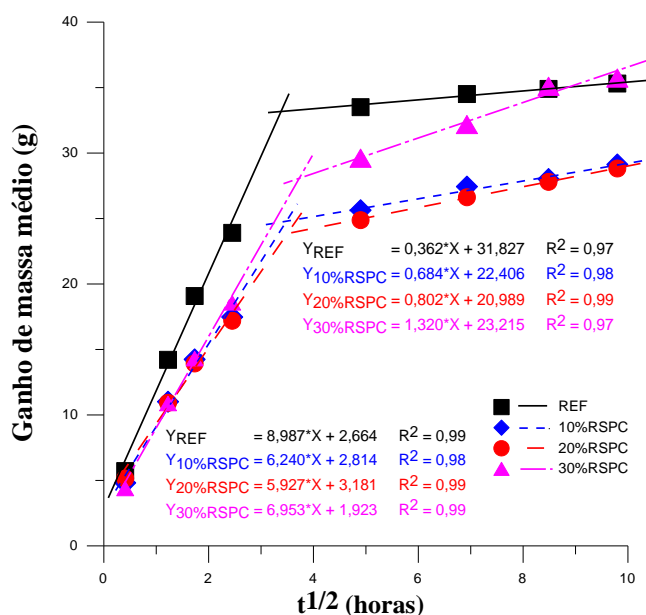


Figura 62 - Relação entre o ganho de massa médio e a raiz do tempo das argamassas produzidas

A taxa de absorção por capilaridade foi obtida através da relação entre a inclinação da reta referente à absorção inicial e a área dos corpos de prova. Os valores de taxa de absorção média estão demonstrados na Tabela 45. Salienta-se que os resultados individuais encontram-se no Apêndice 9.

Tabela 45 - Resultados de médias de taxa de absorção por capilaridade das argamassas

<b>Argamassa</b>	<b>TA<sub>média</sub> (g/h<sup>1/2</sup>*cm<sup>2</sup>) ± Sd. (g/h<sup>1/2</sup>*cm<sup>2</sup>) (C.V. (%))</b>
REF	0,55 ± 0,03 (5,0)
10% RSPC	0,38 ± 0,01 (0,5)
20% RSPC	0,34 ± 0,01 (2,4)
30% RSPC	0,43 ± 0,01 (1,3)

TA – Taxa de absorção; Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Analisando-se os resultados observa-se que os valores da taxa de absorção média para as argamassas com RSPC apresentaram-se inferiores ao valor apresentado pela argamassa de referência.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para verificar se a substituição da areia natural pelo RSPC influenciou significativamente os resultados de absorção de água por capilaridade. A Tabela 46 ilustra os resultados da análise de variância.

Tabela 46 - Análise de Variância para a taxa de absorção

<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>cal</sub></b>	<b>F<sub>0,05</sub></b>	<b>Significância</b>
Teor de RSPC	3	0,0236	104,73	4,07	S
Erro	8	0,0002			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F<sub>cal</sub> – Valor calculado de F; F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

O resultado apresentado pela Tabela 46 demonstra que a substituição da areia natural pelo RSPC exerceu influência significativa na taxa de absorção das argamassas produzidas.

Com o intuito de verificar se a influência significativa se deu entre todos os teores avaliados, foi realizada a comparação múltipla de médias. Constatou-se que a diferença apresentou-se significativa entre todos os teores de substituição pesquisados.

A Figura 63 ilustra o comportamento das argamassas produzidas quanto à taxa de absorção por capilaridade.

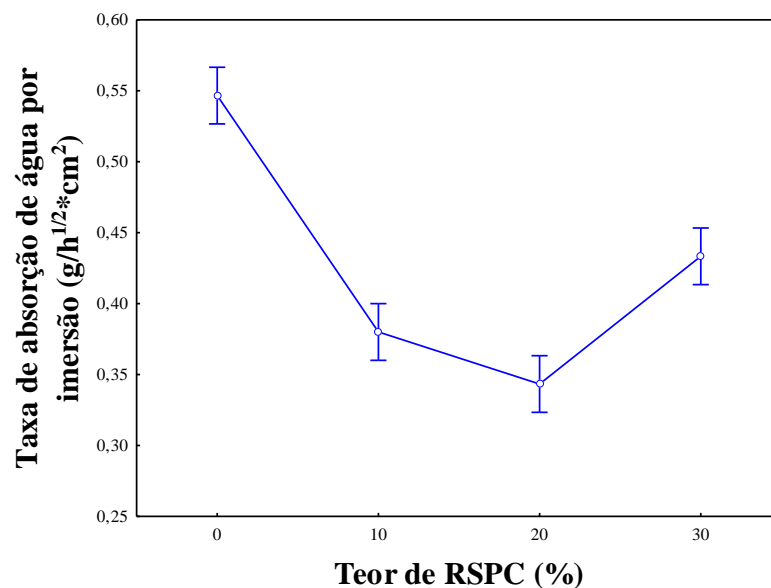


Figura 63 - Comportamento das argamassas quanto à taxa de absorção por capilaridade

A taxa de absorção por capilaridade relativa está apresentada na Figura 64.

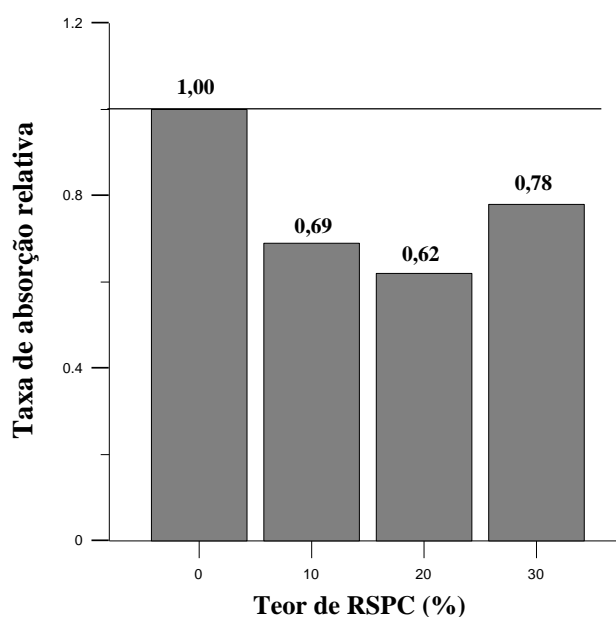


Figura 64– Taxa de absorção por capilaridade relativa das argamassas produzidas

A partir dos resultados apresentados pode-se observar que a substituição da areia natural pelo RSPC provocou, de maneira geral, uma redução na taxa de absorção das argamassas produzidas. Esta redução foi de 31, 38 e 22% para os teores de substituição de 10, 20 e 30%, respectivamente.

Bederina *et al.* (2013) verificaram que a utilização de 50 e 100% de areia de rocha calcária britada, com alto teor de finos, em substituição da areia natural em argamassas proporcionou uma redução do coeficiente de capilaridade das mesmas. A redução chegou a cerca de 20% para argamassa com 50% de areia de rocha calcária britada. Os autores atribuíram este comportamento ao aumento da compactidade das misturas proporcionado pelo agregado de rocha calcária.

No presente estudo, o comportamento das argamassas quanto à absorção por capilaridade estão coerentes com os de absorção por imersão e resistência à compressão. O que reforça a justificativa de que o RSPC proporcionou um melhor efeito de preenchimento nas misturas, as tornando mais densas. Consequentemente, houve diminuição dos capilares.



## 7. CONCLUSÃO

O reaproveitamento do resíduo de serragem de pedra Cariri - RSPC em matrizes cimentícias pode ser uma alternativa para a redução do impacto ambiental proporcionado pela disposição inadequada deste rejeito proveniente do processo produtivo da pedra Cariri.

Com o objetivo de possibilitar a utilização do RSPC na indústria da construção civil, esta pesquisa verificou a influência da substituição parcial da areia natural pelo referido resíduo na produção de argamassa. Com base nos resultados obtidos chegou-se às conclusões conforme apresentadas a seguir. Vale salientar que tais conclusões referem-se aos resultados obtidos a partir das argamassas produzidas estritamente de acordo com os materiais e proporcionamentos específicos, detalhados no programa experimental.

i) Com relação à caracterização do resíduo de serragem de pedra Cariri:

- a) o resíduo é composto basicamente por óxido de cálcio (95%);
- b) através do difratograma de raios – X, foi possível verificar que o óxido de cálcio apresenta-se tipicamente cristalino, sob a forma de calcita;
- c) o RSPC apresentou uma dimensão média de 4,5  $\mu\text{m}$ , o que o caracteriza como um fíler;
- d) embora o RSPC não atenda ao limite de plasticidade, que o caracterize como solo plástico, conforme estabelece a norma NBR 7180, (ABNT, 1984), observou-se que o mesmo apresentou plasticidade através do ensaio de reologia.

ii) Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco:

- a) com a fixação do índice de consistência em  $260 \pm 5$  mm, a substituição do agregado natural pelo RSPC acarretou na redução da relação a/c, para as argamassas 10%RSPC (8%) e 20%RSPC (3,5%) e no aumento desta para a argamassa 30%RSPC (4,5%).
- b) a substituição da areia natural pelo RSPC acarretou num aumento da retenção de água das argamassas produzidas, sendo este de até 43% para a argamassa 30%RSPC;
- c) a densidade de massa das argamassas aumentou com o incremento do teor de RSPC na composição das mesmas;
- d) a utilização do RSPC proporcionou uma redução do teor de ar incorporado para todas os teores utilizados. Essa redução chegou a 67% para a mistura contendo 30% de RSPC;

e) a partir do ensaio de *squeeze-flow* verificou-se que o a utilização de RSPC tornou as argamassas mais plásticas, facilitando sua aplicação/execução.

iii) Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido:

a) as argamassas com RSPC apresentaram resistência à tração na flexão, tanto aos 7, quanto aos 28 dias de idade, superior a da argamassa de referência, para todos os teores estudados. O aumento chegou a cerca de 20% para o teor de substituição de 20%, isso aos 28 dias;

b) a resistência à compressão das argamassas contendo RSPC foram maior tanto para a idade de 7 dias quanto para a de 28 dias. O aumento na resistência chegou a 75% para a argamassa com 20% de RSPC, aos 28 dias;

c) a substituição da areia natural pelo RSPC não exerceu influência significativa na resistência de aderência à tração;

d) as argamassas com RSPC apresentaram maiores valores de retração, para todos os teores estudados;

e) a substituição da areia natural pelo RSPC proporcionou redução na absorção de água por imersão e no índice de vazios das argamassas. O melhor comportamento foi o apresentado pela argamassa com 20% de RSPC que apresentou uma redução de cerca de 25%, para ambas as propriedades;

f) as argamassas com RSPC apresentaram menor taxa de absorção de água por capilaridade, para todos os teores pesquisados. A argamassa 20%RSPC foi a que proporcionou a maior redução na taxa de absorção (38%).

Pode-se verificar que a substituição da areia natural pelo resíduo de serragem de pedra Cariri proporcionou melhoria tanto nas propriedades da argamassa no estado fresco, quanto no estado endurecido. Com exceção da retração, que foi maior para as argamassas com RSPC e a resistência de aderência à tração, que foi equivalente à argamassa de referência. Desta forma, conclui-se pela viabilidade da utilização do RSPC em substituição ao agregado natural.

De modo geral, o teor de 20% de RSPC apresentou melhor comportamento.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tem-se convicção que o presente trabalho não esgotou todas as possibilidades de estudo quanto às argamassas contendo RSPC, desta forma sugere-se como trabalhos futuros:

- verificar a influência do RSPC no módulo de elasticidade das argamassas;
- realização do ensaio de carbonatação e ataque por sulfatos nas argamassas contendo RSPC;
- avaliação da microestrutura das argamassas através dos ensaios de microscopia;
- avaliar a influência do RSPC em argamassa projetada.

## 9. 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](https://issuu.com/abirochas/docs/abirochas_noticia_4). Acessado em: 19 de dezembro de 2016.

ABIRROCHAS- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço 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](http://www.abirochas.com.br/noticia.php?eve_id=4012). Acessado em: 19 de dezembro de 2016.

ADECE – Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará S. A. 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.

AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2658-2663, 2010.

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.

ARRUDA, C. M. R., RIBEIRO, R. C. da C., Estudo da influência de resíduos de rochas carbonáticas ornamentais na geração de compósitos poliméricos. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-CETEM, 20. **Anais...** 2012.

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D.. **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 673p.

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 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro. ABNT 2014.

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 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 11758**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro. ABNT, 1991.

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 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.

BEDERINA, M.; MAKHLOUFI, Z.; BOUZIANI, T. Effect of limestone fillers on the physico-mechanical properties of limestone concrete. **Science Direct. Physics Procedia**, v. 21, p. 28-34, 2011.

BEDERINA, M.; MAKHLOUFI, Z.; BOUNOUA, A.; BOUZIANI, T.; QUENEUEDEC, M. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 146-158, 2013.

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.

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.

BEZERRA, L. M. A. Análise dos impactos socioambientais decorrentes da mineração na Chapada do Araripe - Nova Olinda/Ceará. **GEOSABERES-Revista de Estudos Geoeeducacionais**, 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.

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..

CARASEK H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Organizador/Editor). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2007.

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.

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.

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.

CENSO DEMOGRÁFICO 2010. **Características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

CHIODI FILHO, C. **Aspectos de interesse sobre rochas ornamentais e de revestimento**. Dezembro de 2002. Disponível em: <[https://issuu.com/abirochas/docs/aspectos\\_interesse](https://issuu.com/abirochas/docs/aspectos_interesse)> Acesso em 04 de janeiro de 2016.

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.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010.

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

DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L.; CAMON, J. L.; ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S. Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC, 55. **Anais...**2013.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro 2010**. Brasília, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Distritos mineiros do Estado do Ceará**. Fortaleza: DNPM 10.º Distrito, 2000, 54p.

ELMOATY, A. E. M. A.. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743-752, 2013.

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.

FREITAS, C; COSTA, M. R. M. M. Estudo da influência da distribuição granulométrica no desempenho de argamassas com areia britada. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13, 2010, Canela. **Anais...** 2010.

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, Jardel, Pereira, **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.

GONÇALVES, G. P.; ALXANDRE, J.; DIAS, D. P; DIAS JÚNIOR, N. S.; ANDERSON, R. B. Incorporação de resíduo proveniente de usina de beneficiamento de mármore do município de Cachoeiro do Itapemirim na confecção de argamassas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 19, **Anais...** Campos do Jordão, 2010.

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.

KAVAS, T.; OLGUN, A. Properties of cement and mortar incorporating marble dust and crushed brick. **Ceramics Silikaty**, v. 52, n. 1, p. 24, 2008.

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.

KELHAM, S. A. Water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 10, p. 106-110, 1988.

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

MATTA, V. R. P.; APOLINÁRIO, E. C.A; SANTOS, G. R. S; RIBEIRO, D. V. Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho de argamassas de cimento Portland no estado endurecido. **Periódico Eletrônico: Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 2013.

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.

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.

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.

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.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze flow. **Journal of materials science**, v. 29, n. 5, p. 1374-1381, 1994.

MOHAMADIEN, Hassan A. The Effect of marble powder and silica fume as partial replacement for cement on mortar. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, v. 3, n. 2, p. 418, 2012.

MONTANI, C. **Relatório mármore e rochas no mundo 2015 – Dossiê Brasil**. Ed. Casa di Edizioni in Carrara. 41 p. 2015. Disponível em: <https://issuu.com/abirochas/docs/dossierbrasile2015>, acesso em 05 de janeiro de 2016.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. da S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus, Feira de Santana**, v. 26, n. 1, p. 49-61, 2002.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, 2011.

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.

QUEIROZ, F. C.; FRASCÁ, M. H. B. de O. Estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. **Exacta**, v. 6, n. 1, p. 83-92, 2008.

QUEIROZ, J., RIBEIRO, R., SOUZA, N. Utilização de resíduos de rochas ornamentais na completação de poços de petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 54. **Anais...** Natal. 2014

RAI, B.; NAUSHAD, K. H.; ABHISHEK, K.; RUSHAD, T. S.; DUGGAL, S. K. Influence of marble powder/granules in concrete mix. **International journal of civil and structural engineering**, v. 1, n. 4, p. 827, 2011.

REIS, A. S.; TRISTÃO, F. A. Ladrilho hidráulico piso tátil com adição de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, p. 409-419, 2010.

SALES, A. T. C.; SÁ, B. R. C. de; SANTOS, D. de G. Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15. **Anais...** Maceió, 2014.

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.

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, 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.

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.

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.

SOROKA, I.; SETTER, N. The Effect of Fillers on Strength of Cement Mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 7 Issue 4 pg. 449–456, 1977.

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.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE 1 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS**

Tabela 47 – Resultados individuais de retenção de água das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>Retenção de água (%)</b>
REF	59
	60
10%RSPC	78
	78
20%RSPC	83
	83
30%RSPC	86
	86

**APÊNDICE 2 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA DENSIDADE DE MASSA DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS**

Tabela 48 – Resultados individuais de densidade de massa das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>Densidade de massa</b>
REF	2004
	2008
10%RSPC	2057
	2052
20%RSPC	2118
	2123
30%RSPC	2138
	2136

**APÊNDICE 3 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS**

Tabela 49 – Resultados individuais de teor de ar incorporado das argamassas produzidas

<b>Argamassa</b>	<b>Teor de ar incorporado (%)</b>
REF	9,4
	9,2
10%RSPC	8,3
	8,5
20%RSPC	5,0
	4,8
30%RSPC	3,1
	3,2

**APÊNDICE 4 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS**

Tabela 50 – Resultados individuais de resistência à flexão das argamassas produzidas

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
10%RSPC	3,77	4,99
	3,66	5,13
	3,74	4,86
20%RSPC	3,82	4,97
	3,70	5,30
	3,74	5,14
30%RSPC	3,56	4,77
	4,06	4,41
	3,89	4,86

\* Valor discrepante não considerado, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005)

**APÊNDICE 5 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS**

Tabela 51 – Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas produzidas

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
10%RSPC	11,83	15,66
	11,41	15,37
	12,01	15,43
	11,56	16,09
	12,07	15,64
	11,89	15,77
20%RSPC	12,84	16,80
	13,04	16,80
	12,94	16,68
	12,58	16,32
	12,96	16,49
	12,94	16,23
30%RSPC	9,87	15,20
	9,76	15,12
	10,61	15,48
	10,35	15,28
	9,39*	15,67
	10,71	15,40

\* Valor discrepante não considerado, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005)



**APÊNDICE 6 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO**

Tabela 52 – Resultados individuais de resistência de aderência à tração

<b>Teor de Resíduo (%)</b>	<b>Tipo de ruptura</b>	<b>Ra (MPa)</b>
0	1/3 substrato	0,75
	argamassa	0,68
	argamassa	0,69
	substrato	0,67
	argamassa	0,64
	argamassa	0,78
	argamassa	0,59
	argamassa	0,63
	argamassa	0,66
	argamassa	0,68
	argamassa	0,71
	argamassa	0,62
20	argamassa	0,73
	argamassa	0,74
	argamassa	0,56
	argamassa	0,67
	substrato	0,72
	argamassa	0,71
	argamassa	0,58
	argamassa	0,72
	argamassa	0,64
	argamassa	0,73
	argamassa	0,74
1/3 substrato	0,58	

## APÊNDICE 7 - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA E RETRAÇÃO POR SECAGEM

Tabela 53 – Resultados de perda de massa e retração por secagem das argamassas produzidas

Tempo de cura (dias)	REF		10%RSPC		20%RSPC		30%RSPC	
	Perda de massa (%)	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Perda de massa (%)	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Perda de massa (%)	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Perda de massa (%)	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )
1	-27,1	-100,1	-43,6	-136,2	-34,3	-121,0		-54,5
3	-53,1	-153,5	-48,6	-231,0	-47,5	-351,0	-30,9	-107,7
7	-58,1	-312,4	-52,4	-375,2	-55,4	-510,0	-42,7	-232,6
14	-61,6	-344,5	-56,2	-401,9	-58,2	-558,0	-57,7	-464,1
21	-61,5	-371,2	-58,2	-496,7	-60,2	-589,0	-60,0	-481,4
28	-61,1	-415,2	-58,6	-522,0	-59,7	-603,0	-60,9	-557,2
35	-60,4	-427,3	-57,5	-582,1	-59,8	-613,0	-61,1	-575,9
42	-60,5	-455,3	-57,1	-582,7	-59,1	-627,0	-62,2	-603,8
56	-59,9	-492,7	-56,9	-584,8	-59,3	-646,0	-63,2	-621,1
70	-59,4	-564,7	-56,5	-603,4	-59,1	-662,0	-63,0	-665,0
84	-59,1	-576,8	-55,9	-643,5	-58,7	-731,0	-63,3	-672,9
140	-57,1	-663,6	-53,8	-698,3	-56,5	-762,0	-62,2	-690,2

## APÊNDICE 8 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Tabela 54 – Resultados individuais de absorção por imersão e índice de vazios

<b>Argamassa</b>	<b>Abs (%)</b>	<b>IV (%)</b>
REF	14,74	27,75
	14,67	27,64
	14,91	27,96
10%RSPC	12,75	24,10
	14,09	26,60
	13,41	25,42
20%RSPC	10,78	20,60
	11,12	21,33
	11,09	21,29
30%RSPC	11,61	22,15
	11,92	22,85
	11,69	22,34

## APÊNDICE 9 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TAXA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tabela 55– Resultados individuais da taxa de absorção de água por capilaridade

<b>Argamassa</b>	<b>Taxa de absorção individual (g/h<sup>1/2</sup>*cm<sup>2</sup>)</b>
REF	0,58
	0,53
	0,53
10%RSPC	0,38
	0,38
	0,38
20%RSPC	0,35
	0,34
	0,34
30%RSPC	0,44
	0,43
	0,43