

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento
Portland branco**

Natália dos Santos Petry

Orientadoras: Angela Borges Masuero
Ana Paula Kirchheim

Porto Alegre
2015

Natália dos Santos Petry

**USO DE RESÍDUOS DE ÁGATA COMO AGREGADO EM
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmica. Orientação: Profa. Dra. Angela Borges Masuero e Profa. Dra. Ana Paula Kirchheim.

Porto Alegre

2015

CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos Petry, Natália

Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco / Natália dos Santos Petry. -- 2015.

180 f.

Orientadora: Angela Borges Masuero.

Coorientadora: Ana Paula Kirchheim.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. resíduo de ágata. 2. argamassa de cimento Portland branco. 3. propriedades mecânicas. 4. durabilidade. I. Borges Masuero, Angela, orient. II. Kirchheim, Ana Paula, coorient. III. Título.

NATÁLIA DOS SANTOS PETRY

**USO DE RESÍDUOS DE ÁGATA COMO AGREGADO EM
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de abril de 2015

Prof.a. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Prof.a. Ana Paula Kirchheim
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Jardel Pereira Gonçalves
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Franciele Tiecher
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho à minha família, que é a base sólida na qual posso me apoiar para construir meus sonhos e trilhar novos caminhos.

“Nada é tão nosso quanto os nossos sonhos.”

Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Terezinha e Deoclecio, a minha irmã, Letícia, que sempre estiveram ao meu lado, me dando força, incentivo e amor. Obrigada meus amores, por sempre acreditarem no meu potencial, que por muitas vezes duvidei que tinha e principalmente por terem me ensinado o valor da educação. Ao Fábio, meu amor, que sempre me apoiou e me consolou quando tudo parecia dar errado. Aos meus tios, Maria Emilia e Camargo, obrigada pelo apoio desde os tempos da faculdade, tia obrigada por ser um exemplo e minha inspiração de amor e dedicação à docência. As minhas primas, Isa, Titi e Mari, que sempre estiveram presentes em todos os momentos.

A minha dupla incansável de orientadoras, que sempre estiveram ao meu lado, me dando suporte técnico, me incentivando nos momentos mais difíceis, queridas muito obrigada por tudo, não tenho palavras para agradecer todos os momentos de orientações, conversas, conselhos, abraços aconchegantes e puxões de orelha. Com vocês cresci como pessoa e principalmente como profissional.

A professora Denise, que em uma manhã me recebeu em sua sala e me abriu as portas para esse mundo novo, que acreditou que eu poderia agregar ao grupo de pesquisa. Profe obrigada pela paciência, pelos conselhos e orientações quando não era possível ver uma luz.

Ao professor Bonin, que sempre tinha uma resposta para todos os meus questionamentos. Ao professor João, sempre disposto a auxiliar, principalmente nas análises estatísticas.

E como não agradecer a minha nova família, que se formou com a ajudinha do destino, Ari “queridinha”, Ana e Maria, Gabi, Marlon e a Rafa, levarei comigo todos os momentos que vivemos juntos, as pizzas do sábado à noite, a lasanha dos nossos almoços de domingo e a batalha para escolhermos um filme para assistirmos juntos. As minhas amigas Simone e Carina, sempre dispostas a auxiliar.

Aos colegas e amigos do NORIE, Anderson, Mauro, Silvia, Daniel, Muri, Lais, Fernanda, Giselle, Carolzinha, Ju, Cris, Eugênio, Abrahão, Lucas, Dóris. Obrigada pela companhia, pelas conversas na salinha. Aos amigos Erich, Ana Pasuelo, Andrea e Aguida, pelos auxílios técnicos.

Ao Airton e ao Demétrius, pela paciência, dedicação e auxílio na realização dos ensaios, principalmente quando no intervalo do almoço precisavam ficar comigo rompendo corpos de prova, obrigada meninos!

As minhas eternas bolsistas, amigas de coração, Josi, Vanessa e Anne, obrigada gurias com vocês aprendi muito mais do que ensinei.

Aos meus queridos bolsista, Bruno e Leo, que estiveram sempre me auxiliando na realização das argamassas e dos ensaios. Aos bolsistas Fran, Carol e Artur que também estavam sempre dispostos a me auxiliar. E aos demais bolsistas que de forma direta ou indireta me auxiliaram.

As minhas amigas Flávia e Francieli.

Agradeço também a Carol, Ana Luiza e Carmem secretárias do PPGEC sempre prontas para ajudar.

Agradeço a CAPES pela concessão da bolsa de estudos, que possibilitou a dedicação e realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O meu muito obrigada à todos!!

RESUMO

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco**. 2015. Dissertação (mestrado em engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Nas últimas décadas, a busca pelo desenvolvimento sustentável vem influenciando indústrias de diversos setores a procurar uma destinação correta para os seus resíduos, esta ação visa reduzir os impactos ambientais gerados pelas diversas atividades de cada indústria. Neste sentido, a construção civil se mostra um setor potencial para este emprego, visto a elevada quantidade de matéria-prima de origem natural consumida. No estado do Rio Grande do Sul, onde há a terceira maior produção de pedras preciosas do Brasil, as etapas do beneficiamento de pedras, como a ágata, geram resíduos que requerem solução quanto ao seu destino final. O resíduo de ágata apresenta-se sob três formas: pó, com formato mais arredondado; agregado miúdo, alongado, e a terceira no formato de agregado graúdo, também alongado, todos de coloração clara. No entanto, sempre que se almeja empregar um resíduo, inicialmente é preciso avaliar suas possibilidades de aplicação, frente a questões de sua aplicabilidade técnica, ambiental e econômica. O presente trabalho tem por objetivo estimar a influência dos agregados de ágata, quando substituindo o agregado miúdo de calcário, tradicionalmente utilizado em matrizes cimentícias de cimento Portland branco. O estudo foi desenvolvido iniciando-se pela caracterização dos materiais que foram utilizados, passando posteriormente à realização de ensaios de caracterização de argamassas no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco foram avaliados o índice de consistência e a reologia da mistura, através da reometria rotacional e do *squeeze flow*. No estado endurecido foram avaliadas as propriedades mecânicas, através dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, e de durabilidade, avaliando a absorção de água por capilaridade e a reação álcali-agregado. Verificou-se influências significativas quanto à substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata. No estado fresco observou-se que as argamassas com pó de rolagem de ágata demandaram maior consumo de água e apresentaram maior plasticidade. Já no estado endurecido, as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata apresentaram uma resistência à compressão e resistência à tração na compressão diametral inferior quando comparadas às argamassas produzidas com calcário, com diferentes relações água aglomerante. Além disso, as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata apresentaram densidade de massa aparente e módulo de elasticidade inferior quando comparada com as argamassas com agregado miúdo de calcário. Quanto à absorção de água por capilaridade, as argamassas produzidas com pó de rolagem de ágata apresentaram menor índice de absorção, com exceção dos traços produzidos sem pó de rolagem de ágata, onde o calcário apresentou uma menor absorção de água por capilaridade. No ensaio de reação álcali-agregado, o agregado miúdo de ágata foi considerado reativo, no entanto a combinação entre este agregado e o pó de rolagem de ágata gerou resultados inócuos.

Palavras-chave: resíduo de ágata, argamassa para concreto branco, propriedades mecânicas e durabilidade .

ABSTRACT

PETRY, N. S. Use of agate waste as aggregate in white Portland cement mortars. 2015. Dissertação (mestrado em engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In recent decades, the demand for sustainable development has been influencing industries from many sectors to seek a proper destination for their waste. The use of waste for other purposes aims to reduce the environmental impacts. In this context, the civil construction industry is a potential sector for this use, since the high amount of natural raw material used, being a viable alternative to reduce their environmental impact. Thus, in the state of Rio Grande do Sul, where there is the third largest production of precious stones of Brazil, processing stages of the stones, such as agate, generate waste that requires solution in relation to its final destination. Agate residues are found in three different forms: powder, with rounded shape; fine aggregate, with elongated shape, and coarse aggregate, also with elongated shape, all light-colored. The use of waste requires knowledge of their application possibilities, trying to evaluate the feasibility of its use in the technical, environmental and economic point of view. The objective of this study was to evaluate the influence of the use of agate aggregates in mortar for white concrete, replacing limestone fine aggregate, usually employed in cementitious matrices of white Portland cement. The study started with the characterization of the materials that were used and conducting to perform the tests in fresh and hardened state. The samples in fresh state were investigated by consistency index and squeeze flow. In the hardened state, samples were subjected to compression tests, tensile strength in diametrical compression, bulk density, dynamic modulus of elasticity, and also durability tests were used to evaluate the absorption of water by capillarity and the alkali-aggregate reaction. The results have shown significant influences in the substitution of fine aggregates by agate powder. In the fresh state it was observed that the mortars with agate powder required higher consumption of water and had better plasticity. In the hardened state, it was observed that mortars with agate fine aggregate showed lower compressive and tensile strength in diametrical compression, bulk density and modulus of elasticity compared to mortars made with limestone. In addition, the mortars produced with agate powder showed lower absorption of water by capillarity, except for mixtures produced without agate powder, where the limestone causes a lower water absorption by capillarity. In the alkali-aggregate reaction the agate fine aggregate can be considered reactive. However, the combination of this aggregate and agate powder can be considered innocuous.

Keywords: Agate waste, Mortar for white concrete, Mechanical properties and Durability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE SIGLAS.....	22
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 OBJETIVOS.....	28
1.2 HIPÓTESE.....	29
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	29
1.4 LIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	29
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	29
2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	31
2.1 RESÍDUOS E SUAS APLICAÇÕES NA CONTRUÇÃO CIVIL.....	32
2.2 RESÍDUOS DE ÁGATA.....	35
3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS.....	40
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS.....	41
3.1.1 Origem.....	42
3.1.2 Composição Granulométrica.....	43
3.1.3 Forma.....	45
3.1.4 Textura superficial dos grãos.....	47
3.1.5 Reatividade dos agregados.....	48
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
4.1 ESTUDO EXPLORATÓRIO.....	54
4.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS.....	58
4.2.1 Variáveis de resposta.....	58

4.2.2	Variáveis controladas	58
4.2.3	Variáveis não controladas	58
4.2.4	Variáveis fixas	59
4.3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.3.1	Ensaio realizado para a caracterização dos materiais.....	61
4.3.1.1	Fluorescência de raio X	61
4.3.1.2	Área superficial.....	62
4.3.1.3	Granulometria a laser	62
4.3.1.4	Difração de raios X	62
4.3.1.5	Microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários.....	62
4.3.1.6	Granulometria.....	63
4.3.2	Materiais utilizados	63
4.3.2.1	Aglomerantes	63
a.	Cimento Portland branco estrutural.....	63
b.	Cimento padrão ABCP	64
4.3.2.2	Agregados miúdos.....	66
a.	Calcário	66
b.	Agregado miúdo de ágata e pó de rolagem de ágata	69
4.4	ESTUDOS EM ARGAMASSA.....	77
4.4.1	PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	77
4.4.1.1	Determinação da quantidade de material	77
4.4.1.2	Dosagem das argamassas	78
4.4.2	Ensaio realizado nas argamassas.....	79
4.4.2.1	Ensaio no estado fresco	79
a.	<i>Squeeze Flow</i>	79
b.	Reometria rotacional	81
4.4.2.2	Ensaio no estado endurecido.....	83
a.	Absorção de água por capilaridade	84
b.	Ensaio de Reação Álcali-agregado.....	85
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	88
5.1	ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	88
5.1.1	<i>Índice de consistência</i>	88
5.1.2	<i>Reometria Rotacional</i>	89
5.1.3	<i>Squeeze flow</i>	94
5.2	ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	100
5.2.1	Resistência à compressão axial.....	100

5.2.1.1	Efeito do tipo de agregado na resistência à compressão das argamassas	101
5.2.1.2	Efeito da interação de terceira ordem sobre a resistência à compressão das argamassas	102
5.2.1.3	Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão das argamassas	103
5.2.1.4	Efeito da resistência à compressão das argamassas no consumo de cimento	106
5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	108
5.2.2.1	Efeito do tipo de agregado na resistência à tração por compressão diametral das argamassas	110
5.2.2.2	Efeito da interação de terceira ordem sobre a resistência à tração por compressão diametral das argamassas	110
5.2.2.3	Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à tração por compressão diametral das argamassas	112
5.2.3	Densidade de massa aparente no estado endurecido	114
5.2.3.1	Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a densidade de massa aparente.....	115
5.2.3.2	Efeito da interação de terceira ordem sobre a densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas.....	116
5.2.3.3	Efeito da relação a/aglomerante sobre a densidade de massa aparente	117
5.2.4	Módulo de elasticidade dinâmico.....	120
5.2.4.1	Efeito da relação a/aglomerante sobre o módulo de elasticidade dinâmico.....	121
5.2.4.2	Efeito da interação de terceira ordem sobre o módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido das argamassas.....	121
5.2.4.3	Efeito da relação a/aglomerante sobre o módulo de elasticidade dinâmico.....	123
5.2.5	Absorção de água.....	125
5.2.5.1	Absorção de água ao longo do tempo	125
5.2.5.2	Absorção total de Água por Capilaridade	128
5.2.5.3	Efeito isolado do agregado sobre a absorção de água por capilaridade	129
5.2.5.4	Efeito da interação de terceira ordem sobre absorção por capilaridade no estado endurecido das argamassas	129
5.2.5.5	Efeito da relação a/aglomerante sobre a absorção de água por capilaridade	131
5.2.6	Reação álcali-agregado.....	133
5.2.7	MEV – Microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários.....	139
5.2.8	Considerações gerais do capítulo	146
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	148
6.1	CONCLUSÕES.....	148
6.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	149
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do valor das cinzas volantes conforme o desenvolvimento de novas aplicações. [Fonte: Santos (2007)]	34
Figura 2 - Mapa gemológico da região sul do Brasil. [Fonte: Juchem et al. 2001].....	36
Figura 3 – Extração de ágata nas minas: (a) escavação na área de extração; (b) geodos extraídos.	37
Figura 4 - Processo de beneficiamento dos geodos de ágata. [Fonte: CIDADE (2012)]	38
Figura 5 - Processo de beneficiamento dos geodos de ágata.....	39
Figura 6 – Distribuição Granulométrica dos Agregados [Fonte: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carneane/materiais/AULA_3_A_GREGADO_PARTE_3_2014.pdf]	44
Figura 7 – Distribuição granulométrica dos agregados; (a) Granulometria contínua; (b) Granulometria uniforme; (c) granulometria descontínua. [Fonte: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carneane/materiais/aula_3_agregado_parte_3_2014.pdf].....	44
Figura 8 – Forma dos agregados, conforme NBR 7389:2009	45
Figura 9 – Classificação da reatividade potencial do agregado, conforme NBR 15577:2008.	51
Figura 10 - Influência do teor de finos na Expansão devido à Reação Álcali-	53
Figura 11 - Massa unitária em função do teor de substituição do agregado miúdo de ágata pelo pó de rolagem de ágata	55
Figura 12 - Influência do teor de substituição de agregados miúdos por pó de rolagem de ágata na distribuição granulométrica.	57
Figura 13 – Matriz Experimental.....	57
Figura 14 – Ensaio de caracterização dos materiais utilizados	60
Figura 15 – Ensaios realizados em argamassa.....	61
Figura 16- Difrátograma de raio X do agregado miúdo de calcário.....	67
Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo de calcário	67
Figura 18 – Micrografia eletrônica por varredura através de elétrons secundários do agregado calcário com aumento de (a) 100x; (b) 200x.	68
Figura 19 – Fotografia dos grãos dos agregados miúdos de calcário retidos na peneira de malha #2,4mm	69
Figura 20 - Resíduos de ágata. (a) Fração miúda; (b) pó de rolagem	70

Figura 21 - Digratograma de raio X do agregado miúdo de ágata	71
Figura 22 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo de ágata	71
Figura 23 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata passante na peneira 150µm.....	73
Figura 24 – Micrografia eletrônica por varredura através elétrons secundários, para a visualização da morfologia do agregado miúdo de ágata com aumento de (a) 100x; (b) 200x	73
Figura 25 – Fotografia dos grãos de agregados miúdos de ágata retidos na peneira de malha #2.4mm	74
Figura 26 - Micrografia eletrônica por varredura através de elétrons secundários, para a visualização da morfologia do pó de rolagem de ágata com aumento de (a) 1000x; (b) 5000x	74
Figura 27 – Fotografia dos grãos pó de rolagem de ágata retidos na peneira de malha #2.4mm	75
Figura 28 – Execução do Ensaio – <i>Squeeze Flow</i> – (a) Aparato para o ensaio; (b) moldagem do corpo de prova; (c) cp após rasamento; (d) cp pronto para o ensaio; (e) aplicação da carga no cp; (f) cp após o ensaio.	81
Figura 29 – Equipamentos utilizados; (a) Reômetro rotacional; (b) palheta v20x10.....	82
Figura 30 - Rotina utilizada no ensaio de reometria rotacional.....	83
Figura 31 – Execução do Ensaio – Absorção de água por capilaridade: (a) Cp's sem selamento; (b) Cp com selamento lateral em resina epóxi.	84
Figura 32 – Areia do IPT separada por granulometria	86
Figura 33 – Execução do ensaio de potencial de reatividade dos agregados: (a) moldagem dos cp's; (b) desmoldagem dos cp's; (c) medição com extensômetro;.....	87
Figura 34 – Influência do tipo de agregado miúdo e do teor de substituição de pó de rolagem de ágata na relação água/aglomerante para uma mesma consistência de 225 ± 10 mm ..	89
Figura 35 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:1,5: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.	90
Figura 36 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:3: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.	91

Figura 37 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:4,5: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.	92
Figura 38 – Segregação da argamassa observada no ensaio de reologia em argamassa com agregado miúdo de ágata, traço 1:4,5, sem substituição por pó de rolagem de ágata	93
Figura 39 – Influência do tipo de AM com diferentes teores de substituição por PRA no traço 1:1,5: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 0,1 mm/s; (d) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 0,1 mm/s	94
Figura 40 - Comportamento de suspensões submetidas a baixas taxas de cisalhamento [Fonte: Adaptação de OLHERO, FERREIRA, 2004]	95
Figura 41 – Influência do tipo de agregado miúdo com diferentes teores de substituição por PRA no traço 1:3: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 0,1 mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 0,1 mm/s.....	97
Figura 42 – Influência do tipo de AM com diferentes teores de subst. por PRA no traço 1:4,5: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 0,1 mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA es com vel. de carga de 0,1	98
Figura 43 – Agregado miúdo de ágata - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão.....	101
Figura 44 – Influência do tipo de agregado, traço e teor de substituição em função da resistência à compressão aos 28 dias	102
Figura 45 – Agregado miúdo de calcário - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias	104
Figura 46 – Agregado miúdo de ágata - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias.....	104

Figura 47 – Resistência à compressão aos 28 dias estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com o AMC e teores de PRA; (b) argamassas com AMA e teores de PRA.	105
Figura 48 – Consumo de cimento teórico em função da relação a/aglomerante em argamassas com o AMC e teores de PRA.	106
Figura 49 – Consumo de cimento teórico em função da relação a/aglomerante em argamassas com o AMA e teores de PRA.	107
Figura 50 – Consumo de cimento (Kg/m ³) estimado em função relação água/aglomerante: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.	107
Figura 51 – Consumo de cimento (Kg/m ³) estimado em função da resistência à compressão aos 28 dias: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.	108
Figura 52 –Influência do tipo de agregado na resistência à tração na compressão diametral	110
Figura 53 –Influência do tipo de agregado, traço e teor de substituição em função da resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias.	111
Figura 54 –Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração por compressão diametral em argamassas com diferentes teores de substituição.....	112
Figura 55 –Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração por compressão diametral em argamassas com diferentes teores de substituição.....	113
Figura 56 – Resistência à tração por compressão diametral estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.	113
Figura 57 – Influência do tipo do agregado miúdo na densidade de massa aparente das argamassas.....	115
Figura 58 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido.....	116
Figura 59 –Influência da relação água/ aglomerante na densidade de massa aparente das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário	118
Figura 60 – Influência da relação água aglomerante na densidade de massa aparente das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata	119

Figura 61 – Densidade de massa aparente estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.	119
Figura 62 – Influência do tipo do agregado miúdo no módulo de elasticidade dinâmico.....	121
Figura 63 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.	123
Figura 64 – Influência da relação água/ aglomerante no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário	124
Figura 65 – Influência da relação água/ aglomerante no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata	124
Figura 66 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição no Módulo de elasticidade dinâmico: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA	125
Figura 67 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:1,5: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.....	126
Figura 68 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:3: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.....	127
Figura 69 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:4,5: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.....	127
Figura 70 – Influência do tipo do agregado miúdo na absorção de água por capilaridade ...	129
Figura 71 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição na absorção de água por capilaridade.....	130
Figura 72 – Influência da relação água/ aglomerante na absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário	131
Figura 73 – Influência da relação água/ aglomerante na absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata	132
Figura 74 – Absorção de água por capilaridade em função da relação água/aglomerante: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.....	132
Figura 75 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, agregado miúdo de calcário e cimento padrão	134
Figura 76 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, teores de pó de rolagem de ágata e cimento padrão.....	134

Figura 77 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de calcário, cimento padrão da ABCP	135
Figura 78 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, teores de pó de rolagem de ágata e cimento Portland branco	136
Figura 79 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de calcário, teor de 45% de pó de rolagem de ágata e cimento Portland branco	137
Figura 80 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo do IPT, teor de 30% de PRA, cimento Portland branco e cimento da ABCP	138
Figura 81 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa com traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 0% de Pó de rolagem de ágata: (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x	140
Figura 82 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 30% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x	142
Figura 83 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de calcário e 0% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x	143
Figura 84 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 30% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x	145

Lista de tabelas

Tabela 1 - Características físicas e químicas das ágatas.....	37
Tabela 2 - Características dos agregados.....	42
Tabela 3 – Classificação segundo a forma dos grãos	46
Tabela 4 – Textura superficial dos agregados	47
Tabela 5 – Propriedades do concreto x Características dos agregados	48
Tabela 6 – Caracterização Química do Cimento Portland Branco	63
Tabela 7 - Caracterização Física e Química do Cimento Portland Branco	64
Tabela 8 – Caracterização química - Cimento padrão ABCP	65
Tabela 9 - Caracterização Física e Química do Cimento padrão ABCP	65
Tabela 10 – Caracterização química do agregado miúdo de calcário	66
Tabela 11 - Caracterização física do agregado miúdo de calcário	68
Tabela 12 – Caracterização química do agregado miúdo de ágata (AMA) e pó de rolagem de ágata (PRA)	70
Tabela 13 - Caracterização física do agregado miúdo de ágata	72
Tabela 14 - Caracterização física do pó de rolagem de ágata	72
Tabela 15 – Índice de pozolanicidade com cal aos 28 dias do pó de rolagem de ágata.....	75
Tabela 16 – Índice de pozolanicidade com cimento Portland aos 28 dias do pó de rolagem de ágata.....	76
Tabela 17 – Relação água/aglomerante e água/materiais secos em função ao teor de substituição do agregado miúdo por pó de rolagem de ágata.....	79
Tabela 18- Propriedades avaliadas no estado fresco	79
Tabela 19 – Propriedades avaliadas no estado endurecido.....	83
Tabela 20 - Combinação dos agregados e aglomerantes para o ensaio de RAA.....	85
Tabela 21 – Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas confeccionadas com diferentes traços e teores de substituição dos agregados por PRA.....	100
Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 28 dias.....	101
Tabela 23 – Consumo de cimento teórico x Resistência à compressão média.....	106
Tabela 24 – Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias.....	109
Tabela 25 – ANOVA – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	109
Tabela 26 – Densidade de massa aparente média no estado endurecido de diferentes argamassas aos 28 dias	114

Tabela 27 – ANOVA – Densidade de massa aparente no estado endurecido aos 28 dias	115
Tabela 28 –Módulo de elasticidade dinâmico médio aos 28 dias	120
Tabela 29 – ANOVA – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	121
Tabela 30 –Absorção de água por capilaridade médio das argamassas confeccionadas com diferentes traços e teores de substituição dos agregados por PRA.....	128
Tabela 31 – Análise de Variância (ANOVA) – Absorção de água por capilaridade	129
Tabela 32 – Resumo dos resultados estimados das argamassas ensaios no estado endurecido estimados	146

Lista de equações

Equação 1	77
Equação 2	77
Equação 3	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

APL: Arranjo Produtivo Local

ASTM: American Society for Testing and Materials

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

DMSJ: Distrito Mineiro de Salto do Jacuí

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LACER: Laboratório de Cerâmica

LAMTAC: Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NM: Norma Mercosul

NORIE: Núcleo Orientado para Inovação na Edificação

PPGEC: Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil

RS: Rio Grande do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C: grau Celsius

%: porcentagem ou percentagem

ACV: Avaliação de ciclo de vida

a/c: relação água/cimento

Al₂O₃: Óxido de alumínio

AM: Agregado miúdo

AMA: Agregado miúdo de ágata

AMC: Agregado miúdo de calcário

CaO: óxido de cálcio

CaCO₃: Carbonato de Cálcio

CPB: Cimento Portland Branco

Cp's: Corpos de prova

cm: centímetro

cm²/g: centímetros quadrados/grama

CO₂: dióxido de carbono ou gás carbônico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

Fe₂O₃ : Óxido de ferro

g/cm³: grama/centímetro cúbico

g/cm²: grama/centímetro quadrado

GPa: Giga Pascal

h: hora

h:min: hora:minuto

kg: quilograma

kg/m³: quilograma/metro cúbico

kg/dm³: quilograma/decímetro cúbico

km²: quilômetro quadrado

K₂O: Óxido de potássio

MgO: Óxido de magnésio

mm: milímetro

MnO: Óxido de Manganês

MPa: Mega Pascal

Na₂O: Óxido de sódio

P₂O₅: Óxido de Fósforo

PRA: Pó de rolagem de ágata

RAA: Reação álcali-agregado

RCD: Resíduo de construção e demolição

RS: Resíduos Sólidos

SiO₂: Dióxido de silício

SO₃: Trióxido de enxofre

SrO: Óxido de Estrôncio

TiO₂: Óxido de titânio

t/mês: tonelada/mês

UR: umidade relativa

ZnO: Óxido de Zinco

1 INTRODUÇÃO

O uso de concreto aparente na arquitetura ganhou destaque em meados de 1950 até 1970, anos do auge do movimento modernista, onde sua utilização se dava praticamente em fachadas. Atualmente considerado um material versátil, é utilizado desde paredes, pilares, vigas e laje, pisos, pontes, entre outras, proporcionando aos projetos arquitetônicos diversidade, versatilidade e personalidade devido ao seu efeito estético. Dois grandes arquitetos iniciaram e difundiram sua utilização no Brasil, sendo eles Vilanova Artigas e Oscar Niemeyer. Segundo SANVITTO (1994), Vilanova Artigas desenvolveu uma tendência de estética própria, com volumes compactos, executados em concreto aparente. Arquitetos internacionais como Álvaro Siza, Santiago Calatrava, entre outros, também utilizam esta técnica construtiva.

Estes concretos aparentes podem ser moldados com cimento Portland branco, proporcionando uma proposta atraente e moderna para as obras, ampliando sua aceitação como elemento de composição estética (KIRCHHEIM et al., 2011).

Entretanto, o concreto branco necessita de um controle mais rígido na escolha de seus agregados, principalmente os miúdos. Desta forma, os agregados mais claros são empregados para facilitar o controle da aparência superficial dos elementos executados com este material. Para atender essa necessidade há a possibilidade da utilização de agregados como o calcário, o granito ou o mármore.

O Brasil é uma das nove regiões geográficas do mundo com excepcional volume na produção de gemas e está classificado como o maior produtor de ágata do tipo Umbu e de outras gemas. O Rio Grande do Sul não se destaca pela variedade, mas sim pela quantidade que produz, ocupando o terceiro lugar no Brasil, após Minas Gerais e Bahia (BRANCO; VIEIRO, 2004). Hartman e Tonezer (2010) afirmam que a produção de ágata e ametista no estado do Rio Grande do Sul é de 418 t/mês. Destas, 130 t/mês são transformadas na região de Soledade/RS, produzindo-se mais de 6.000 peças/mês. No processo de transformação são gerados resíduos sólidos, de 30% a 40% da pedra beneficiada, o que corresponde a aproximadamente 125 a 167 t/mês.

Conforme Betat (2006), e ainda verifica-se nos dias de hoje, o processo produtivo de pedras preciosas, como a ágata, gera resíduos que demandam um direcionamento, visto que atualmente são depositados nos pátios das empresas, ocupando grandes áreas, impermeabilizando o solo e podendo causar impactos ao meio ambiente. O autor salienta que a prioridade é a redução da quantidade de resíduos em todas as fases do processo de beneficiamento (desde a extração até o produto final). Entretanto, resíduos sempre serão gerados na maioria dos processos de beneficiamento de materiais. Na maioria das vezes estes resíduos são caracterizados por restos de pedaços de pedras, cascalhos finos, pedras quebradas e pós, nos quais a composição do material se dá pela presença de minério de cristais, ágata e ametista. Sendo que dos resíduos gerados, o pó, o lodo e os restos de pedra são os de maior ocorrência. Segundo informações do Arranjo Produtivo Local de pedras, gemas e joias (APL) (2014) de cinco empresas que trabalham com o beneficiamento de pedras roladas, juntas produzem em média 30 toneladas por mês de resíduos. O estoque dos resíduos no município de Soledade é de 250 toneladas. Salienta-se que o total de resíduos gerados possivelmente seja maior do que o informado, visto que muitas empresas ainda operam clandestinamente, além de grandes quantidades deste resíduos já foram utilizadas para a recuperação de estradas no interior do próprio município.

A construção civil apresenta-se como uma excelente alternativa para receber estes resíduos, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais, já que a extração de matérias-primas utilizada por este segmento gera grandes impactos, possui um consumo elevado de energia, bem como possui uma geração elevada de resíduos. De acordo com Chung e Lo (2007), os resíduos da construção civil representam aproximadamente 50% do fluxo de resíduos sólidos gerados pelas cidades dos países desenvolvidos, sendo que muitas vezes este valor pode chegar a mais de 60% do total de resíduos sólidos produzidos. Segundo Pinto (2005), o volume de RCD gerado no Brasil representa cerca de dois terços da massa total de resíduos sólidos gerados nas cidades.

Vem crescendo, nos últimos anos, o número de pesquisadores que se propõem a estudar métodos de reciclagem para os mais diferentes tipos de resíduos, Gonçalves (2000), Moura (2000), Masuero (2001), Santos (2007), Ling e Poon (2011), Braga et al. (2012), Brita e Saikia (2013), Silva et al. (2013), entre outros. Este fato é decorrente do aumento no custo dos materiais, causado pela escassez de matéria prima, aliada com a aplicação de leis específicas acerca da destinação final dos resíduos e de proteção ao meio ambiente, impulsionando desta maneira novos nichos na engenharia.

O aproveitamento de resíduos e/ou subprodutos industriais e agrícolas, como adição e/ou substituição, na produção de matrizes cimentícias traz muitos benefícios, podendo incrementar as propriedades das mesmas, além de possibilitar um destino sustentável aos resíduos que, de outro modo, seriam dispostos em aterros ou até mesmo em locais inapropriados.

Por possuir uma coloração clara, a britagem dos geodos de ágata produz um agregado miúdo com potencial utilização em concretos de cimento Portland branco. No entanto, para viabilizar seu emprego, se fazem necessários estudos que avaliem a viabilidade técnica, no que tange às solicitações mecânicas, tais como resistência a compressão, resistência à tração na compressão diametral, módulo de elasticidade; durabilidade, tais como absorção por capilaridade e reação álcali-agregado. Na questão ambiental a necessidade da avaliação dos impactos ambientais gerados pela extração de recursos naturais e os benefícios da utilização de resíduo no lugar estas matérias-primas. A questão econômica também é um fator a ser analisado.

Alguns estudos já foram realizados e avanços no estado da arte de sua utilização foi conseguido, no entanto ainda existem lacunas a serem respondidas. Dentre os trabalhos realizados, Cappellesso et al. (2013) demonstraram que devido sua forma lamelar após a britagem, mesmo que o agregado esteja dentro de uma distribuição granulométrica normal, o concreto produzido necessitará de finos para garantir uma trabalhabilidade adequada. Chiaro et al. (2013) salientam que o resíduo de ágata é composto por quartzo criptocristalino, identificado a partir de análises petrográficas. Esta característica indica um possível potencial reativo de agregados compostos por estes resíduos em matrizes cimentícias. Dal Bello et al. (2013) confirmaram que o agregado miúdo proveniente de resíduos de ágata apresenta potencialidade a ser reativo frente aos álcalis do cimento, fato observado através da realização de ensaio acelerado em barras de argamassa.

A pesquisa de Abreu et al. (2013) avaliou a viabilidade da utilização do pó de rolagem como adição mineral, observando que a proporção de até 10% pode substituir o cimento, tornando o concreto produzido mais sustentável. Venquiarutto et al. (2014) verificaram a possibilidade de adição de pó de rolagem de ágata como agregado miúdo em concretos convencionais, e obtiveram bons resultados frente à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade. Betat (2006) analisou a influência da substituição do agregado graúdo de basalto por agregado graúdo reciclado de ágata na resistência à compressão de concretos. O autor concluiu que a substituição do agregado graúdo influencia na resistência à compressão e no consumo de cimento, mas o mesmo não acontece quanto à demanda de água.

Já o trabalho de Bruxel et al. (2012) avaliou a adição de lodo de gemas em 5 teores, na produção de tijolos maciços, verificando que é possível incorporar até 5% deste lodo, sem prejudicar as propriedades avaliadas.

Apesar dos trabalhos já desenvolvidos, observa-se que ainda existem lacunas referentes ao estudo da composição de agregado miúdo de ágata e do pó de rolagem de ágata. O estudo da composição de agregados miúdos de ágata e do pó de rolagem de ágata em misturas cimentícias pode ser considerada com grande potencial, já que todas as pesquisas realizadas apenas analisaram a utilização dos resíduos separadamente. Assim, este trabalho propõe a análise das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas que utilizam diferentes composições de agregados reciclados de ágata na forma de pó e agregados miúdo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a análise da influência dos agregados miúdos no comportamento mecânico e de durabilidade de argamassas de cimento Portland branco, para um emprego futuro em concretos, produzidas com agregado miúdo de calcário e agregados de ágata.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos secundários desta pesquisa consistem em:

- a) avaliar a influência da substituição do agregado miúdo de calcário pelo agregado miúdo de ágata no estado fresco;
- b) avaliar a influência da substituição do agregado miúdo de calcário pelo agregado miúdo de ágata no estado endurecido;
- c) analisar a influência da substituição dos agregados miúdos (calcário e ágata) por pó de rolagem de ágata no estado fresco;
- d) analisar a influência da substituição dos agregados miúdos (calcário e ágata) por pó de rolagem de ágata no estado endurecido;

1.2 HIPÓTESE

A hipótese desta pesquisa é que a utilização do resíduo oriundo do processo de beneficiamento da ágata, como substituição ao agregado miúdo convencional (calcário), em argamassa com cimento Portland branco, é viável do ponto de vista técnico.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Está delimitado ao resíduo gerado na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

1.4 LIMITAÇÃO DO TRABALHO

Considera-se como limitações deste trabalho:

a) com relação aos resíduos:

- analisar os resíduos, agregado miúdo e pó de rolagem de ágata, de uma única empresa da cidade de Soledade/RS.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado em 7 capítulos que serão descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução, onde é mostrado um panorama geral sobre o tema que será estudado, focando nas proposições do trabalho.

O segundo capítulo refere-se a uma revisão bibliográfica a respeito do desenvolvimento sustentável, resíduos e impactos ambientais, trazendo inicialmente um apanhado sobre conceito de desenvolvimento sustentável, os resíduos em geral e sua aplicação dentro da construção civil, seguido por uma breve explanação sobre os resíduos de ágata, mostrando os diferentes tipos produzidos e suas etapas de beneficiamento, foco deste trabalho.

O terceiro capítulo trata sobre a influência dos materiais utilizados na construção, mostrando alguns exemplos de aplicação em obras civis e arquitetônicas, contextualizando sobre as características físicas e químicas do cimento branco, influência do agregado miúdo nas propriedades das matrizes cimentícias.

No quarto capítulo são apresentadas questões envolvendo durabilidade de concretos, com foco na reação álcali-agregado.

No quinto capítulo é apresentado o programa experimental, as respectivas etapas de trabalho, a caracterização dos materiais, seguido pelo estudo exploratório, dosagem das argamassas e moldagem dos corpos de prova para os respectivos ensaios que foram realizados.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos e uma discussão sobre os mesmos.

O capítulo sete, abrange algumas considerações finais a respeito do presente trabalho, suas conclusões e indicação para a realização de futuros estudos.

2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O desenvolvimento sustentável tem por objetivo satisfazer as necessidades da geração presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Para John (2000), a reciclagem é um dos passos mais importantes para o desenvolvimento sustentável, visto que não é possível pensar em uma sociedade isenta da geração de resíduos. Este autor salienta que embora a reciclagem apresente várias vantagens, tais como a redução do consumo de energia para a extração da matéria prima, da poluição e do número de aterros, cada caso deve apresentar uma análise sistêmica da situação concreta, sempre visando verificar a opção que melhor se enquadre.

A resolução do CONAMA nº 001 (1986) no seu artigo 1º considera como impacto ambiental, qualquer alteração do meio ambiente, sejam elas de propriedades físicas, químicas ou biológicas, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem diretamente ou indiretamente: a saúde, a segurança, e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias ambientais e a qualidade dos recursos ambientais.

Dentro deste contexto, sabe-se que a construção civil, mais especificamente a indústria cimenteira, é a responsável por grande parte de degradações ambientais. A produção de cimento Portland envolve o consumo de grandes quantidades de matéria-prima e energia, principalmente no processo de fabricação do clínquer. Outro problema gerado pela construção civil, que impacta diretamente o meio ambiente, é a disposição irregular dos resíduos gerados por este segmento. Muitas vezes estes resíduos são despejados em locais impróprios e até mesmo em áreas abandonadas.

John e Agopyan (2013) salientam que os resíduos da construção civil quando são depositados em locais inapropriados, podem provocar enchentes, proliferação de vetores nocivos à saúde, interdição parcial de vias e degradação do ambiente urbano.

2.1 RESÍDUOS E SUAS APLICAÇÕES NA CONTRUÇÃO CIVIL

Segundo a legislação nacional vigente, Resíduos sólidos são

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; ” Fonte: Lei Nº 12.305, de Agosto de 2010.

Os resíduos sólidos são agrupados quanto à sua origem e quanto à sua periculosidade. Quanto à origem, eles podem ser classificados em resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transportes e resíduos de mineração. No que diz respeito à periculosidade os resíduos podem ser perigosos ou não perigosos (Lei Federal Nº 12.305, de agosto de 2010).

Os resíduos sólidos como um todo, podem representar um grande perigo para a população e ao meio ambiente, se seu transporte, sua destinação final ou armazenagem não forem realizadas de maneira adequada. Alguns dos maiores desastres ambientes que ocorreram na história mundial estão relacionadas com esta problemática. Dentre estes desastres tem-se o exemplo do que ocorreu em Love Canal, nos Estados Unidos. Um terreno utilizado para aterro municipal de produtos industriais foi recoberto e vendido, e em poucos anos uma comunidade se formou na área. Após um período prolongado de chuvas, os resíduos vieram à tona causando contaminação, queimaduras e até deformação em bebês. No Brasil, na cidade de Goiânia, no ano de 1987, ocorreu a contaminação de parte da população com o cézio-137, um elemento radioativo que foi encontrado por catadores de lixo em uma máquina de um instituto de radioterapia. Calcula-se que 600 pessoas perderam a vida devido a esta contaminação.

Quanto à sua periculosidade, a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) define os resíduos sólidos em: resíduos classe I – perigosos e resíduos classe II – Não perigosos, os não perigosos ainda podem ser classificados em resíduos classe II A – Não inertes e resíduos classe II-B – inertes.

Nos últimos anos o número de pesquisas que se propõem a estudar métodos de reciclagem de resíduos tanto industriais, agroindustriais, como resíduos sólidos, tem crescido.

A utilização de resíduos sólidos industriais, agrícolas, resíduos de construção e demolição (RCD) e de mineração é indicada por reduzir o consumo energético ligado à produção de materiais; reduzir a poluição; diminuir a extração de recursos naturais; e diminuir os custos de transporte e destinação final dos resíduos.

Para que se possa empregar os resíduos sólidos, principalmente na construção civil, em matrizes cimentícias, é necessário conhecer os problemas ocasionados por esta utilização do ponto de vista técnico e ambiental. Quanto ao nível técnico é necessário que o resíduo não prejudique as propriedades mecânicas e de durabilidade, dos concretos e argamassas, e quanto ao nível ambiental é preciso assegurar que não haverá contaminação do meio ambiente.

A extração de recursos naturais e a geração dos resíduos pela construção civil contribuem para o aumento dos impactos ambientais.

Segundo John & Agopyan (2001), as tecnologias para o emprego de resíduos na produção de componentes destinados à construção civil estão em desenvolvimento, ao passo que esses materiais ainda estão sendo caracterizados e este é um processo lento. Isso explica, em partes, o receio dos técnicos para utilização desses materiais, pois no Brasil há a preocupação do uso seguro de novos materiais para então aplicá-los em larga escala. Tendo o resíduo potencial de utilização com desempenho satisfatório e viabilidade financeira, poderá ser iniciada a transferência de tecnologia desse novo material. Atualmente nota-se que ainda há receio na utilização dos resíduos em matrizes cimentícias, uma vez que não há nenhum incentivo para o emprego e nenhuma legislação que balise sua utilização.

A medida que novas tecnologias surgem, a utilização dos resíduos ascende, e isso resulta na consolidação de um novo produto no mercado. Tal fato procede com a maioria dos materiais, a literatura mostra que os materiais apresentam um baixo grau de valorização inicial, mas com o desenvolvimento de novas aplicações esse panorama tende a melhorar. Tal fenômeno aconteceu, por exemplo, com as cinzas volantes (Figura 1). A valorização ocorria ao passo que novas aplicações eram descobertas; em um primeiro momento, o gerador pagava para que consumidores retirassem as cinzas. John e Ângulo (2003) disseram que, sabe-se que elas melhoram algumas propriedades do concreto, e por isso o produto é vendido para usinas do ramo.

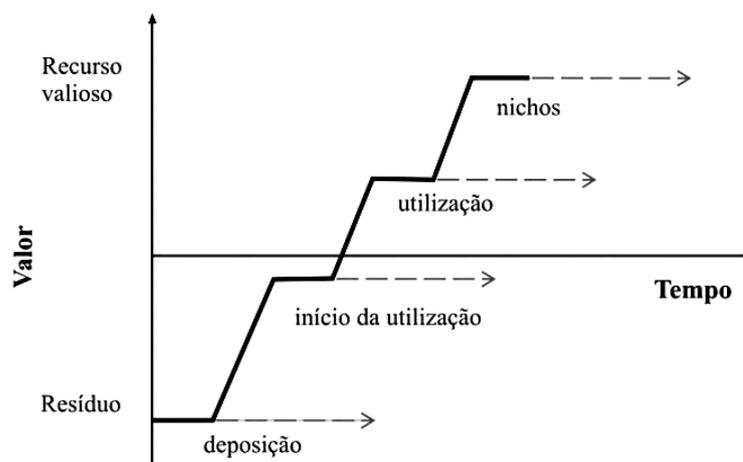


Figura 1 - Evolução do valor das cinzas volantes conforme o desenvolvimento de novas aplicações. [Fonte: Santos (2007)]

Diversos estudos têm sido realizados para verificar o potencial de utilização de resíduos como adição ou substituição de agregados ou do próprio cimento em concretos e argamassas. Ling et al. (2011) e Ling e Poon (2011) avaliaram a substituição de agregado natural por agregado reciclado de vidro em argamassa auto adensável com cimento Portland branco, optando por trabalhar com este resíduo devido ao seu apelo estético para produção de elementos arquitetônicos.

Portanto, a utilização de agregados miúdo reciclados pode ser uma alternativa viável, visto que ajudariam a aumentar a taxa de reciclagem de resíduos, apoiando o desenvolvimento sustentável neste setor da construção. Damtoff et al. (2008) demonstram que os requisitos de sustentabilidade aplicados na construção tentem a incentivar o uso de materiais que causem um impacto ambiental menor do que as matérias primas tradicionalmente utilizadas.

Estes autores salientam que a inovação é, sem dúvida, um importante motor para o desenvolvimento sustentável. Eles ainda salientam que a inovação do setor de materiais de construção é frequentemente prejudicado pela fragmentação industrial e conservadorismo inerente, decorrente de preocupação justificável sobre os riscos de responsabilidade dos novos produtos, o ritmo muito lento de mudança das normas e regulamentações nacionais e internacionais, e, claro, a sempre presente necessidade grandes lucros, de curtos prazos e da pressão dos mercados financeiros globais.

2.2 RESÍDUOS DE ÁGATA

O Estado Rio Grande do Sul é um dos maiores exportadores brasileiro de gemas lapidadas e gemas brutas (BRANCO e GIL, 2002). A cidade de Soledade, no estado do Rio Grande do Sul, é reconhecida por lei estadual como Capital das Pedras Preciosas, por ter um alto número de empresas que atuam no processo produtivo, desde a extração até a comercialização de gemas e artefatos oriundos das pedras. A cidade é considerada o centro estadual de beneficiamento, comercialização e exportação de pedras preciosas.

Segundo Schumann (2006), as principais jazidas de ágata até o século XIX, localizavam-se em Idar-Oberstein na Alemanha, estando hoje esgotadas. No Brasil podem-se encontrar geodos de ágata na região nordeste e noroeste do estado do Rio Grande do Sul e em uma área no estado do Paraná, conforme pode-se observar na Figura 2, entretanto apenas as ágatas encontradas no RS apresentam valor comercial (AGOSTINI et al. 1998¹ apud BRANCO e GIL, 2002).

Segundo Branco e Gil (2002), a ágata Úmbu é a gema mais abundante no Rio Grande do Sul, tendo sido encontrada em 71% dos jazimentos cadastrados, estando presente principalmente na região central do Estado. O município de Salto do Jacuí é considerado o maior produtor, seguido pelos municípios do entorno.

A ágata do tipo Úmbu encontrada no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ), representa a única ocorrência mundial desse tipo de calcedônia², sendo constituída de cor azul escura homogênea, apropriada para o tingimento e muito valorizada no mercado internacional de gemas ornamentais, sendo exportada em estado bruto principalmente para o Japão, Estados Unidos e Europa (HEEMANN, 2005).

¹ AGOSTINI, I. M. et al. **Ágata do Rio Grande do Sul**. Brasília: DNPM, 1998. 272 p. il. (Difusão Tecnológica, 5)

² Variedade microcristalina de quartzo, sendo definida como um agregado de quartzo micro a criptocristalino, granular ou fibroso.

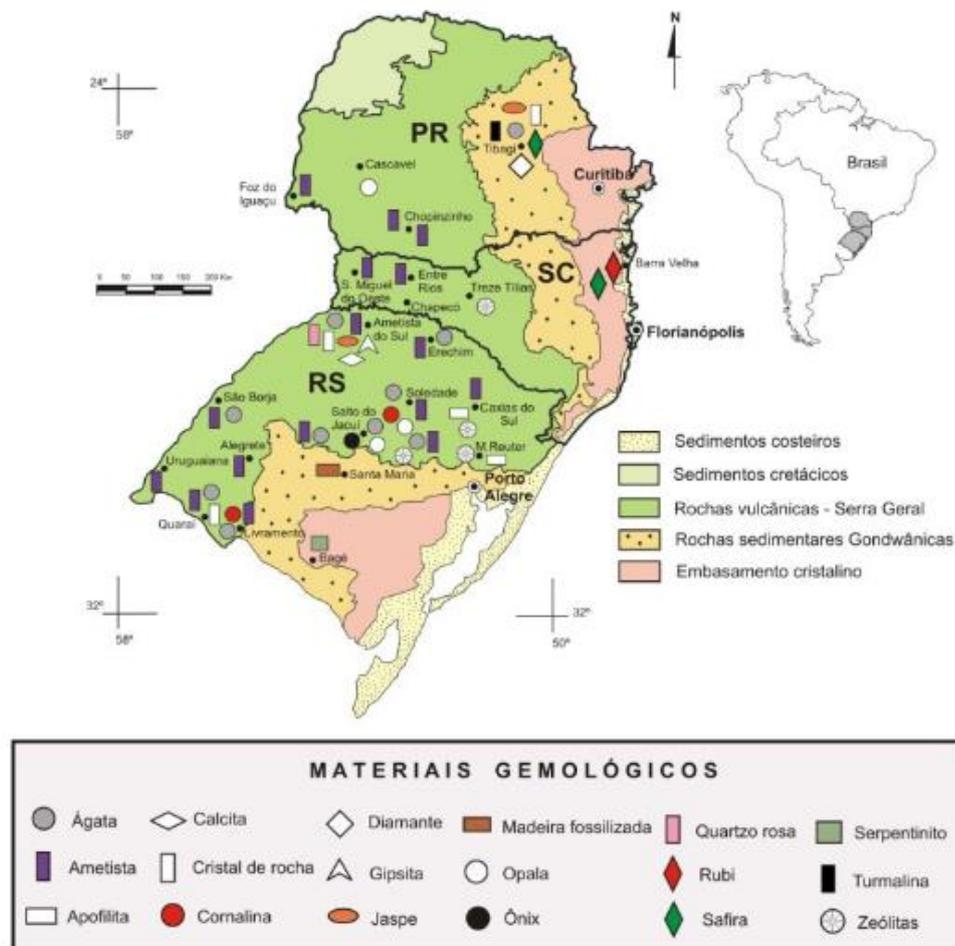


Figura 2 - Mapa gemológico da região sul do Brasil. [Fonte: Juchem et al. 2001]

O DMSJ está localizado na Formação Serra Geral (Figura 2), área formada por rochas vulcânicas, onde são encontrados os geodos de ágata, isoladas ou junto com ametistas. Os geodos mineralizados de ágata tem o formato predominantemente arredondados e ovoides com tamanho médio entre 20 e 50 cm de diâmetro e alguns chegando até a 1m (PAGNOSSIM, 2007).

O DMSJ abrange uma área aproximada de 250 km², caracterizada pela ocorrência de derrames basálticos a dacíticos, local considerado um dos maiores produtores mundiais de geodos de ágata que ocorrem em derrames basálticos (HEEMANN, 2005).

De acordo com CIDADE (2012) o DMSJ é a maior área de produção em nível mundial de ágata, apresentando 200 frentes de lavra abertas. A extração é realizada em minas a céu aberto com o auxílio de escavadeiras, conforme ilustra Figura 3.



Figura 3 – Extração de ágata nas minas: (a) escavação na área de extração; (b) geodos extraídos.

De acordo com Schumann (2006), as ágatas encontradas nesta localidade apresentam as características mineralógicas especificadas na Tabela 1

Tabela 1 - Características físicas e químicas das ágatas

Grupo	Quartzo
Cor	Variável, em faixas ou camadas
Dureza de Mohs	6 ½ - 7
Densidade relativa	2,60 – 2,64
Sistema cristalino	Trigonal, agregados microcristalinos
Composição química	Óxido de silício
Índice de refração	1,530-1,540

Fonte: Schumann (2006)

Após o geodo ser extraído da jazida, ele é classificado. Para o geodo ter valor agregado, o mesmo precisa atender certas características. Os que não atendem são considerados resíduos. Normalmente estes são encaminhados para outras indústrias de beneficiamento, onde recebem uma lavagem, seguido pelo corte em chapas planas. Nesta etapa ocorre a formação de um resíduo conhecido como lodo. As chapas que foram úteis no processo são tingidas, lixadas e polidas estando aptas para a venda. Nestas três etapas há ocorrência de pelo menos 2 tipos de resíduos, o lodo do tingimento e o pó de ágata obtido a partir do lixamento e polimento das peças. Estes últimos resíduos ainda podem apresentar algumas características químicas diferente dos resíduos gerados nas etapas iniciais de beneficiamento, visto que há o acréscimo de corantes para a realização do tingimento.

Muitas empresas trabalham com a venda de chapas de ágata, e para isso o tipo de beneficiamento e os resíduos resultantes destas etapas, são um pouco diferentes, conforme pode ser visualizado na Figura 4, um fluxograma deste beneficiamento.



Figura 4 - Processo de beneficiamento dos geodos de ágata. [Fonte: CIDADE (2012)]

No estudo realizado por Laimer (2006), foi constatado que de 20 empresas entrevistadas, 14 armazenavam seus resíduos no próprio pátio, fato que resulta em sérios problemas ambientais, visto que os resíduos acabam se espalhando pelos pátios, impermeabilizando a solo, entre outros. Os resíduos produzidos durante o beneficiamento da ágata apresentam-se sob a forma de pó de rolagem, cascalhos ou de fragmento de rochas, de dimensões variadas, e com áreas superficiais lisas. Sendo que estes podem variar de acordo com o tipo de beneficiamento que cada empresa pratica.

Os resíduos de ágata utilizados neste trabalho foram produzidos na região de Soledade e são resultantes do processo ilustrado na Figura 5. Os geodos são britados, separados por dimensões – que na maioria dos casos pode ser classificado como um cascalho (agregado miúdo), sendo que os maiores (agregados graúdos), são colocados em um gira moinho, onde são mantidos no processo por um período longo o suficiente para que os fragmentos de rocha, inicialmente com arestas bem definidas, se tornem arredondados. Após, o material passa por processos de polimento via úmida, visando assim a obtenção de pedras com alto brilho. Em muitas situações, as pedras roladas assim obtidas são artificialmente coloridas, o que resulta em produtos com maior valor agregado. Também no processo de polimento via úmida é gerado outro resíduo, porém na forma de lodo. Todos os rejeitos resultantes do beneficiamento são dispostos, em geral, no pátio da empresa, juntamente com o que sobra do lodo após a sua decantação e secagem.



Figura 5 - Processo de beneficiamento dos geodos de ágata

3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

Como neste trabalho tem-se como objetivo avaliar a influência de agregados miúdos em argamassas de cimento Portland branco para um posterior uso em concreto branco, o presente capítulo apresenta as características dos agregados que influenciam nas propriedades de argamassas e de concretos. Embora estas características sejam importantes para ambos, a bibliografia trata com maior abrangência sobre as características de agregados para concreto. A NBR 9935 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001) define agregado como sendo um “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”. Este material influencia de forma direta propriedades como retração, resistência mecânica, módulo de deformação, dentre outras (BAUER; SOUSA, 2005). Os mesmos, para serem utilizados em matrizes cimentícias, devem ser limpos, com uma distribuição granulométrica adequada e não ser reativos com os álcalis presentes no cimento (AÏTCIN; MINDESS, 2011).

Em concretos, os agregados são utilizados como enchimento inerte, que podem ocupar de 60 – 80% de seu volume, exercendo influência sobre a resistência, estabilidade dimensional e durabilidade. Também tem papel relevante na determinação do custo e trabalhabilidade das misturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Tem como principais características sua porosidade, absorção de água, resistência à compressão, seu módulo de elasticidade, composição granulométrica, forma, textura superficial das partículas e os tipos de substâncias deletérias eventualmente presentes. Os mesmos autores salientam que a forma e a textura superficial das partículas influenciam mais nas propriedades do concreto no estado fresco, como a trabalhabilidade, do que no estado endurecido. Há uma relação direta entre granulometria e trabalhabilidade, desta maneira a relação água/aglomerante do concreto é parcialmente dependente da granulometria do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em concreto branco são utilizados agregados miúdos e graúdos de cores claras. Também é utilizado o cimento Portland branco, que apresenta esta coloração por não ter em sua composição óxidos de ferro e manganês, responsáveis pela cor cinza do cimento Portland convencional. Passuelo (2004) afirma que a simples utilização de cimento branco não necessariamente irá satisfazer as exigências de cor, pois a cromaticidade da mistura da matriz cimentícia depende de todos os materiais envolvidos no processo. Segundo Kirchheim et al. (2011) inúmeros materiais inertes podem ser usados como agregados para produção de concretos de cimento Portland branco, incluindo os calcários e as areias silicosas ou argilosas, basaltos, mármore e granitos. Passuelo (2004) destaca que, mesmo com os agregados graúdos apresentando parâmetros cromáticos escuros, como agregados de origem basáltica por exemplo, os concretos manterão uma coloração clara. Desta maneira como o agregado graúdo não fica visível na superfície do concreto, pode-se considerar que ele tem um papel menos importante, assim apresentando pouca influência sobre a cor (FONSECA; NUNES,1998). Geralmente isto ocorre porque a argamassa da mistura cobre o agregado graúdo propiciando a coloração final dominada por sua cor. Entretanto o mesmo não é válido para o agregado miúdo, pois estes têm grande influência na cor da mistura. Outro parâmetro que deve ser levado em consideração é a quantidade de argamassa necessária para envolver o agregado graúdo e formar uma película de cobertura espessa, caso contrário pode haver um sombreamento na superfície do concreto, ainda pode ocorrer lascamentos na superfície e nas juntas do concreto, expondo o agregado, prejudicando sua estética (PASSUELO, 2004).

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS

As características dos agregados apresentam influências significativas nas propriedades das matrizes cimentícias, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Os agregados podem ser classificados a partir de cinco características fundamentais, tais como; sua origem, tamanho, peso, forma e textura, conforme mostra a Tabela 2 e detalhados a seguir. Embora não considerada uma característica, os agregados para serem utilizados em matrizes cimentícias, precisam ser inertes, deste modo eles não devem reagir com os demais constituintes, principalmente com os álcalis presentes no cimento, visto que, se isso ocorrer, pode se ter a reação álcali-agregado. Logo, outra característica que também deve ser investigada é a reatividade do agregado.

Tabela 2 - Características dos agregados

Origem	Natural Artificial Britados* Reciclados ou Resíduos
Composição Granulométrica	Agregado miúdo Agregado graúdo
Forma	Alongada Achatada ou lamelar Angulosa Arredondada
Textura	Lisa Áspera

[Fonte: Adaptado Mehta e Monteiro (2014) e Srigli Neto (2011)]

3.1.1 Origem

Segundo Sbrighi Neto (2011), os agregados podem ser classificados de acordo com a sua origem, como sendo: naturais, artificiais, britados e reciclados. Este autor classifica os agregados naturais, como sendo os encontrados na natureza, prontos para a sua utilização. Já os artificiais são os derivados dos processos industriais, os britados são todos aqueles que precisam ser submetidos a um processo de beneficiamento, para terem seu tamanho apropriados para a utilização e por último os reciclados são os resíduos industriais que tenham propriedades adequadas para utilização. Para Mehta e Monteiro (2014) os agregados são classificados em, naturais, artificiais e resíduos, sendo que o britado é um processo de beneficiamento que a grande parte dos materiais irá necessitar.

A origem dos agregados influencia diretamente outras propriedades tais como, mineralogia, forma e textura dos grãos.

Os agregados naturais tendem a ser mais arredondados, devido a sua origem, enquanto que as areais britadas apresentam características variadas que irão depender da rocha-matriz. O processo de britagem geralmente produz partículas angulares e com as extremidades afiadas (CHUN CHO et al., 2006).

Segundo Cappellesso et al. (2013), o britador de mandíbulas conferiu ao agregado miúdo de ágata uma forma lamelar, o que, em seu no estudo, influenciou na trabalhabilidade dos concretos produzidos.

3.1.2 Composição Granulométrica

Quanto ao tamanho, os agregados são classificados em grãos e miúdos. Segundo a NBR 7211:2009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) são considerados agregados grãos os passantes pela peneira com abertura de malha 152mm e retidos na peneira de malha 4,75mm. Já os agregados miúdos são aqueles que passam a peneira de malha 4,75mm. A determinação a composição granulométrica de agregados miúdos, se dá a partir da norma NBR 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a distribuição granulométrica corresponde a distribuição do tamanho dos grãos.

Entretanto, alguns autores salientam que a utilização da composição granulométrica, através do peneiramento, não é a melhor forma de representação, uma vez que grãos de baixa esfericidade e alongados podem passar na vertical pelas aberturas das peneiras, enquanto que outros podem ficar retidos nas mesmas (KWAN et al., 1999³ apud HEINECK, 2012; ARAUJO, 2001; TRISTÃO, 2005).

Ainda, segundo Tristão (2005), a distribuição granulométrica e a forma das partículas estão correlacionadas com o empacotamento dos grãos. A quantidade de partículas em cada fração granulométrica depende do formato do grão, analisando a mesma massa específica, o conhecimento da distribuição granulométrica em termos de números de grãos é um dado importante no que se refere a composição de agregados miúdos com os menores volumes de vazios, que irão produzir argamassas com menores consumos dos aglomerantes.

Ao passo que a composição granulométrica influencia de forma significativa na trabalhabilidade das misturas, se faz necessária a utilização de agregados com granulometria contínua, visto produzirem concretos com maior trabalhabilidade e mais econômicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Logo, utilizar agregados com granulometria descontínua reflete em redução da trabalhabilidade. A Figura 6 e Figura 7, demonstram os diferentes tipos de granulometrias.

43

³ KWAN, A. K. H.; MORA, C. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 9, p. 1403-1410, set. 1999.

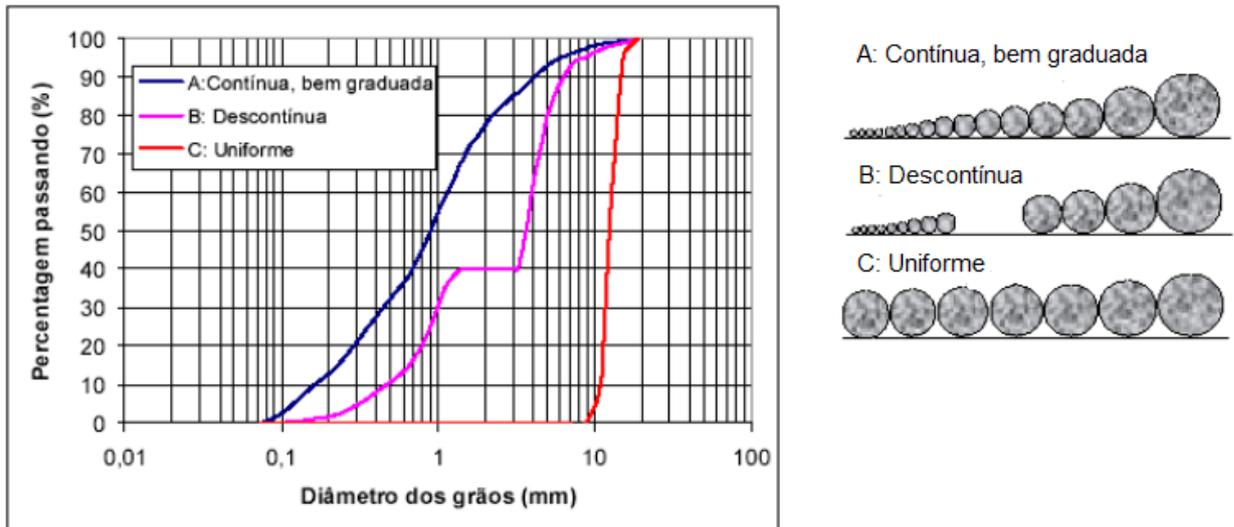


Figura 6 – Distribuição Granulométrica dos Agregados

[Fonte:http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carneane/materiais/AULA_3_AGREGADO_PARTE_3_2014.pdf]

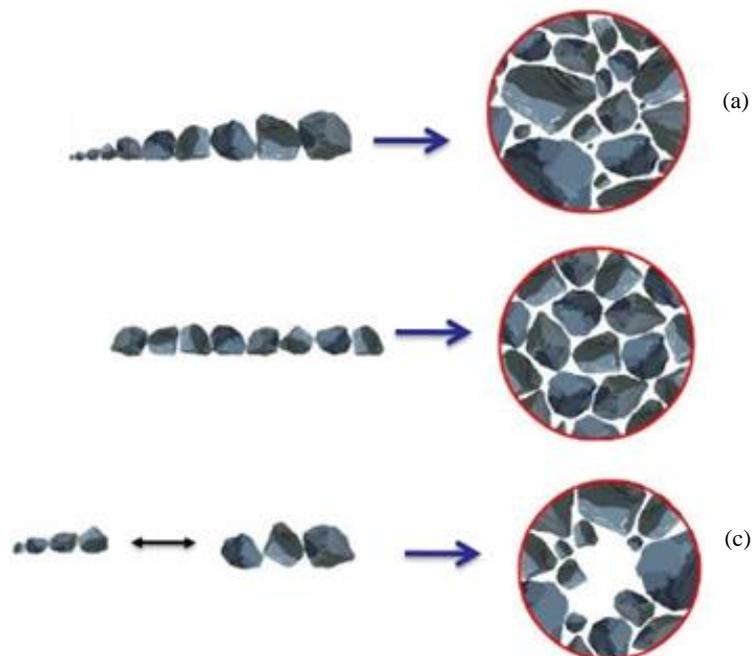


Figura 7 – Distribuição granulométrica dos agregados; (a) Granulometria contínua; (b) Granulometria uniforme; (c) granulometria descontínua.

[Fonte:http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carneane/materiais/aula_3_agregado_parte_3_2014.pdf]

A forma, a textura e a granulometria dos agregados tem efeito direto no estado fresco do concreto, visto que partículas mais arredondadas e com textura lisa requerem uma quantidade menor de pasta, quando comparado a partículas angulares e alongadas (FOWLER, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No entanto, quando realiza-se a combinação entre as características de diferentes agregados é possível obter misturas com um grau de empacotamento ótimo. Por consequência esses agregados utilizados de forma otimizada irão demandar menor quantidade de água e de pasta produzindo materiais possivelmente com melhores propriedades mecânicas e de durabilidade (FOWLER, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.1.3 Forma

A forma dos grãos dos agregados miúdos está relacionado com a sua aparência externa correlacionada com as suas dimensões. Mehta e Monteiro (2014) classificam os agregados quanto à forma da seguinte maneira: alongadas, achatadas ou lamelares, angulosas ou arredondadas.

A NBR 7389:2009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), descreve um método qualitativo, de avaliação da forma dos grãos do agregado. Onde é definido que a avaliação deve ser realizada de forma visual, a olho nu ou com um auxílio de instrumento óptico e classificando os agregados quanto ao grau de esfericidade (alto ou baixo) e ao grau de arredondamento (angulo, subanguloso, subarredondado ou arredondado). A Figura 8 ilustra os formatos possíveis de um agregado.



Figura 8 – Forma dos agregados, conforme NBR 7389:2009

Neville (2013), apresenta uma classificação mais abrangente quanto a forma do agregado, conforme retratada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação segundo a forma dos grãos

Classificação	Características	Exemplos
Arredondado	Totalmente desgastado pela ação de água ou totalmente conformado por atrito	Seixo de rio ou zonas litorâneas marítimas; areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente conformados por atrito com arestas arredondadas	Outros seixos, flint
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões	Rochas lamelares
Anguloso	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces razoavelmente planas	Pedras britadas de todos os tipos, talus e escórias britadas
Alongado	Material, em geral, anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões	-
Lamelar e Alongado	Material com o comprimento bem maior que a largura e esta bem mais que a espessura	-

[Fonte: Neville (2013)]

Como estes processos de avaliação são subjetivos, várias metodologias foram criadas para que se pudesse medir com uma maior precisão estes parâmetros. Estas avaliações utilizam classificações numéricas que são realizadas a partir da análise por imagem ou então com a utilização de métodos mais inovadores como o escaneamento em 3D das partículas.

Boateng et al. (2013) afirma que são necessárias técnicas mais precisas e automáticas para a quantificação destas propriedades nos agregados. Deste modo os autores validam uma nova equação (modelo matemático) usando três dimensões obtidos através do escaneamento a laser (3D) do agregado. O modelo proposto de análise considera o volume do material.

Também há modelos que utilizam como parâmetros de medição a área, o perímetro, comprimento maior e menor dos eixos. Tristão (2005) utilizou em seu trabalho, para quantificar o arredondamento, fator de forma e esfericidade, equações que consideravam a área de projeção da partícula e o diâmetro máximo de Feret, obtidos a partir da análise de imagens. Nos trabalhos de Gonçalves (2007) e Arnold (2011), também foi utilizada esta metodologia para a quantificação destes parâmetros para os agregados estudados em cada pesquisa.

3.1.4 Textura superficial dos grãos

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a textura superficial dos grãos, pode ser classificada em lisa e áspera, sendo que este parâmetro vai depender da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha mãe.

Neville (2013), apresenta uma classificação mais completa quanto as características da textura superficial dos grãos. Sendo que esta classificação por ele realizada não se baseia na quantificação deste parâmetro, mas somente em uma avaliação visual dos grãos, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Textura superficial dos agregados

Análise	Características	Exemplos
Vítrea	Fratura conchoidal.	Sílex negro, escória vitrificada.
Lisa	Desgastes por água, ou alisado devido à fratura de rocha laminadas ou finamente granulada.	Seixos, opalas, mármore, alguns riólitos.
Granular	Fraturas mostrando grãos arredondados mais ou menos uniformes.	Arenito
Áspera	Fratura áspera de minerais finos ou medianamente granulados com constituintes cristalinos de difícil percepção visual.	Basalto, felsito, pórfiro, calcário.
Cristalina	Com os constituintes cristalinos facilmente visíveis	Granito, gabro, gnaise.
Alveolar	Com os poros e cavidades visíveis	Tijolo, pedra-pomes, espuma de escória, clínquer, argila expandida.

[Fonte: Neville (2013)]

Na pesquisa realizada, Tristão (2005) concluiu que a textura superficial dos grãos foi um dos parâmetros que influenciou nas propriedades investigadas nas argamassas.

Neville (2013) salienta que a forma e a textura superficial dos agregados, principalmente os miúdos, vai exercer influência na demanda de água requerida pelas misturas.

Ainda, vale ressaltar que a textura do agregado também irá influenciar nas propriedades do estado endurecido, principalmente na resistência do concreto, afetando a resistência à flexão nas primeiras idades, visto que quanto mais rugosa a superfície, mais fácil será a formação de uma aderência física entre a pasta e o agregado, sendo que este efeito não é significativo em idades mais avançadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Brito e Saikia (2013) ressaltam que os agregados apresentam papel fundamental em diferentes propriedades das matrizes cimentícias, e que há uma crescente utilização de agregados

alternativos. Entretanto os mesmos autores salientam que apesar de um número significativo de estudos estarem disponíveis, para a utilização de alguns tipos de resíduos industriais na preparação de concreto e argamassa, a avaliação das propriedades de agregados geralmente não são devidamente exploradas. Este fato tende a limitar a compreensão das propriedades de concretos e argamassas contendo estes agregados.

Todos estes aspectos apresentados influenciam diretamente as características dos concretos e argamassas. A Tabela 5, apresenta de forma resumida, as características dos agregados que influenciam nas propriedades das matrizes cimentícias.

Tabela 5 – Propriedades do concreto x Características dos agregados

Propriedades do concreto	Características relevantes dos agregados
Resistência mecânica	Resistência mecânica Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria Módulo de elasticidade Coeficiente de Poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento
Economia	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

(fonte: SBRIGHI NETO, 2000)

3.1.5 Reatividade dos agregados

A reatividade dos agregados é um fator que deve ser investigado, ao passo que deve-se utilizar sempre agregados inócuos. Uma vez que se o agregado apresentar reação, principalmente com os álcalis presentes no cimento, há a possibilidade de ocorrer uma

manifestação patológica, denominada a reação álcali-agregado, que pode comprometer a durabilidade das matrizes cimentícias.

Diversos fatores estão relacionados com a durabilidade da matriz cimentícia, segundo Metha e Monteiro (2014) existem efeitos físicos e químicos que influenciam para a redução da durabilidade das estruturas de concreto. Estes autores ressaltam que estas causas estão intimamente relacionadas, fazendo com que frequentemente seja impossível separar a causa e o efeito da manifestação.

Esta pesquisa, quanto aos quesitos de durabilidade, irá focar na reação álcali-agregado, por saber que a ágata é composta por quartzo deformado, um dos responsáveis pelo desencadeamento desta reação, segundo o que relata a literatura sobre o tema.

As fissuras causadas pela RAA são manifestações patológicas que causa efeitos deletérios no concreto, afetando sua durabilidade e conseqüentemente diminuindo sua vida útil. Esta reação ocorre em estruturas de concreto submetidas à presença constante de água.

A descoberta da reação álcali-agregado por vários pesquisadores gerou interesse em estudar o assunto, contribuindo de forma ímpar no entendimento do processo químico e na identificação dos minerais reativos, bem como nas conseqüências e fatores envolvendo casos reais de estruturas afetadas por esse tipo de patologia (HASPARYK, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e elasticidade de um concreto afetando, por conseguinte, a sua durabilidade.

Pode ser definida como uma reação química que ocorre entre os álcalis presentes no cimento e os minerais que constituem os agregados, produzindo um gel que na presença de água expande, causando tensões internas e fissurando as peças de concreto. Após o desencadeamento da reação, não há como pará-la e os danos são considerados irreversíveis, o que compromete a vida útil das estruturas (TIECHER, 2006).

Para que as reações álcali-agregado ocorram é necessária a presença de álcalis liberados pelo cimento hidratado, elevando muito o pH do fluído dos poros, normalmente na faixa de pH 13. Isto pode deixar algumas rochas ácidas (agregados de sílica e carbonato) instáveis sob exposição prolongada. Trata-se de uma reação lenta tendo como produto um gel expansivo em contato com a água (TIECHER, 2006).

Os álcalis são encontrados no cimento de duas formas; álcalis solúveis que estão presentes nos sulfatos alcalinos (representam de 10 % a 60% dos álcalis totais) e os álcalis insolúveis que são provenientes das soluções sólidas das fases presentes no clínquer (HASPARYK,1999).

Os produtos das reações álcali-sílica absorvem água e aumentam de volume, causando um aumento nas tensões internas, fato que é responsável por fissurar o concreto. As fissuras encontradas em estruturas de concreto atacadas pela reação são geralmente fissuras tipo “mapa” (HASPARYK, 1999).

Para Valduga (2002) a reação álcali-silicato é o tipo de reação mais encontrada no Brasil. A maior parte das barragens que apresentam esse tipo de deterioração no país, foram construídas com rochas do tipo quartzo-feldspáticas tais como quartzito, granito e gnaisses, com ocorrências distribuídas por vasta faixa territorial. Isto justifica a grande ocorrência de reação álcali-silicato.

Nas reações álcali-carbonatos ocorre a formação de uma zona de reação com até 2mm em torno das partículas do agregado, desenvolvendo assim uma rede de fendas e eventualmente a perda de adesão do agregado.

A RAA é influenciada tanto pela granulometria e forma dos agregados empregados no concreto, quanto pela mineralogia da rocha matriz.

Valduga (2007) analisou a influência da forma do grão, da relação água/cimento e da consistência das argamassas, nas expansões causadas por RAA. O estudo contemplou o uso de três tipos de agregados (inócuo, potencialmente reativo e reativo), três relações a/c e três processos de moagem (Moinho de rolo, moinho de mandíbulas e Abrasão Los Angeles). A autora destaca que existe influência da forma do grão nas expansões por RAA, visto que esta característica refletiu em diferentes consistências das argamassas estudadas. A autora ressalta, também, que as maiores expansões foram causadas por agregados de grãos com formato arredondado e por argamassas com menores relações a/c, visto que estes casos também obtiveram menor porosidade.

Wigum (1995)⁴ apud Tiecher (2006) descreve que a RAA ocorrida devido à presença de quartzo microcristalino e quartzo deformado resulta em expansões mais lentas. Como a análise petrográfica realizada por Chiaro et al.(2013) mostrou que a ágata é constituída basicamente pelo mineral quartzo sob a forma micro a criptocristalina, intensamente

⁴ WIGUN, B. J.. The álcali-aggregate reaction. In: **Reports-Feel free to download**, 1995.

deformado, estudos que avaliem a reatividade de agregados em matrizes cimentícias são imprescindíveis.

Pode-se encontrar na bibliografia, tanto nacional quanto internacional, diversos ensaios para avaliação da reação álcali-agregado, e vários também são os questionamentos a respeito da eficiência de seus resultados, visto que muitos ensaios, por serem acelerados potencializam efeitos falso negativos ou falso positivos. Desta forma, é necessário reconhecer a potencialidade reativa do agregado juntamente com o mecanismo da reação para que se possa realizar análises conclusivas a respeito do agregado.

Alguns deles podem ser citados por serem internacionalmente conhecidos: análise petrografia (ASTM C295; NBR 15577-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008); NBR 7389 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009)), método das barras (ASTM C-227), método acelerado das barras (ASTM C1260; NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008)), método Osipov, determinação da expansão em prismas de concreto (NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008)); ASTM C1293, o método proposto por Touma et al. (2001), método das rochas carbonáticas (FURNAS, 1997), entre outros.

A RAA é uma reação que não tem como ser contida após iniciada, por isso deve-se tomar todas as medidas necessárias para que esta seja evitada. A NBR 15577-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), traz formas de mitigar a reação. Para a verificação da potencialidade reativa de um agregado, a NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), classifica a reatividade essa em 4 níveis e para cada classificação a mesma índia as medidas de mitigação, Figura 9.

Expansão das barras de argamassa aos 28 dias (%)	Classificação da reatividade potencial do agregado	Medida de Mitigação decorrente da Intensidade da Ação Preventiva
Menor que 0,19%	Potencialmente inócuo	Desnecessária
Entre 0,19 e 0,40%	Potencialmente reativo grau 1	Mínima
Entre 0,41 e 0,60%	Potencialmente reativo grau 2	Moderada
Maior que 0,60%	Potencialmente reativo grau 3	Forte

Figura 9 – Classificação da reatividade potencial do agregado, conforme NBR 15577:2008

Segundo CÂNDIDO et al. (2010) a prevenção é a melhor maneira de mitigar o aparecimento desta manifestação patológica, para isso pode-se utilizar agregados não reativos, cimentos com baixos teores de álcalis, adições pozolânicas ou adições compostas à base de lítio.

Com o intuito de mitigar a reação álcali-agregado, pode-se citar 3 tipos de medidas que podem ser adotadas:

- Adições químicas:

O estudo de Cândido et al. (2010), avaliou a utilização do nitrato de lítio (LiNO_3) como forma de mitigação da reação álcali-sílica. Os autores moldaram vários corpos de prova em argamassa com agregado reativo, submetendo-os ao ensaio acelerado, após os cp's apresentarem uma expansão superior a 0,18%, foram aplicar alguns tipos de tratamento com o LiNO_3 , e se deu continuidade ao ensaio acelerado, sendo que todos os tratamentos aplicados foram eficientes para a mitigação da reação.

- Adições minerais:

O uso de adições como a sílica ativa, metacaulim ou outro material pozolânico confere aos concretos propriedades específicas, tais como baixa permeabilidade, baixo calor de hidratação, aumento nas propriedades mecânicas do concreto, resistência ao ataque de sulfatos, melhora na durabilidade, entre outras. Além disso, esta adição é conhecida pela sua eficiência na mitigação da RAA como é citada na NBR 15577-5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

- Materiais pulverizados:

Alguns estudos, tais como Andriolo (1997), Hasparyk (1999), Sabbg (2003), Andriolo (2006), retratam a utilização de materiais pulverizados e até mesmo o uso do próprio agregado reativo finamente moído, pode ser utilizado como modo de mitigar a reação álcali-agregado. Entretanto, são poucos os estudos que investigam este tipo de adição.

Andriolo (1997) analisou o emprego de pó de pedra incorporado a areia artificial de basalto como mecanismo para a minimização da reação álcali-sílica, sendo que esta adição se mostrou eficaz, conforme pode ser observado na Figura 10.

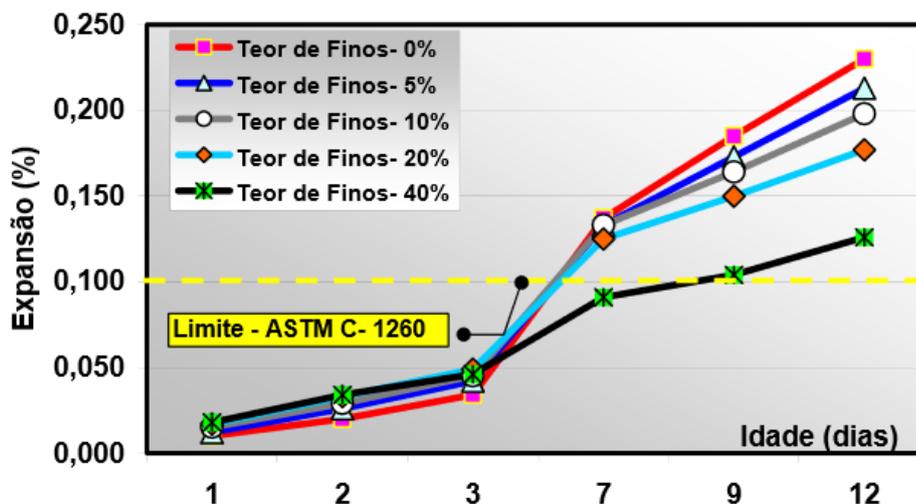


Figura 10 - Influência do teor de finos na Expansão devido à Reação Álcali-Agregado. [Fonte: Andriolo, 1997]

Este autor salienta que a utilização de finos (ou fílers) produzidos a partir dos próprios agregados reativos, inibe as reações expansivas, proporcionando efeito similar aos provocados pelas pozolanas.

Hasparyk (1999), salienta que o uso de agregado pulverizado é pouco investigado, entretanto justifica que o uso desta adição mineral tem o poder de reduzir as expansões causadas pela RAA. No estudo de Castro et al. (1997)⁵ apud Sabbag (2003), foi observado que a utilização parcial de arenito como material pulverizado, em areia artificial, combinado com 100% de cimento, também foi eficiente na redução da expansão.

Diante do exposto neste item, esta pesquisa buscará avaliar a reatividade dos resíduos de ágata (agregado miúdo e pó de rolagem) quando empregados em matrizes de cimento Portland branco, além do que postula a NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) frente à necessidade de uso de cimento padrão da Associação Brasileira de Cimento Portland.

⁵ CASTRO, C. H.; SANTOS, M. C.; TRABOULSI, M. A.; BITTENCOURT, R. M. **Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. Anais... Goiânia, 1997, p.87-94.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Segundo Cervo e Bervian (2002), uma pesquisa experimental se caracteriza por manusear diretamente as variáveis relacionadas ao objeto de estudo, visto que a relação entre a causa e o efeito de um fenômeno ocorre pela manejo destas variáveis através da criação de situações de controle.

Para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que possibilitasse a análise do comportamento dos agregados de ágata, na forma de pó e agregado miúdo, em argamassas com cimento Portland branco. O estudo foi desenvolvido em argamassa com vistas a diminuir o volume de materiais utilizados. Como verificado na revisão de literatura, Passuelo (2004) destaca que são os materiais finos (cimento, adições e agregados miúdos) que influenciam diretamente a cor do concreto produzido, já que pigmentam a mistura com sua cor característica, o que não acontece com a fração graúda, que normalmente não é visível na superfície da mistura, por estar envolvida pela argamassa.

O programa experimental baseia-se em um planejamento estatístico que possibilita trabalhar com variáveis controladas, onde é possível empregar ferramentas na análise da influência de cada variável, permitindo, deste modo, uma maior confiabilidade nos resultados.

O planejamento experimental iniciou-se após o embasamento teórico com a definição das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, sendo estas necessárias para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa.

4.1 ESTUDO EXPLORATÓRIO

Para verificar o comportamento da substituição do calcário miúdo por resíduos de ágata, optou-se por empregar o método utilizado nos estudos de Moura (2000), Masuero (2001) e Giordani (2014). O primeiro autor avaliou a inclusão de resíduo de escória de cobre em argamassas e a segunda de resíduos de escória de aciaria elétrica. Ambos autores verificaram o teor ótimo de substituição, para na continuidade da pesquisa, utilizá-los em concretos. A

terceira autora utilizou o método proposto por Moura (2000) e Masuero (2001), realizando seu estudo com resíduos de arenito incorporados em argamassas de cimento Portland.

Os proporcionamentos das misturas empregadas no presente trabalho também seguem os propostos pelos autores anteriormente citados. Foram produzidos traços intermediário (1:3), rico em aglomerante (1:1,5), e pobre em aglomerante (1:4,5), todos expressos em uma relação de cimento : areia seca, em massa. Fixou-se a consistência das argamassas estabelecendo uma relação água/cimento, para cada mistura, tomando-se como referência o valor obtido para a argamassa confeccionada com 100% de agregado miúdo de calcário. Também optou-se por não utilizar aditivo superplastificante, para garantir que não houvesse interferência de mais este fator nos resultados.

Para se determinar os teores de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata, inicialmente foi realizado o ensaio de máxima massa unitária do agregado miúdo de ágata, juntamente com pó de rolagem de ágata (Figura 11). O ensaio de massa unitária seguiu o que preconiza a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), tanto para o teste no estado solto quanto no estado compactado.

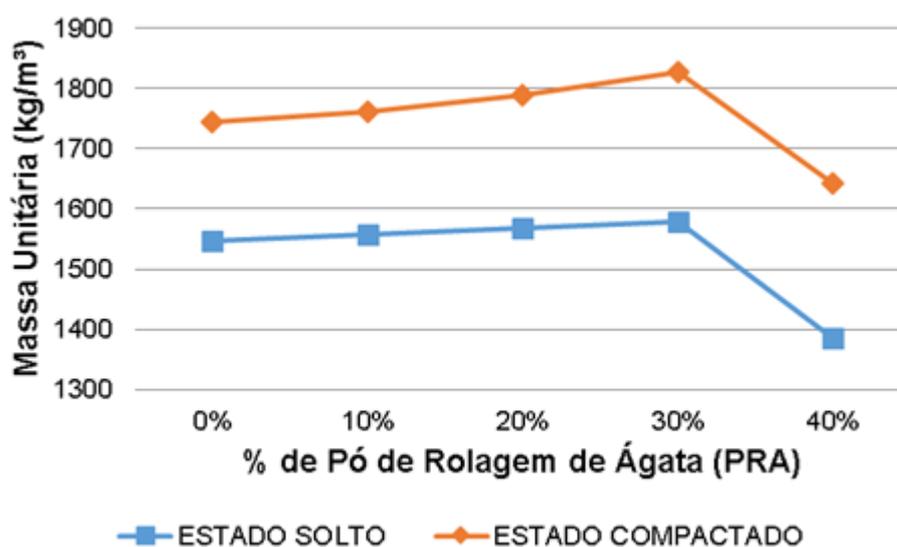


Figura 11 - Massa unitária em função do teor de substituição do agregado miúdo de ágata pelo pó de rolagem de ágata

Verificou-se que teor ótimo de substituição do agregado miúdo de ágata por pó de rolagem de ágata seria de 30%, em massa, por ser este o teor no qual se obteve a maior massa unitária, conforme pode ser visualizado na Figura 11 nos dois estados em que o ensaio foi realizado, solto e compactado.

Desta maneira, o presente estudo que para avaliar o comportamento deste agregado, quando empregado em argamassas, foi definido mais dois teores de substituição do agregado miúdo pelo PRA, sendo um teor inferior, de 15% e um superior de 45% de substituição.

Segundo De Larrard (1999)⁶ apud Fabro (2011), a relação entre as partículas finas e o total de partículas (finas e grossas) presentes nas misturas de uma matriz cimentícia vai influenciar o seu comportamento reológico. Este mesmo autor salienta que o volume de vazios diminui à medida que se aumenta a quantidade de finos, até um certo ponto, que estes começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito de afastamento entre as partículas torna-se preponderante, elevando o índice de vazios. O empacotamento granular aliado às interações das partículas sólidas e líquidas contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento.

Como optou-se por manter a mesma granulometria para os agregados miúdos de calcário e de ágata, partiu-se da granulometria original do agregado miúdo de ágata e realizou-se a composição do agregado miúdo de calcário, respeitando as faixas granulométricas do outro agregado.

A partir da determinação dos teores de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata, foram traçadas as curvas granulométricas das combinações, com a finalidade de observar como o pó de rolagem de ágata influenciava na distribuição granulométrica dos agregados, Figura 12.

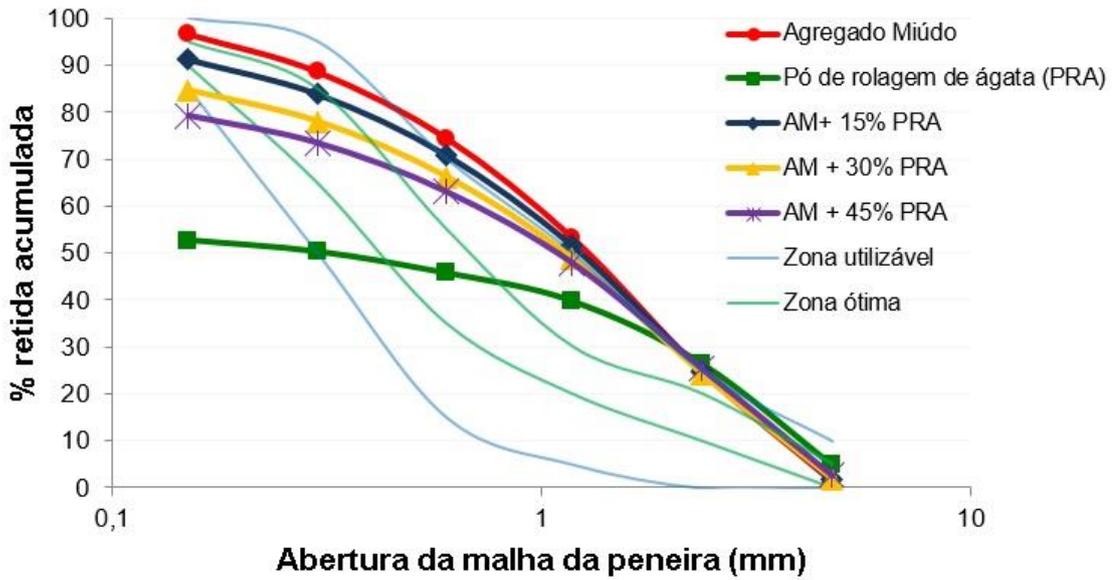


Figura 12 - Influência do teor de substituição de agregados miúdos por pó de rolagem de ágata na distribuição granulométrica.

A Figura 13 apresenta a matriz experimental realizada para os 3 traços pré-definidos, 2 tipos de agregados miúdo e 4 teores de substituição dos agregados miúdo por pó de rolagem de ágata. Desta forma, o estudo em argamassas abrangeu 24 traços, sendo que para cada combinação, além dos ensaios das argamassas no estado fresco, foram moldados 20 corpos de prova para a realização dos ensaios no estado endurecido.

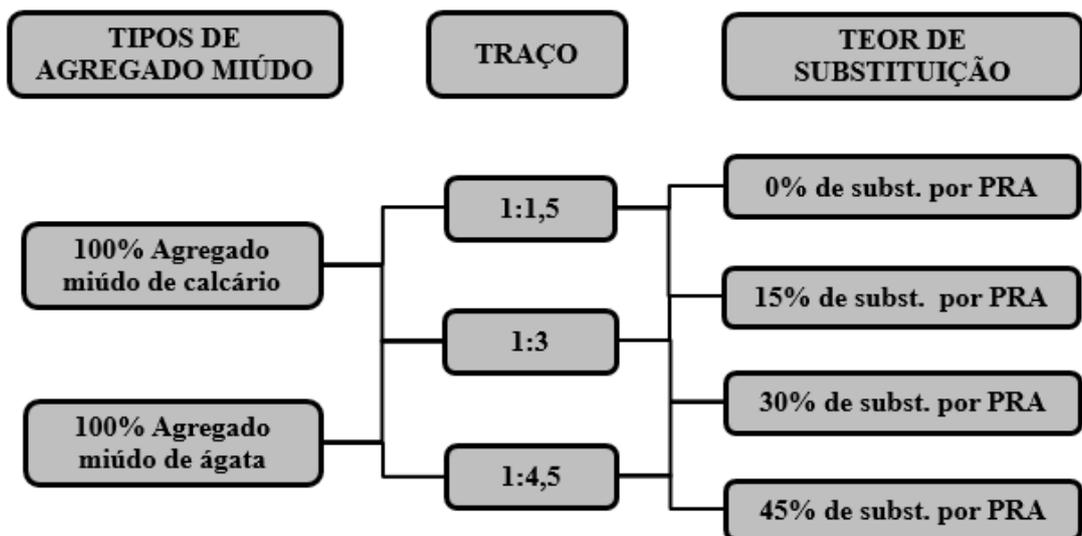


Figura 13 – Matriz Experimental

4.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS

Após o embasamento teórico, foi possível determinar todas as variáveis envolvidas nesta etapa de trabalho, apresentadas a seguir.

4.2.1 Variáveis de resposta

Como variáveis de resposta (variáveis dependentes) foram avaliados os seguintes parâmetros: no estado fresco: índice de consistência, reometria rotacional e *squeeze flow*; no estado endurecido: a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção capilar, módulo de elasticidade, densidade de massa aparente, reação álcali-agregado e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Esses parâmetros foram definidos com vistas a entender o comportamento do emprego de resíduos de ágata em argamassas com cimento Portland Branco.

4.2.2 Variáveis controladas

As variáveis controladas, ou variáveis independentes, são aqueles parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados em vários níveis no experimento, em virtude da sua influência nas variáveis de resposta. Desta maneira, as variáveis controladas nesta pesquisa são:

- percentual de substituição do agregado miúdo de calcário pelo agregado miúdo de ágata, que foi de 100%, em volume;
- percentual de substituições dos agregados miúdos (calcário e ágata) pelo pó de rolagem ágata, nos níveis de 0%, 15%, 30% e 45%, em volume;
- traços (cimento : agregado miúdo), 1:1,5, 1:3 e 1:4,5.

4.2.3 Variáveis não controladas

Variáveis não controladas são as variáveis que por restrições técnicas não puderam ser controladas durante o experimento, tais como, a temperatura e a umidade relativa do ar do ambiente de produção das argamassas não foram controladas.

4.2.4 Variáveis fixas

As variáveis constantes são aquelas que não foram escolhidas como prioritárias na pesquisa e, portanto, são mantidas constantes durante o experimento. Sendo elas:

- consistência das argamassas;
- equipamentos de confecção das argamassas e de realização ensaios;
- operadores;
- cura, que consiste em deixar os corpos de prova durante suas primeiras 24 horas em sala com temperatura ambiente e com proteção superior (lona plástica), para evitar a perda de água, proceder a desmoldagem e armazenar os mesmos em câmara úmida, com umidade relativa $\geq 95\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, por 27 dias.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada a caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa. Posteriormente realizaram-se os ensaios necessários para o estudo de viabilidade e de determinação do teor ótimo de substituição dos agregados miúdos, calcário e ágata, por pó de rolagem de ágata em argamassas de cimento Portland branco. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta, de forma simplificada, todos os ensaios realizados para a caracterização dos aglomerantes e agregados miúdo utilizados na pesquisa. A Figura 15 retrata os ensaios realizados nas argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

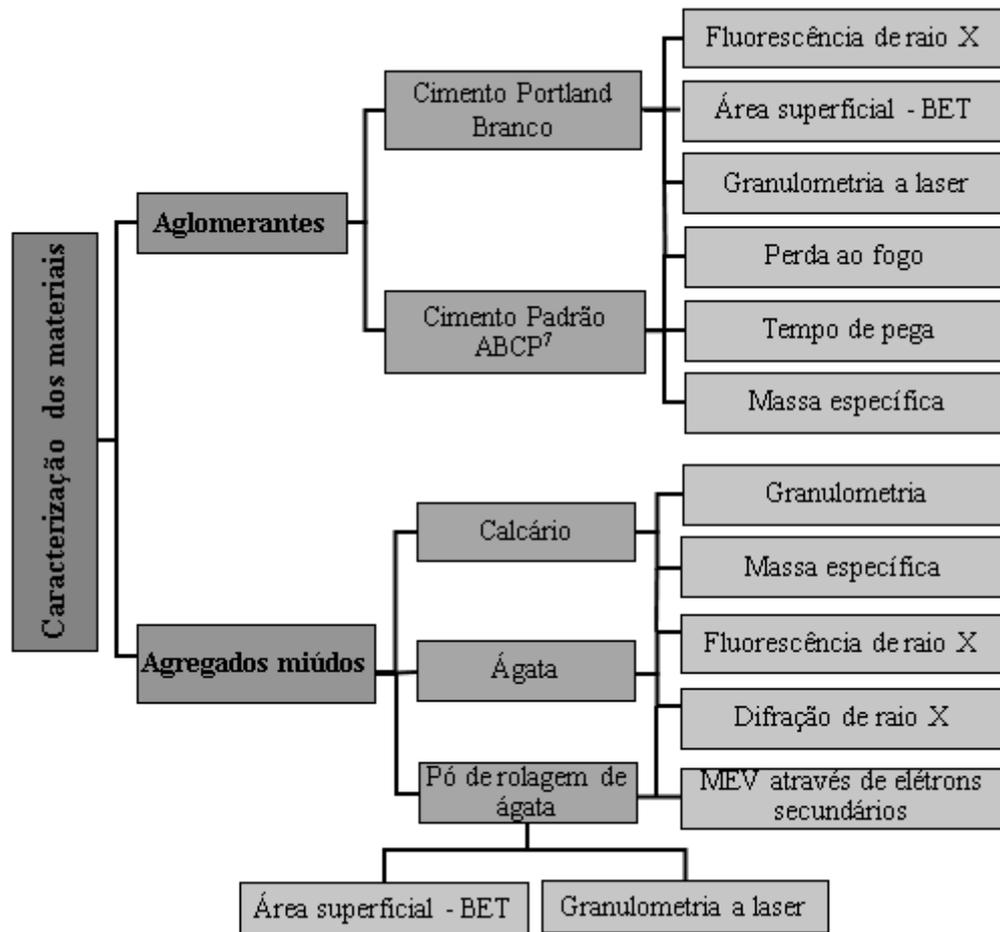


Figura 14 – Ensaio de caracterização dos materiais utilizados

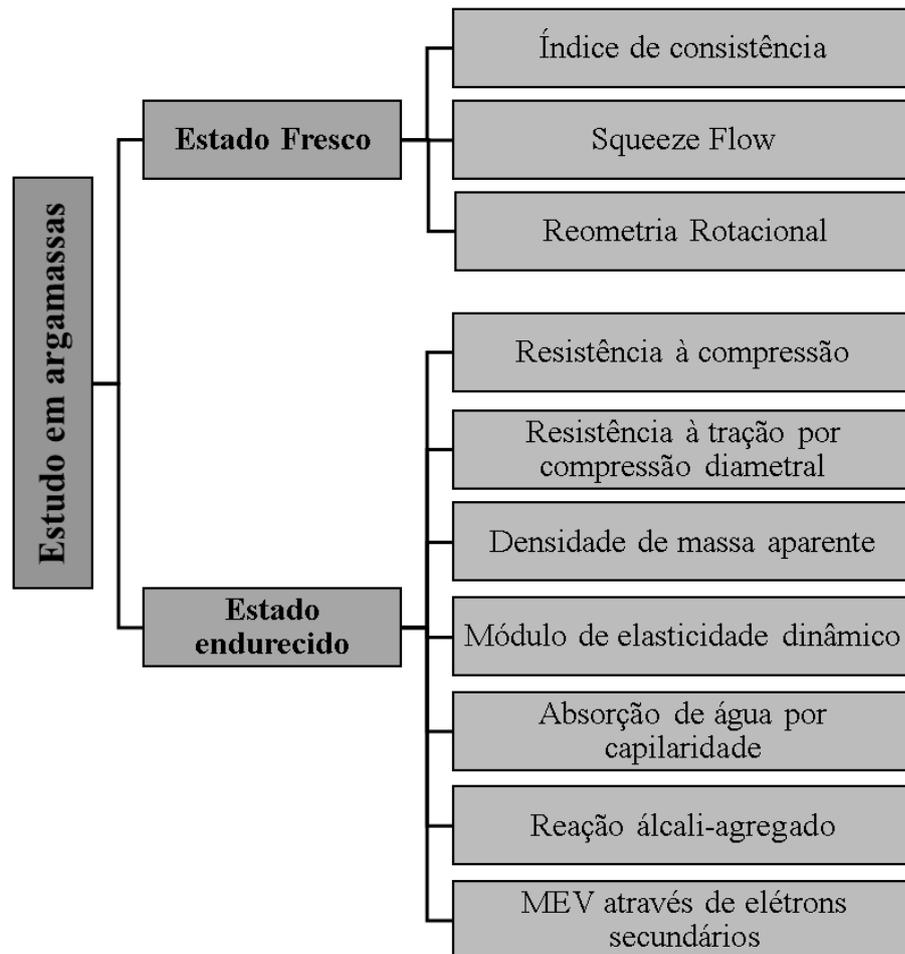


Figura 15 – Ensaio realizados em argamassa

4.3.1 Ensaio realizados para a caracterização dos materiais.

Antes de iniciar o programa experimental propriamente dito, foi necessário realizar ensaios para caracterizar química e fisicamente os agregados e aglomerantes utilizados nesta pesquisa. Ressalta-se que todos os resultados apresentados no item 4.3.2 foram realizados em laboratórios da UFRGS, sendo estes detalhados a seguir

4.3.1.1 Fluorescência de raio X

A composição química das matérias-primas foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), realizada com aparelho marca Shimadzu, modelo XRF1800, do Laboratório de cerâmica (LACER) da UFRGS.

4.3.1.2 Área superficial

A área específica das partículas dos agregados e aglomerantes foi medida a partir do método de BET (*Brunauer, Emmett, Teller*), no equipamento Nova Station A, do LACER/UFRGS.

4.3.1.3 Granulometria a laser

A análise de distribuição do tamanho de partícula (DTP) foi realizada por difração a laser em um equipamento CILAS, *Particle Size Analyser*, modelo CILAS 1180 *Liquid* (CILAS, Orleans, França), no LACER/UFRGS. A faixa de análise utilizada foi de 0,04 a 2500 μm .

4.3.1.4 Difração de raios X

As análises de difração de Raios X para avaliação qualitativa dos materiais foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. Para a realização deste ensaio os materiais foram passados pelo peneira n°200 e após encaminhados ao LACER. Foi utilizado um difratômetro modelo Philips X'Pert MPD, com tubo cerâmico modelo PW 3373/00 e detector proporcional modelo PW 3011/10, raios X CuK α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) com passo de $0,05^\circ$. A identificação das fases cristalinas presentes nas amostras foi realizada através do software X'Pert High Score, comparando os resultados obtidos através das análises dos picos principais de cada fase identificada nas fichas PDF (*Powder Diffraction Files*).

4.3.1.5 Microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários

Para análise morfológica dos grãos foram geradas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários, tendo estas sido realizadas no Centro de Microscopia eletrônica (CME) da UFRGS. O microscópio eletrônico utilizado foi da marca JSM 6060, com uma tensão de operação de 0,1 a 30kV com resolução máxima de 3nm. As amostras foram preparadas da seguinte maneira: primeiramente foi extraída a amostra do corpos de prova através de sua serragem; lixamento para obter planicidade de face superior; inserção em *stab* sobre uma fita de carbono, seguida pela metalização com ouro, sendo as amostras mantidas em estufa até o momento do ensaio.

4.3.1.6 Granulometria

A composição granulométrica dos agregados miúdos foi determinada a partir do ensaio previsto na NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Para isso, foram utilizadas as peneiras da série normal, sendo que o agitação do conjunto foi realizado de forma manual. Este ensaio foi realizado no LAMTAC.

4.3.2 Materiais utilizados

Neste item serão apresentados os materiais que foram utilizados no presente trabalho e suas respectivas características físicas e químicas. Todos os ensaios realizados para a caracterização dos materiais foram realizados em laboratórios da UFRGS, conforme especificado no item 4.3.1.

4.3.2.1 Aglomerantes

a. Cimento Portland branco estrutural

O cimento Portland branco estrutural, classe de resistência de 40MPa, foi utilizado na confecção das argamassas avaliadas no estado fresco e endurecido. Este cimento apresenta características similares aos cimento de alta resistência inicial e foi escolhido visto que o foco do trabalho é a futura produção de concretos brancos. A Tabela 6 apresenta o teor de óxidos deste cimento e na Tabela 7 encontra-se, de forma resumida, a caracterização física deste material.

Tabela 6 – Caracterização Química do Cimento Portland Branco

Composto	(%)	Limites de Norma ² (%)
Óxido de cálcio (CaO)	67,5	-
Dióxido de silício (SiO ₂)	22,4	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	1,68	-
Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,62	4
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,29	-
Óxido de magnésio (MgO)	0,27	6,5
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,05	-
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,06	-
CO ₂	2,37	11

Na₂O eq: 0,09%

² Limites estabelecidos pela NBR 12989 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993).

Tabela 7 - Caracterização Física e Química do Cimento Portland Branco

Cimento Portland Branco		Normas	Limites de Norma ³
Área específica (m ² /g)	4,87	NBR NM 76:1996	-
Diâmetro médio (μ)	14,75		
Massa específica (g/cm ³)	3,06	NBR NM 23:2001	-
Tempo de pega (h)	Início de pega	1h14min	≥ 1
	Fim de pega	1h48min	≤ 10
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	31,82	≥ 15
	7 dias	38,99	≥ 25
	28 dias	45,30	≥ 40
Perda ao fogo (%)	6	NBR NM 18:2012	≤ 12

³ Limites estabelecidos pela NBR 12989 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993).

Observou-se que o tempo de pega do cimento Portland branco, foi muito curto, o que dificultou a execução dos ensaios no estado fresco. Quanto aos demais quesitos este cimento satisfaz todas as exigências da NBR 12989:1993 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993), como pode ser observado na Tabela 7. Ainda de acordo com esta tabela, quanto à resistência à compressão nota-se que aos 3 dias de idade este cimento já apresentou mais que o dobro da resistência mínima exigida.

b. Cimento padrão ABCP

A norma estipula que no ensaio empregado para avaliação da reatividade do agregado seja utilizado um cimento padronizado, ou seja, com limitação no equivalente alcalino ($0,90 \pm 0,10$), na finura (4.600 ± 200 cm²/g) e na expansão em autoclave (inferior a 0,20%), além da isenção de adições.

Tais características dificilmente são conseguidas em cimentos fornecidos no mercado. Sendo assim, foi empregado o cimento padrão produzido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para este fim.

A Tabela 8 apresenta os óxidos presentes no cimento padrão.

Tabela 8 – Caracterização química - Cimento padrão ABCP

Composto	(%)
Óxido de cálcio (CaO)	53,18
Dióxido de silício (SiO ₂)	15,85
Trióxido de enxofre (SO ₃)	4,80
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	4,35
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	2,90
Óxido de magnésio (MgO)	0,93
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,87
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,28
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,26
Óxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0,15
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,12
Óxido de Manganês (MnO)	0,09
Óxido de Zinco (ZnO)	0,06
CO ₂	16,15

Na Tabela 9 encontra-se, de forma resumida, a caracterização física deste material, conforme os ensaios realizados. O ensaio para a obtenção do diâmetro médio se deu a partir da granulometria a laser e a área específica foi realizada a partir do método de BET. Todo cimento utilizado nesta pesquisa é proveniente de um único lote de fabricação.

Tabela 9 - Caracterização Física e Química do Cimento padrão ABCP

Cimento Portland Padrão ABCP		Normas	Limites de Norma⁴
Área específica (m²/g)	4,92	NBR NM 76:1996	-
Diâmetro médio (mμ)	12,44		-
Massa específica (g/cm³)	3,09	NBR NM 23:2001	-
Tempo de pega (h)	Início de pega	3h04min	≥ 1
	Fim de pega	5h15min	≤ 10
Perda ao fogo (%)	4	NBR NM 18:2012	≤ 4,5

⁴ Limites estabelecidos pela NBR 5733 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993).

Quanto as caracterizações física e química este cimento satisfaz todas as exigências da NBR 5733 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993).

4.3.2.2 Agregados miúdos

Para a confecção das argamassas foram empregados o agregado miúdo de calcário (referência) e os resíduos de ágata, na forma de pó e agregado miúdo.

Para uma posterior análise dos resultados, o agregado miúdo de calcário foi separado em frações e composto com as mesmas faixas granulométricas do agregado miúdo de ágata.

a. Calcário

O agregado calcário é um material carbonático composto de calcita, dolomita e quartzo. Este material é o mais utilizado para a produção de concretos brancos.

A composição química das matérias-primas foi determinada por fluorescência de raios X (FRX). A Tabela 10 mostra os resultados obtidos, onde é possível verificar a predominância de óxido de cálcio e dióxido de silício, elementos que podem contribuir para o desencadeamento da reação álcali-carbonato e reação álcali-sílica, respectivamente. Cabe ressaltar que a reação álcali-carbonato não é foco do estudo, deste modo não foram realizados ensaios que avaliem essa reação.

Tabela 10 – Caracterização química do agregado miúdo de calcário

Composto	(%)
CaO	30,66
SiO ₂	20,17
MgO	9,43
Fe ₂ O ₃	1,67
Al ₂ O ₃	1,81
K ₂ O	0,31
SO ₃	0,26
TiO ₃	0,15
MnO	0,06
P ₂ O	0,05
SrO	0,05
CO ₂	35,36

A Figura 16 ilustra a composição mineralógica do agregado, onde é possível perceber suas características cristalinas, e a presença da dolomita (CaMg(CO₃)₂)⁸, calcita (CaCO₃)⁹, quartzo (SiO₂)¹⁰, muscovita (KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂)¹¹ e caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄)¹².

66

⁸ Ficha nº 01- 084 - 1208

⁹ Ficha nº 01 -085 - 1108

¹⁰ Ficha nº 00 – 046 – 1045

¹¹ Ficha nº 01 – 070 - 1868

¹² Ficha nº 01 – 075 - 1593

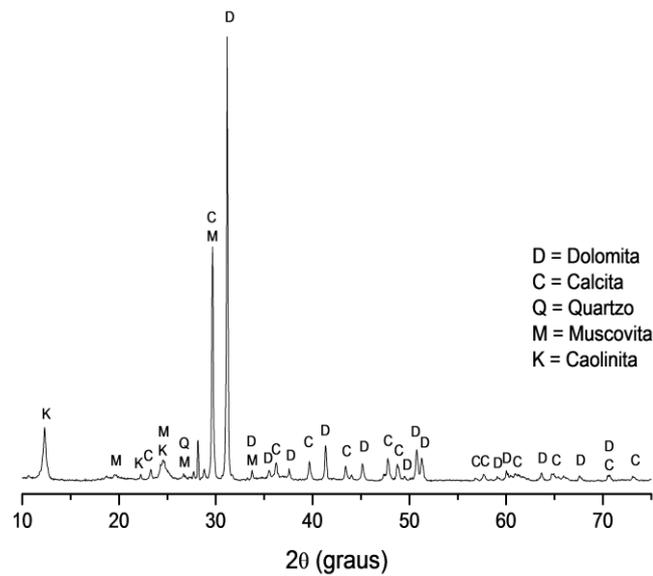


Figura 16- Difratoograma de raio X do agregado miúdo de calcário

Na Figura 17 e na Tabela 11 observa-se o resultado da distribuição granulométrica deste agregado, após sua composição.

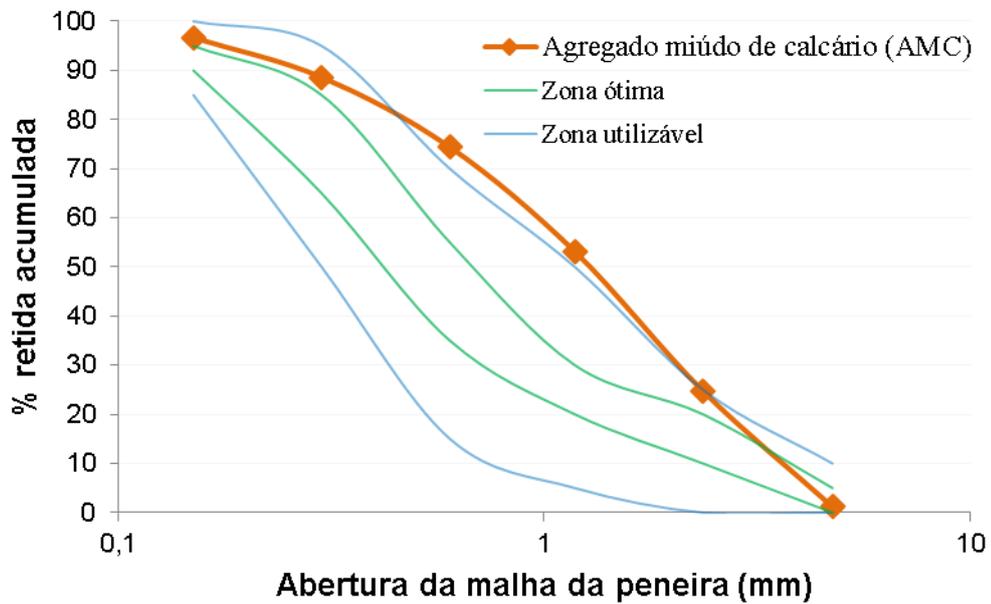


Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo de calcário

Tabela 11 - Caracterização física do agregado miúdo de calcário

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	24	25	0	10	20	25
1,18	28	53	5	20	30	50
0,6	21	74	15	35	55	70
0,3	14	89	50	65	85	95
0,15	8	97	85	90	95	100
Fundo	3	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		3,39	NBR NM 248:2003			
Dimensão Máxima (mm)		4,75				
Massa Específica (g/cm³)		2,73	NBR NM 52:2009			
Absorção de Água (%)		1,81	NBR NM 30:2001			
Massa Unitária (g/cm³)		1,25	NBR NM 45:2006			

Quanto à morfologia, observa-se, a partir das imagens de MEV da Figura 18, que o agregado miúdo de calcário apresenta tanto partículas de forma lamelar quanto cúbicas.

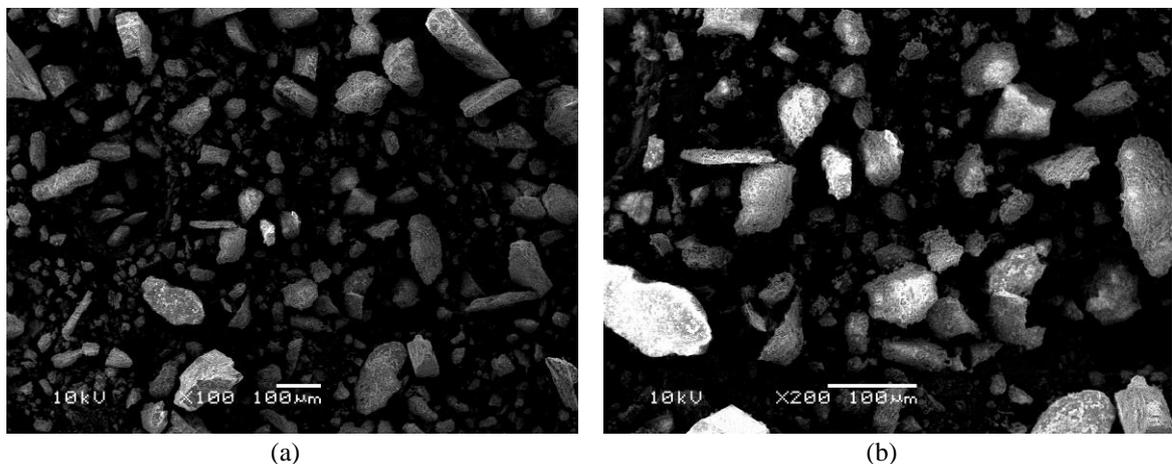


Figura 18 – Micrografia eletrônica por varredura através de elétrons secundários do agregado calcário com aumento de (a) 100x; (b) 200x.

Na Figura 19, observa-se a forma e textura superficial dos agregados miúdos de calcário. Pode-se confirmar que o AMC apresenta um formato mais cúbico, como já mencionado, e quanto a textura superficial observa-se a rugosidade (Figura 19b) deste material.



(a)

(b)

Figura 19 – Fotografia dos grãos dos agregados miúdos de calcário retidos na peneira de malha #2,4mm

b. Agregado miúdo de ágata e pó de rolagem de ágata¹³

Os resíduos utilizados neste trabalho são oriundos de uma empresa de beneficiamento de ágata. Foi realizada uma visita à empresa e coletados 5 kg de cada tipo de resíduo, conforme recomendado pela NBR NM 26 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Estes foram avaliados frente ao que preconiza a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) para produção de concretos.

Após esta análise inicial, foi feita nova visita na empresa e realizada a coleta de 500 kg do agregado miúdo de ágata e 200kg de pó de rolagem de ágata, repetindo-se os ensaios com o novo lote. Como estes eram armazenados no pátio da empresa, para evitar que o resíduo apresentasse contaminação com materiais orgânicos, os mesmos foram coletados diretamente no britador de mandíbula.

Em laboratório, o agregado miúdo de ágata foi lavado, seco ao sol, peneirado em peneira com malha de abertura 4,8mm, em seguida foi quarteada a fração miúda, sendo a mesma armazenada em bombonas até o momento da mistura. Quanto ao pó de rolagem de ágata, este foi armazenado em bombonas, sem nenhum tipo de beneficiamento. A Figura 20 demonstra as frações utilizadas dos resíduos, agregado miúdo e pó de rolagem.

69

¹³ Será adota a nomenclatura de Pó de Rolagem de Ágata, para o resíduo originário no processo de rolagem das rochas de ágata, nomenclatura utilizada pelas empresas de beneficiamento de rochas. Cabe ressaltar que este resíduo não apresenta apenas partículas finas.



Figura 20 - Resíduos de ágata. (a) Fração miúda; (b) pó de rolagem

A Tabela 12 mostra a composição química dos agregados de ágata obtida na fluorescência de raios X, onde é possível verificar a predominância de dióxido de silício, na forma de quartzo (SiO_2)¹⁴, como observado no difratograma da amostra (Figura 21), este elemento pode desencadear a reação álcali-agregado.

Tabela 12 – Caracterização química do agregado miúdo de ágata (AMA) e pó de rolagem de ágata (PRA)

Composto (%)	AMA	PRA
SiO_2	90,87	95,01
Fe_2O_3	3,92	1,24
Al_2O_3	1,46	0,85
CaO	1,19	0,59
SO_3	0,29	0,06
TiO_2	0,26	-
MnO	0,10	0,03
ZrO_2	0,05	-
CO_2	1,82	2,06

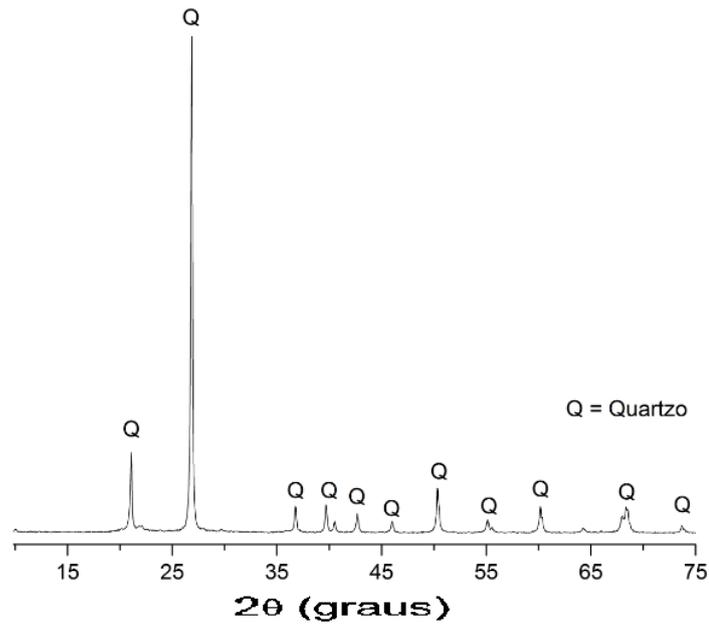


Figura 21 - Digratograma de raio X do agregado miúdo de ágata

As composições granulométricas do agregado miúdo de ágata e do pó de rolagem de ágata podem ser observadas na Figura 22 e Tabela 13. O agregado miúdo de ágata, mesmo não estando enquadrado perfeitamente dentro das zonas de utilização e ótima, visto que ultrapassa os limites recomendados pela norma quanto ao percentual de material retido na peneira 600 e 1,2, encontra-se distribuído em todas as frações. Já o pó de rolagem de ágata apresenta grande quantidade de material retido nas peneiras de maior malha e passantes na peneira 150 μ m.

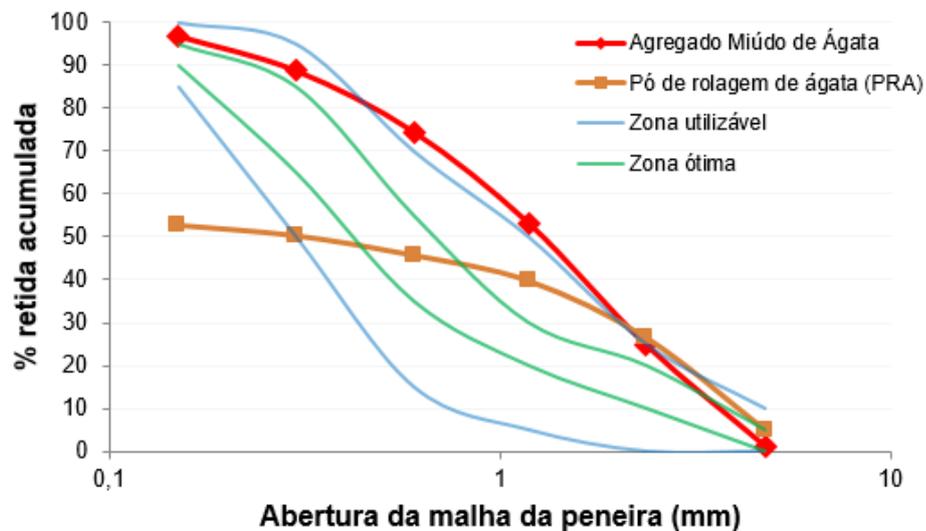


Figura 22 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo de ágata

Tabela 13 - Caracterização física do agregado miúdo de ágata

Abertura das peneiras (mm)	Agregado miúdo de ágata		Pó de rolagem de ágata		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
					Limites inferiores		Limites Superiores	
					Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	1	1	5	5	0	0	5	10
2,36	24	25	22	27	0	10	20	25
1,18	28	53	13	40	5	20	30	50
0,6	21	74	6	46	15	35	55	70
0,3	15	89	5	51	50	65	85	95
0,15	8	97	2	53	85	90	95	100
Fundo	3	100	47	100	-	-	-	-
Módulo de Finura	3,39		2,20		NBR NM 248:2003			
Dim. Máxima (mm)	4,75		4,75					
Massa Esp. (g/cm³)	2,63		2,53		NBR NM 52:2009			
Abs. de Água (%)	0,76		0,76		NBR NM 30:2001			
Massa Unit.(g/cm³)	1,54		1,54		NBR NM 45:2006			

Observando a Tabela 13, no que se refere ao PRA é possível notar que 53% do resíduo é considerado um agregado miúdo grosso com Módulo de finura de 4,2 e 47% do PRA é considerado como fíler (>150 μm).

Para complementar a análise do pó de rolagem de ágata, foi realizada uma granulometria a laser e área superficial, a partir do método de BET, do material passante na peneira 150 μm , conforme a Tabela 14 e Figura 23.

Tabela 14 - Caracterização física do pó de rolagem de ágata

Diâmetro da malha da peneira passante 10% (μm)	1,00
Diâmetro da malha da peneira passante 50% (μm)	5,67
Diâmetro da malha da peneira passante 90% (μm)	25,57
Diâmetro médio (μm)	9,72
Área superficial BET (m²/g)	5,45

Na Tabela 14, nota-se que o pó de rolagem de ágata apresenta diâmetro médio de 9,72 μm , sendo este menor que o cimento Portland Branco que tem um diâmetro médio de 14,75 μm . Esse material passante na peneira 150 μm provavelmente proporcionará um efeito fíler nas argamassas produzidas, conforme será discutido no capítulo seguinte.

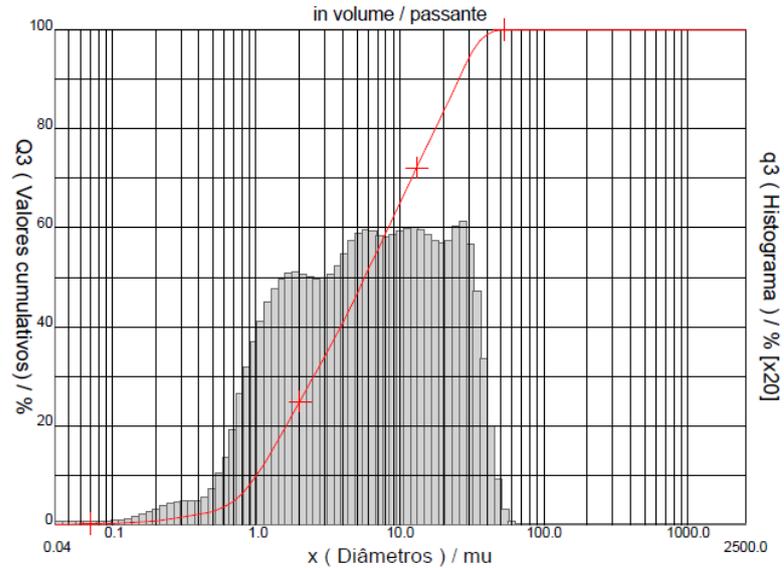


Figura 23 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata passante na peneira 150µm.

Quanto à morfologia, observa-se, a partir das imagens de MEV da Figura 24 e as imagens da Figura 25, que o agregado miúdo de ágata apresenta partículas mais alongadas e com textura mais lisa do que à apresentada pelo agregado calcário.

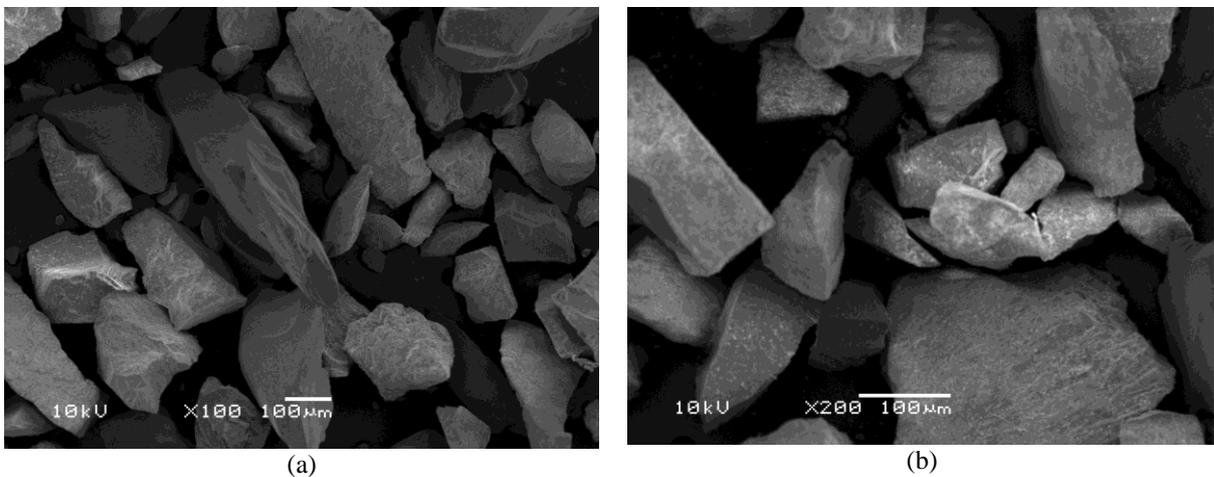


Figura 24 – Micrografia eletrônica por varredura através elétrons secundários, para a visualização da morfologia do agregado miúdo de ágata com aumento de (a) 100x; (b) 200x

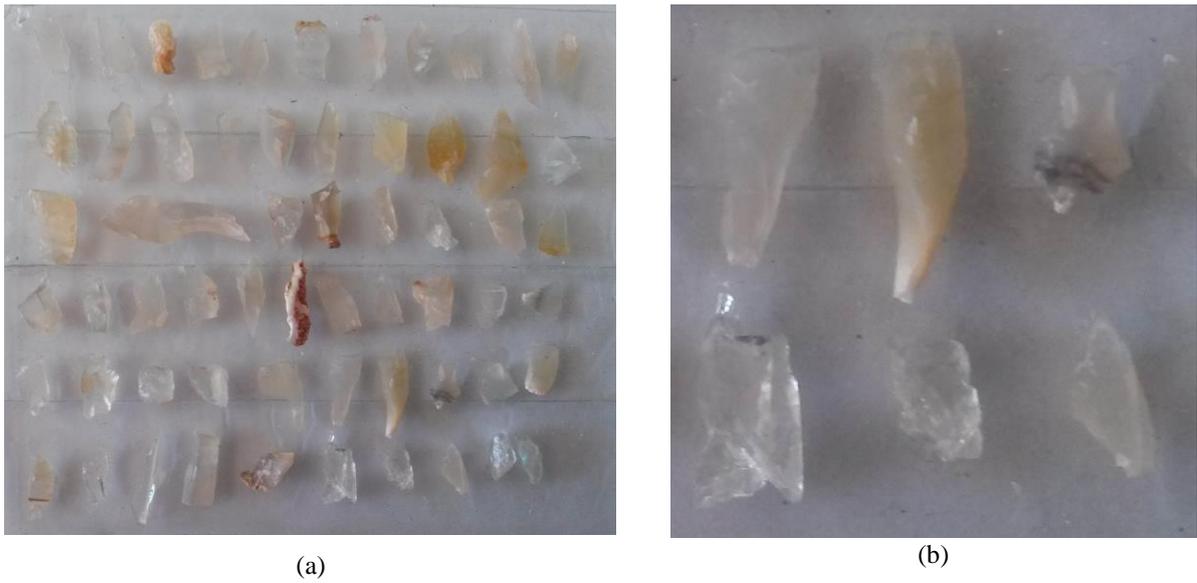


Figura 25 – Fotografia dos grãos de agregados miúdos de ágata retidos na peneira de malha #2.4mm

Nas Figura 26 e Figura 27, observa-se que o pó de rolagem de ágata apresenta partículas mais arredondadas e com textura lisas, com a sobreposição de partículas finas (fíler).

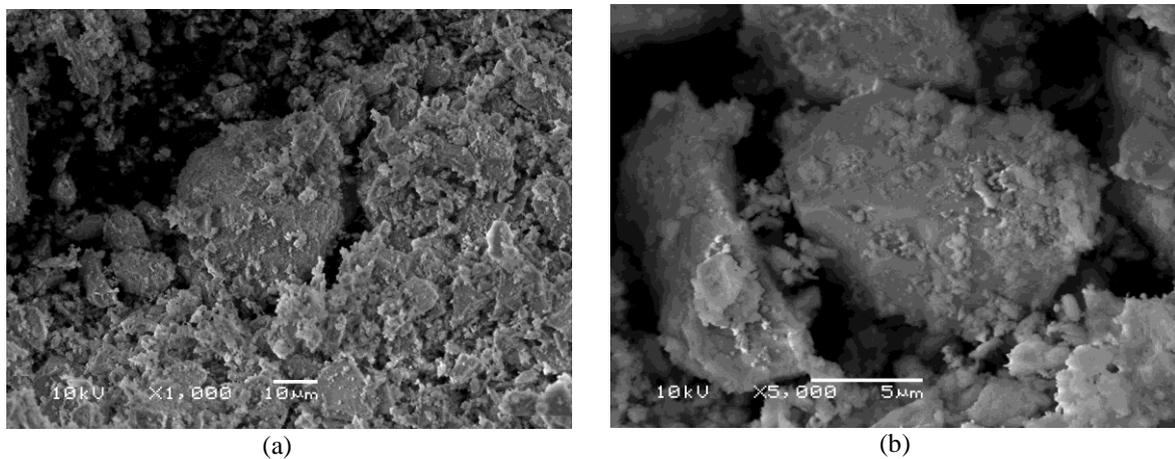


Figura 26 - Micrografia eletrônica por varredura através de elétrons secundários, para a visualização da morfologia do pó de rolagem de ágata com aumento de (a) 1000x; (b) 5000x

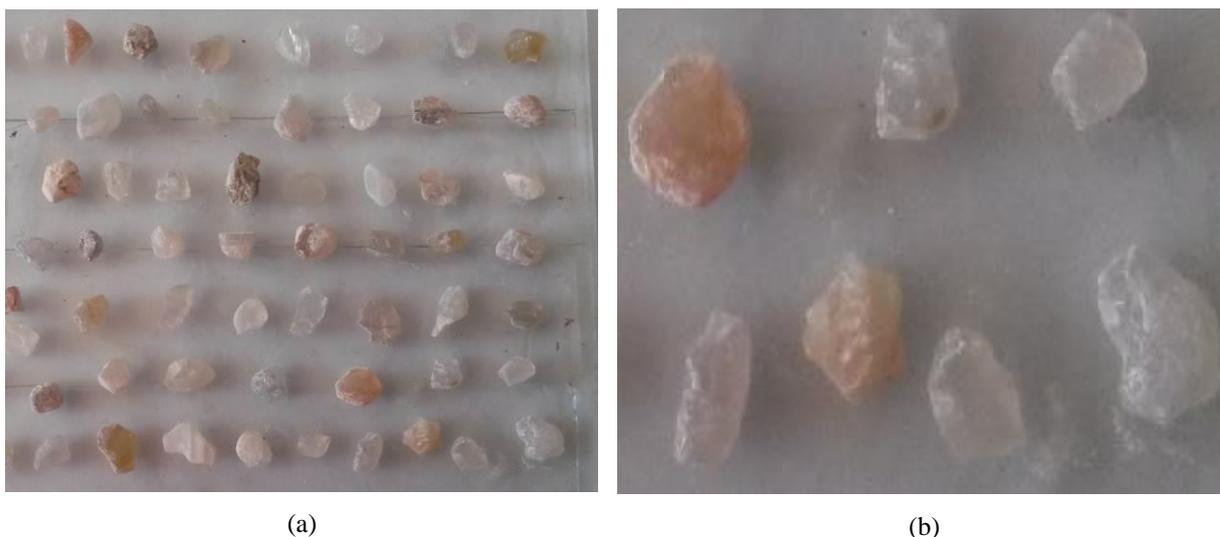


Figura 27 – Fotografia dos grãos pó de rolagem de ágata retidos na peneira de malha #2.4mm

Além das caracterizações já apresentadas, foi realizado o ensaio de determinação de atividade pozolânicas, para o pó de rolagem de ágata, seguindo o que preconiza as NBR 5751 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), e NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A Tabela 15, apresenta os resultados obtidos no ensaio de índice de pozolancidade com cal aos 7 dias, já a Tabela 16, apresenta os resultados obtidos no ensaio de índice de pozolancidade com cimento Portland aos 28 dias. Para o primeiro, foram moldados 3 cp's, para o segundo ensaio foram moldados 4 cp's para a argamassa de referência e a argamassa com substituição.

Tabela 15 – Índice de pozolancidade com cal aos 28 dias do pó de rolagem de ágata

Resistência à compressão (Mpa)	Argamassa de Referência (Mpa)
Individual	5,13
	5,02
	5,16
Média	5,10
Desvio Padrão (Mpa)	0,07
Coeficiente de Variação (%)	1,44

Tabela 16 – Índice de pozolanicidade com cimento Portland aos 28 dias do pó de rolagem de ágata

Resistência à compressão (Mpa)	Argamassa de Referência (Mpa)	Argamassa com PRA (MPa)
Individual	46,34	37,96
	45,07	36,47
	42,07	37,64
	45,91	36,21
Média	44,85	37,07
Desvio Padrão (Mpa)	1,93	0,86
Coefficiente de Variação (%)	4,30	2,31
Índice de desempenho com cimento Portland (%)	-	83

Para um material ser considerado pozolânico, este deve atender a requisitos químicos e físicos, conforme recomendado pela NBR 12653:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Esta norma estabelece que o material pozolânico deve apresentar índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias ≥ 6 MPa, e índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle, $\geq 90\%$. Deste modo, observando a Tabela 15 e Tabela 16, a resistência média foi de 5,10 MPa e o Índice de pozolanicidade do PRA foi de 83%, respectivamente, deste modo PRA não é classificado como um material pozolânico. Entretanto, deve-se levar em consideração que os resultados obtidos nos dois ensaios ficam muito próximo dos limites mínimos estabelecidos pelo NBR, podendo este material apresentar uma reatividade baixa, o que será demonstrado nos resultados obtidos no capítulo seguinte.

Vale ressaltar, que a norma NBR12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) foi recentemente atualizada e o requisitos de índice de pozolanicidade foram alterados, confrontando o resultado obtido com o que era exigido pela NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), o índice de atividade pozolânica era de no mínima 75%, logo o PRA seria considerado um material pozolânico.

4.4 ESTUDOS EM ARGAMASSA

4.4.1 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

4.4.1.1 Determinação da quantidade de material

Para determinar a quantidade de material a ser utilizado em cada traço, primeiramente foi verificada a massa específica destes materiais. Como estas são diferentes, as misturas foram realizadas em volume, com subsequente transformação para um proporcionamento em massa. Da mesma forma, efetuou-se o cálculo da massa equivalente à porcentagem de substituição de agregado miúdo de ágata (AMA) sobre o volume de agregado miúdo de calcário, conforme a Equação 1:

$$m_{AMA} = y_{AMA} \cdot TE \cdot (m_c / y_c) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

m_{AMA} = massa de agregado miúdo de ágata (AMA), correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de agregado miúdo de calcário (kg);

y_{AMA} = massa específica do agregado miúdo de ágata (kg/dm^3);

TE = porcentagem de substituição (teor) de agregado miúdo de ágata (AMA), em relação ao volume de agregado miúdo de calcário;

m_c = massa de agregado miúdo de calcário (kg);

y_c = massa específica do agregado miúdo de calcário (kg/dm^3).

Para a substituição do agregado miúdo de calcário por pó de rolagem ágata (PRA), também efetuou-se o cálculo da massa equivalente à porcentagem de substituição deste pó sobre o volume do agregado miúdo de calcário (AMC), conforme a Equação 2.

$$m_{PRA} = y_{PRA} \cdot TE \cdot (m_c / y_c) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

m_{PRA} = massa de pó de rolagem de ágata (PRA), correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de agregado miúdo de calcário (kg);

y_{PRA} = massa específica do pó de rolagem ágata (kg/dm^3);

TE = porcentagem de substituição (teor) de pó de rolagem de ágata (AMA), em relação ao volume de agregado miúdo de calcário;

m_c = massa de agregado miúdo de calcário (kg);

y_c = massa específica do agregado miúdo de calcário (kg/dm^3).

Da mesma forma, para a substituição do agregado miúdo de ágata por pó de rolagem de ágata (PRA), realizou-se o cálculo da massa equivalente à percentagem de substituição deste pó sobre o volume de agregado miúdo de ágata (AMA), conforme

$$m_{PRA} = y_{PRA} \cdot TE \cdot (m_{AMA} / y_{AMA}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

M_{PRA} = massa de pó de rolagem ágata (PRA), correspondente à percentagem de substituição sobre o volume de agregado miúdo de ágata (kg);

Y_{PRA} = massa específica do pó de rolagem ágata (kg/dm³);

TE = percentagem de substituição (teor) de pó de rolagem de ágata (AMA), em relação ao volume de agregado miúdo de ágata;

M_{AMA} = massa de agregado miúdo de ágata (kg);

Y_{AMA} = massa específica do agregado miúdo de ágata (kg/dm³).

4.4.1.2 Dosagem das argamassas

Para a realização da dosagem de água, e posterior confecção dos corpos de prova (cp's), as misturas de argamassa foram realizadas conforme a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

Nesta dosagem, fixou-se a consistência em 225±10 mm, para todos os traços, variando, deste modo, a quantidade de água para cada mistura. Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram mantidos durante 24 horas em ambiente de laboratório e cobertos. Após este período eles foram desmoldados e foram submetidos a cura submersa em água saturada com cal, e a ensaios aos 28 dias de idade. Durante as misturas, percebeu-se que todas as argamassas produzidas com o agregado miúdo de calcário demandaram mais água do que as produzidas com agregado miúdo de ágata, para uma mesma consistência. Essa diferença entre a quantidade de água requerida pelos agregados pode estar sendo influenciada pela absorção dos grãos, visto que os mesmos apresentam grau de absorção diferentes, onde o AMC é mais poroso do que o AMA, e também a textura dos agregados. Notou-se, também, que com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo por pó de rolagem, a relação água/aglomerante também se elevava, fator que pode ser atribuído ao aumento de finos da mistura. Estes pontos podem ser observados na Tabela 17, onde também está apresentada a relação água/materiais secos (a/ms).

Tabela 17 – Relação água/aglomerante e água/materiais secos em função ao teor de substituição do agregado miúdo por pó de rolagem de ágata

Agregado	Traço	% de substituição por pó de rolagem de ágata							
		0%		15%		30%		45%	
		a/a	a/ms	a/a	a/ms	a/a	a/ms	a/a	a/ms
Agregado miúdo de calcário	1:1,5	0,36	1,44	0,40	1,61	0,44	1,79	0,47	1,92
	1:3	0,56	1,40	0,58	1,45	0,62	1,58	0,73	1,87
	1:4,5	0,79	1,43	0,80	1,47	0,83	1,54	0,97	1,81
Agregado miúdo de ágata	1:1,5	0,32	1,31	0,37	1,53	0,43	1,78	0,48	1,99
	1:3	0,52	1,34	0,56	1,45	0,61	1,58	0,72	1,87
	1:4,5	0,75	1,41	0,76	1,43	0,84	1,59	0,90	1,71

a/a: relação água/aglomerante; a/ms: água/material seco

4.4.2 Ensaios realizados nas argamassas

Para atender os objetivos propostos neste trabalho foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta, de forma resumida, os ensaios que foram realizados. Avaliar as características das argamassas no estado fresco é fundamental para entender a influência da granulometria, forma dos agregados e empacotamento dos mesmos frente à trabalhabilidade e à consistência da mistura. Já no estado endurecido foi verificada a influência destes materiais nas argamassas moldadas, frente a suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

4.4.2.1 Ensaios no estado fresco

A Tabela 18 apresenta a norma empregada para cada ensaio no estado fresco.

Tabela 18- Propriedades avaliadas no estado fresco

ENSAIO	NORMA
Índice de consistência	NBR 13.276: 2005a
<i>Squeeze Flow</i>	NBR 15839:2010
Reometria rotacional	-

a. *Squeeze Flow*

A reologia é definida como uma ciência que estuda a deformação e escoamento de uma matéria (SOUSA; LARA, 2005).

O ensaio do *squeeze flow* é considerado eficiente para analisar a reologia dos materiais cimentícios (SILVA et al., 2005) e foi utilizado com o objetivo de complementar o ensaio de índice de consistência.

A realização do ensaio de *squeeze flow* foi feita no Laboratório de materiais e tecnologia do ambiente construído, LAMTAC/NORIE/UFRGS, utilizando uma máquina universal de ensaios, da marca Emic, com controle de deslocamento e capacidade 1kN de carga compressiva com resolução mínima de 10N.

Este ensaio é preconizado pela NBR 15839 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS:2010). Sua realização visa identificar a influência dos agregados miúdos estudados, frente à tensão de escoamento ou à viscosidade das argamassas diante da sensibilidade expressa por esse ensaio.

Como o ensaio é destinado à argamassas de revestimento e assentamento, a norma solicita que a preparação das argamassas seja de acordo com tal finalidade. Entretanto, como as argamassas estudadas visam sua utilização futura em concreto, optou-se por alterar o método de mistura das mesmas, sendo estas misturadas de acordo com a NBR 7215.

Após a preparação das misturas, foi realizada a moldagem dos cp's das argamassas. Com o auxílio de uma colher, a argamassa foi inserida nos moldes e aplicados 10 golpes paralelos e uniformemente distribuídos com o auxílio de uma espátula, em seguida o molde foi girado à 90° e repetidos os 10 golpes. Para finalizar foi realizado o arrasamento da mistura, sendo retirado o molde cuidadosamente, posicionando-o na prensa para a realização do ensaio, conforme a Figura 28. Foi cronometrado o tempo e realizado o ensaio de compressão nos corpos de prova em 10 e 15 minutos. Aos 10 minutos foi aplicada a carga de 1N com uma velocidade de 3mm/s e aos 15 minutos esta velocidade foi de 0,1mm/s, conforme preconizado pela NBR 15839 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

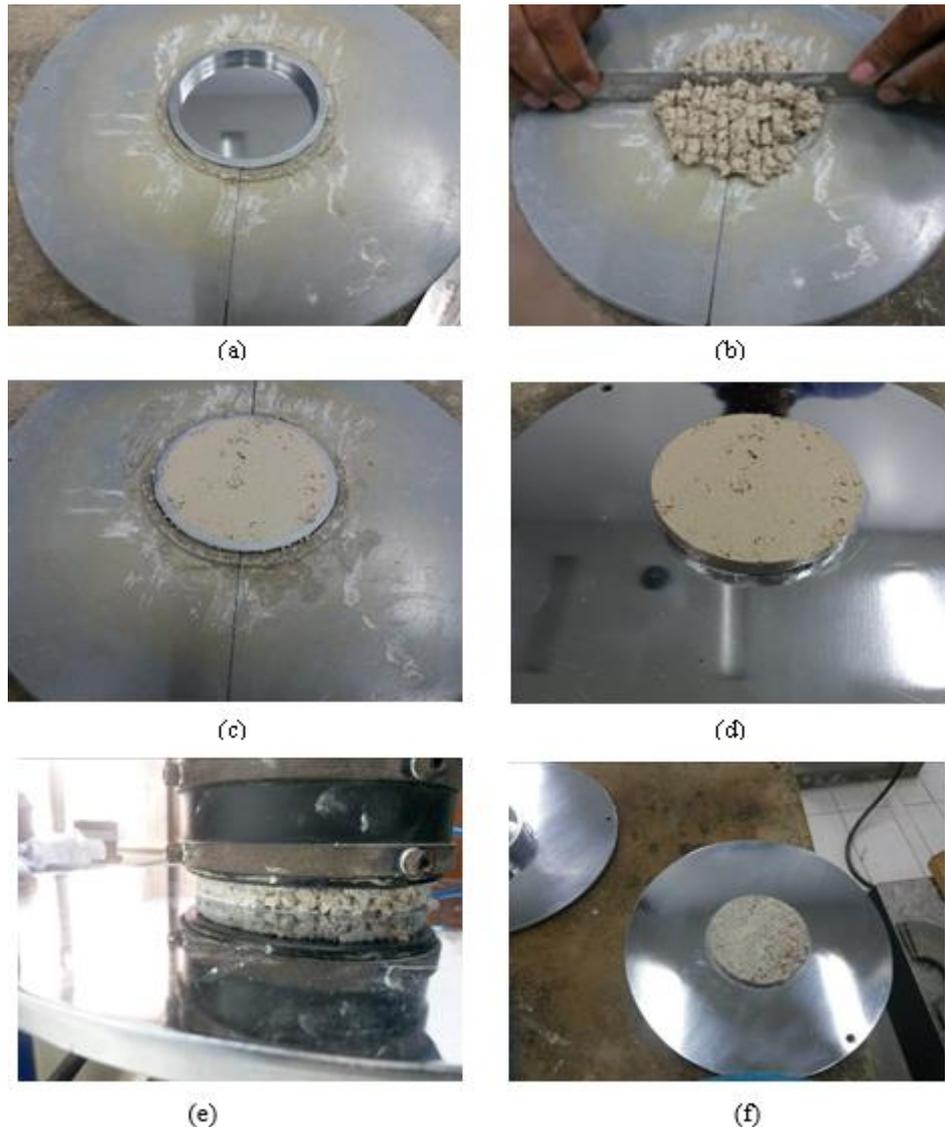


Figura 28 – Execução do Ensaio – *Squeeze Flow* – (a) Aparato para o ensaio; (b) moldagem do corpo de prova; (c) cp após rasamento; (d) cp pronto para o ensaio; (e) aplicação da carga no cp; (f) cp após o ensaio.

b. Reometria rotacional

O ensaio de reometria rotacional, foi realizado no Laboratório de Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) da UFRGS. A caracterização reológica foi feita em reômetro rotacional da marca Brookfield R/S plus. Para a realização destes ensaios foi utilizada palheta do tipo vane, V 20x10, com 20mm de altura e 10mm de diâmetro, em recipiente padronizado para todas as argamassas. A escolha desta palheta se deu a partir da realização de ensaios preliminares, onde também foi testada a aplicação do torque e a taxa de cisalhamento mais adequadas para as argamassas em estudo. A Figura 29 ilustra o Reômetro rotacional e a palheta utilizados.

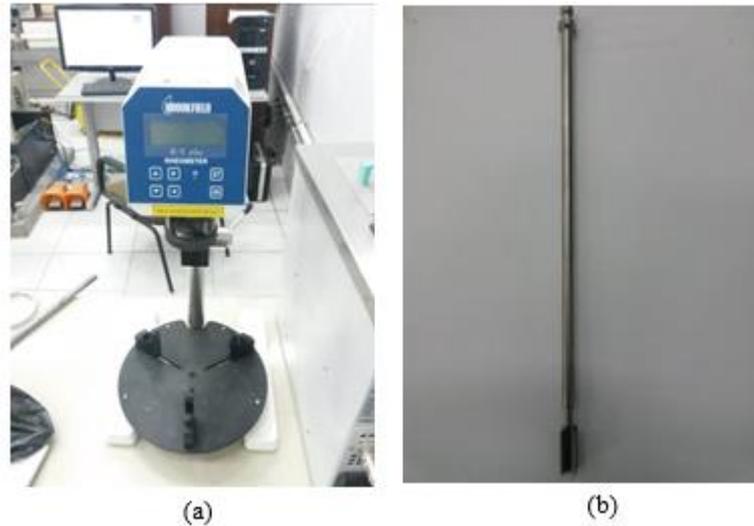


Figura 29 – Equipamentos utilizados; (a) Reômetro rotacional; (b) palheta v20x10

Posteriormente às medições no reômetro rotacional, os dados foram tratados com o software Rheo3000.

Não existe normativa nacional e internacional para utilização da reometria rotacional em matrizes cimentícias, desta maneira foi adaptada a metodologia utilizada por Stolz (2015), sendo que a rotina escolhida para a análise das argamassas consistiu em quatro patamares de leituras, sendo uma a cada 20 segundos, atingindo-se uma taxa de cisalhamento máxima de 50 1/s (Figura 30), conforme detalhada a seguir.

- a. Taxa de cisalhamento 0 – 16,67(1/s) aos 20 segundos;
- b. Taxa de cisalhamento em 16,67 (1/s) durante 20 segundos;
- c. Taxa de cisalhamento 16,67 – 33,32 (1/s) aos 40 segundos;
- d. Taxa de cisalhamento em 33,32 (1/s) durante 20 segundos;
- e. Taxa de cisalhamento 33,32 – 49,99 (1/s) aos 60 segundos;
- f. Taxa de cisalhamento em 49,99 (1/s) durante 20 segundos;

Vale lembrar que o uso de patamares para análise reológica de argamassas é indicado por alguns pesquisadores, como Seabra et al. (2006).

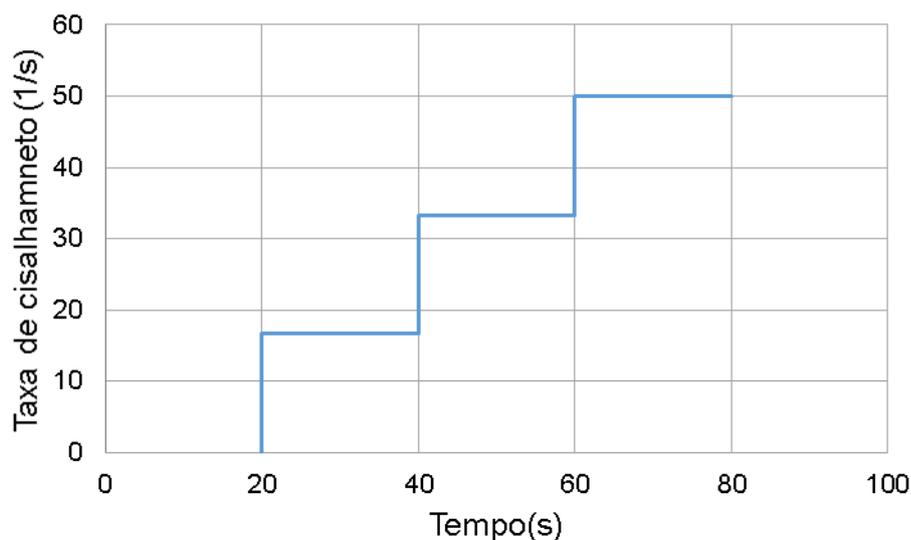


Figura 30 - Rotina utilizada no ensaio de reometria rotacional

4.4.2.2 Ensaio no estado endurecido

Na Tabela 19 são apresentados os ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido, a quantidade e dimensões dos cp's para cada um deles e a norma que os preconiza.

Tabela 19 – Propriedades avaliadas no estado endurecido

ENSAIO	QTDE. DE CP'S	DIMENSÃO DOS CP'S	NORMA
Resistência à compressão	5	Cilíndrico 5x10 cm	NBR 5739:2007
Resistência à tração na compressão diametral	3	Cilíndrico 5x10 cm	NBR 7222:2011
Absorção de água por capilaridade	4	Cilíndrico 5x10 cm	NBR 9779:2012
Densidade de massa aparente	4	Cilíndrico 5x10 cm	NBR 13.280:2005b
Módulo de elasticidade dinâmico	4	Cilíndrico 5x10 cm	NBR 15630:2008b
Reação álcali-agregado	3	Prismático 2,5x2,5x28,5 cm	NBR 15577-4:2008

A seguir será descrito de maneira simplificada o método de execução do ensaio de absorção de água por capilaridade e reação álcali-agregado.

a. Absorção de água por capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade utilizou-se o procedimento da NBR 9.779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) adaptado por Venquiaruto et al. (2014), onde os autores propõem o selamento da superfície lateral dos corpos de prova, garantindo assim a absorção unidirecional e diminuindo as variabilidades decorrentes da evaporação pelas laterais do cp.

Foram moldados quatro corpos de prova de cada mistura, acondicionados em cura submersa por um período de 26 dias, então os cp's tiveram uma das faces retificadas.

Após este procedimento, todos os corpos de prova foram pesados e acondicionados por dois dias em estufa a 100 °C e mais 2 dias em estufa a 60°C. Durante este período foram realizadas pesagem até atingir a constância de massa, seguido por resfriamento em recipiente fechado contendo sílica gel.

Com os cp's resfriados, foi realizado o selamento das laterais com resina epóxi, com exceção de 5 ± 1 mm acima da face que ficaria em contato com a água. Na Figura 31 é possível observar o procedimento adotado, sendo que após 24 horas do selamento os cp's foram ensaiados.

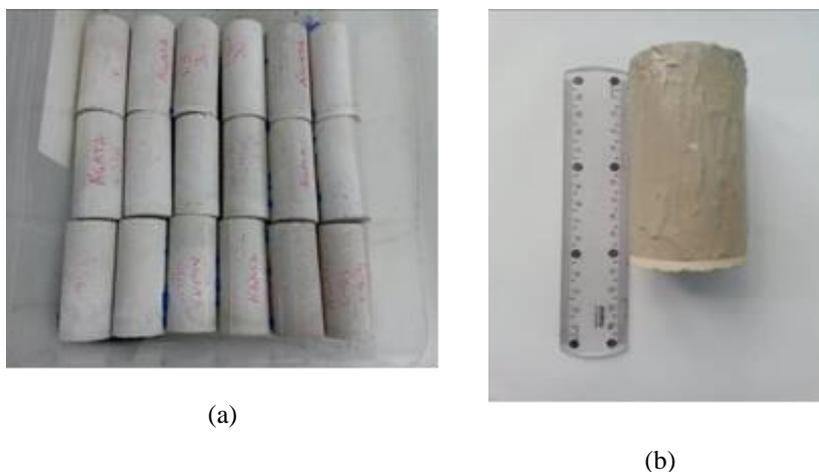


Figura 31 – Execução do Ensaio – Absorção de água por capilaridade: (a) Cp's sem selamento; (b) Cp com selamento lateral em resina epóxi.

Os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa com tampa, onde permaneceram sob uma lâmina de água com $5\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ de altura. As amostras foram pesadas no momento do acondicionamento e após 15 minutos, 45 minutos, 1h30 min, 3h, 4h30min, 6h, 24h, 48h e 72h e 96h do início do ensaio. Após a última pesagem, os cp's foram rompidos por compressão diametral, de modo a verificar a altura de ascensão da água.

b. Ensaio de Reação Álcali-agregado

A fim de avaliar a potencialidade reativa dos agregados frente aos álcalis presentes no cimento Portland, foi realizado o ensaio acelerado das barras de argamassa, conforme NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Os agregados testados foram: agregado miúdo de ágata, agregado miúdo de calcário, pó de rolagem de ágata nos teores de 0%, 15%, 30% e 45% de substituição dos agregados miúdos e areia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

Para analisar a reatividade dos agregados, utilizou-se o cimento Padrão, produzido pela ABCP, que apresenta características padronizadas (conforme preconizada pela NBR 15577- 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008)) , tais como limitação no equivalente alcalino, na finura e na expansão em autoclave, conforme já discutido no ítem 4.3.2.1 b. Utilizou-se também a areia do Instituto de Pesquisas tecnológicas (IPT) por ser considerada um agregado miúdo inerte.

Para a realização deste ensaio, a norma fixa as quantidades de agregado miúdo, cimento e água a serem utilizados.

Entretanto, foi necessário a utilização de um aditivo superplastificante, para que fosse possível obter uma argamassa com o mínimo de trabalhabilidade necessária para a moldagem dos corpos de prova, conforme recomendado pela norma.

A Tabela 20 apresenta as combinações entre os agregados e aglomerantes para a realização do ensaio.

Tabela 20 - Combinação dos agregados e aglomerantes para o ensaio de RAA

Agregados	Cimento Padrão (ABCP)	Cimento Portland Branco
Areia do IPT	x	x
Areia do IPT+30% PRA	x	x
Calcário + 0% PRA	x	x
Calcário + 45% PRA	x	x
Ágata + 0% PRA	x	x
Ágata + 15% PRA	x	x
Ágata + 30% PRA	x	x
Ágata + 45% PRA	x	x

Para a produção das argamassas e confecção das barras, a norma recomenda que seja realizada a separação granulométrica dos agregados. Na Figura 32 é possível observar a areia do IPT separada em frações granulométricas.



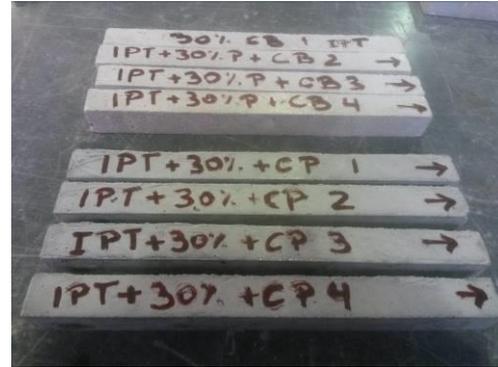
Figura 32 – Areia do IPT separada por granulometria

Entretanto, para analisar a real influência dos agregados miúdos, (calcário, ágata e pó de rolagem de ágata), os mesmos foram utilizados na mesma granulometria empregada para a realização dos demais ensaios deste trabalho, desta maneira o ensaio realizado foi baseado no proposto pela NBR 15577- 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Logo, foram moldadas 3 barras de argamassas para cada mistura, com dimensões de 2,5x2,5x28,5cm, conforme Tabela 20. Após a desmoldagem das barras, foi realizada a primeira leitura, considerada como leitura orientativa, em seguida estas foram acondicionadas em um banho termorregulador com água por 24 horas. Após este período, foram acomodadas em outro banho, contendo uma solução alcalina de hidróxido de sódio à 80°C, onde permaneceram por 30 dias, conforme Figura 33. Durante este período foram feitas três leituras obrigatórias (a leitura logo após a permanência em água por 24 horas, aos 16 e aos 30 dias) e 6 leituras intermediárias das barras de argamassa, conforme recomendado pela NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).



(a)



(b)



(c)

Figura 33 – Execução do ensaio de potencial de reatividade dos agregados: (a) moldagem dos cp's; (b) desmoldagem dos cp's; (c) medição com extensômetro;

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e no estado endurecido das argamassas produzidas com os diferentes agregados miúdos, como descrito no capítulo anterior.

Para o tratamento dos dados obtidos nos ensaios utilizou-se o método de Análise de Variância (ANOVA), através de fatoriais cruzados, a partir do software Statistica 7.0, verificando quais fatores se apresentavam como efeitos significativos ou não sobre os resultados, sendo que o intervalo de confiança adotado foi de 95%.

Na maioria dos ensaios foram calculadas as médias e desvios padrão para cada uma das 24 misturas, sendo que para a análise foram desconsiderados os valores espúrios, ou seja, que se afastam da média 2 vezes o desvio padrão para mais ou para menos.

5.1 ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco das argamassas.

5.1.1 *Índice de consistência*

Na Figura 34 é possível observar que para manter a mesma consistência, 225 ± 10 mm, as argamassas produzidas com o agregado miúdo de calcário apresentam maior consumo de água do que as produzidas com agregado miúdo de ágata. Isso deve-se ao fato de que o agregado miúdo calcário apresenta o índice de absorção de água superior em 38% quando comparado ao da ágata. Para Neville (2013) a absorção do agregado também influencia no maior consumo de água da mistura visto que parte da água de amassamento será retirada da que é necessária para a lubrificação dos grãos. Ling et al. (2011) também observaram este comportamento em misturas com substituição de um agregado com um índice de absorção de água maior que o resíduo empregado em sua substituição. Os autores estudaram a substituição

de um agregado natural quartzoso por um agregado reciclado de vidro, em argamassa auto adensável com cimento Portland branco.

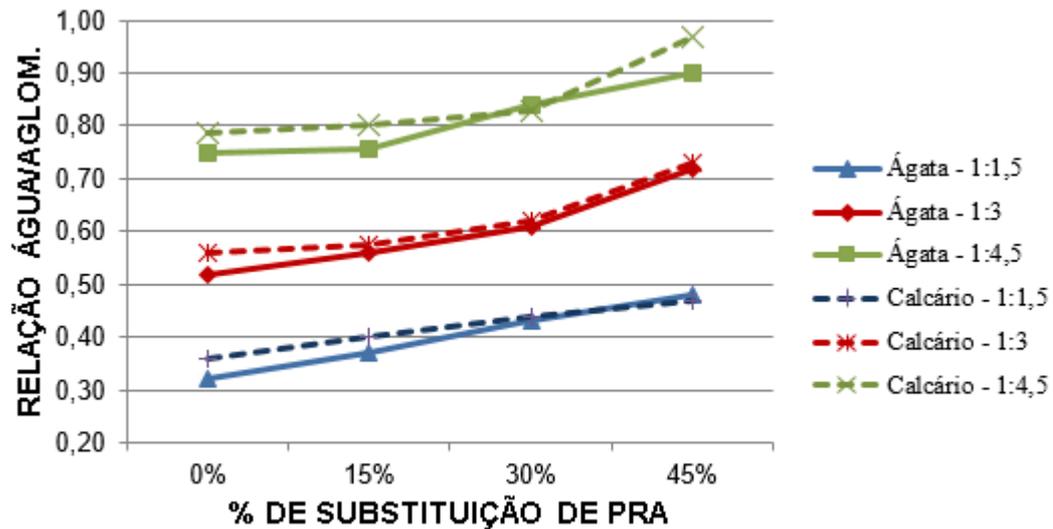


Figura 34 – Influência do tipo de agregado miúdo e do teor de substituição de pó de rolagem de ágata na relação água/aglomerante para uma mesma consistência de 225 ± 10 mm

Outro fator que pode ter contribuído para a diminuição da relação água/aglomerante dos traços produzidos com agregado miúdo de ágata é sua superfície lisa e plana, fato também evidenciado no estudo de Ling e Poon (2011).

Quanto à influência o teor de substituição do pó de rolagem de ágata para os dois agregados miúdos, tanto para o de calcário quanto para o de ágata, verificou-se uma maior demanda de consumo de água com o aumento do % de substituição. Fato atribuído ao aumento da quantidade de material fino presente nas misturas com substituição por pó de rolagem de ágata. Conforme Neville (2013) grãos mais finos necessitam de uma maior quantidade de água para a molhagem de suas grandes superfícies específicas.

Observa-se também, que até o teor de 30% de PRA, para os dois agregados, existe uma diferença significativa na relação água/aglomerante e que partir deste teor de substituição, o que predomina na influência da demanda de água. é a quantidade de pó de rolagem, uma vez que em quase todos os traços com o teor de 45% de substituição a relação água/aglomerante é praticamente a mesma para os dois agregados.

5.1.2 Reometria Rotacional

Os resultados obtidos na reometria rotacional podem ser verificados através de gráficos de Viscosidade vs. Taxa de cisalhamento e Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento.

Observando a Figura 35 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, verifica-se que para as argamassas com proporcionalimento de 1:1,5, ocorreu uma inversão de comportamento para a substituição de 15% de PRA.

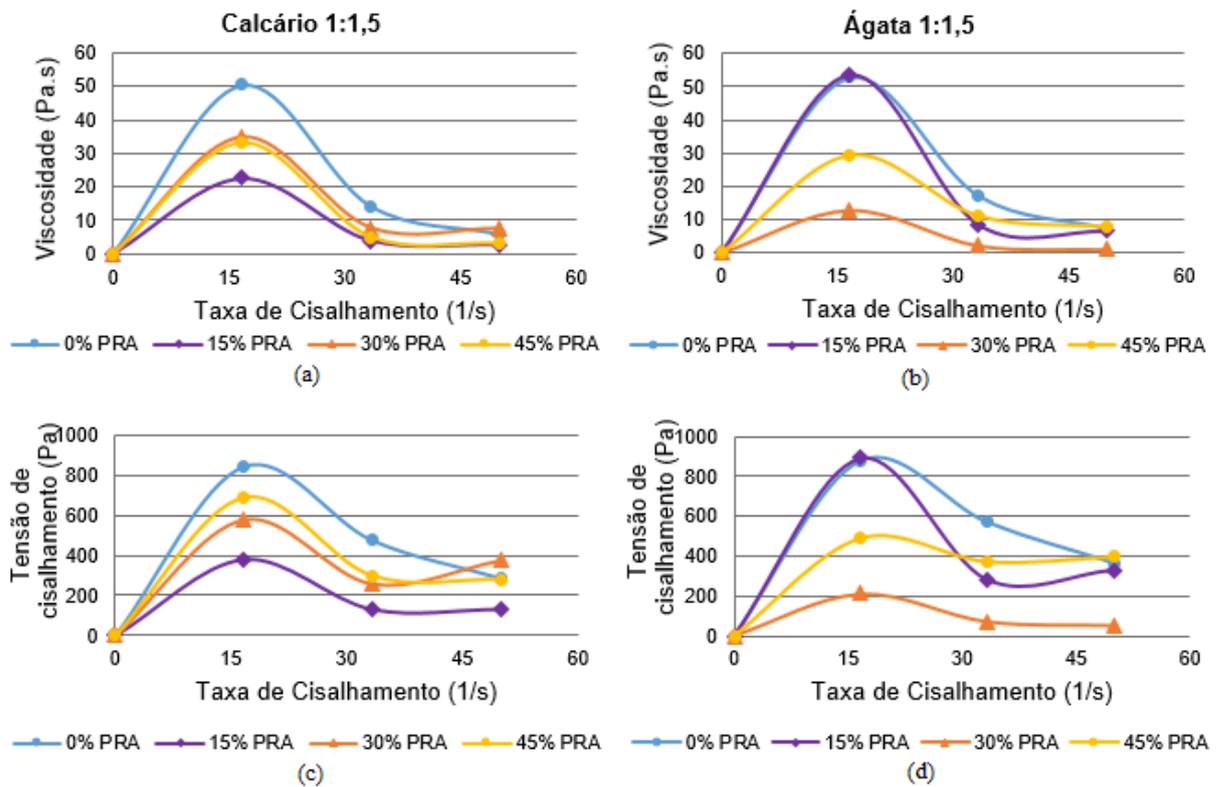


Figura 35 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:1,5: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.

No caso da argamassa com AMC houve uma redução da viscosidade com o aumento da substituição de PRA. No caso das argamassa com AMA observou-se que a menor substituição (15%) não teve efeito positivo sobre a viscosidade, ou seja, não diminui o valor da viscosidade, ficando esta praticamente igual à obtida para 0% PRA. Este fato deve estar relacionado à lamelaridade dos grãos de AMA, sendo que ,como foi observado no ensaio de *squeeze flow*, a substituição de 15% PRA não deve ter sido suficiente para lubrificar o conjunto de agregados. Ao se substituir uma maior porcentagem por PRA observa-se uma redução da viscosidade, bem como observa-se um aumento de deslocamento no ensaio de *squeeze flow*. O ensaio de reometria rotacional mostrou que para a substituição de 45% PRA, houve um aumento da viscosidade em relação a 30% PRA, como já discutido anteriormente. Observando-se o gráfico da velocidade de 0,1mm/s para esta argamassa é possível verificar que o teor de 45% de PRA ultrapassou o teor crítico de finos presentes nessa mistura.

Não foi possível realizar uma correlação entre o ensaio de *squeeze flow* e reometria rotacional na argamassa de AMC, já que para este último a substituição de 15% PRA reduziu considerável a viscosidade desta argamassa. Logo, percebeu-se que ao passo que se aumentou o teor de substituição houve um aumento de viscosidade, comportamento oposto ao apresentado no ensaio de *squeeze flow*.

Deve-se considerar que estes dois ensaios, apesar de terem como objetivo medir as propriedades reológicas das argamassas, submetem-nas a diferentes formas de tensão de carregamento. Isto é, enquanto que o *squeeze flow* submete a argamassa a um esforço de compressão e escoamento horizontal, a reometria rotacional submete a argamassa a um esforço de cisalhamento através da aplicação de um torque. Como as argamassas são suspensões heterogêneas estas podem apresentar comportamentos diferentes, dependendo do tipo de solicitação a que são submetidas.

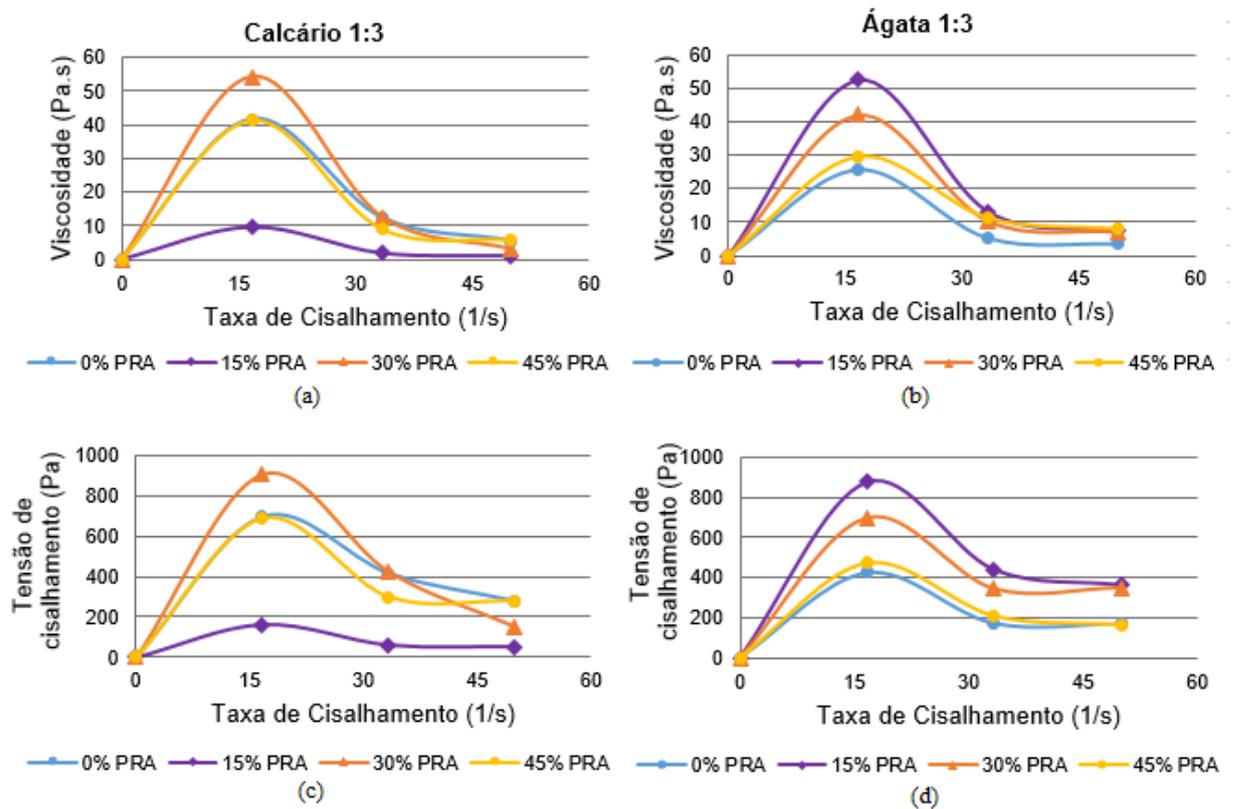


Figura 36 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:3: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.

Na Figura 36, foi possível verificar o comportamento das argamassas no traço 1:3, onde observou-se que esta possui a mesma conduta verificada na argamassa de proporcionamento de 1:1,5, em que ocorreu uma inversão de comportamento quando realizada a substituição de 15% PRA, resultados coerentes com os observados no ensaio de *squeeze flow*.

Para a argamassa com AMC a substituição de teores mais elevados de PRA (30% e 45%) gerou um aumento significativo da viscosidade e conseqüentemente da tensão de cisalhamento. Enquanto que nas argamassas com AMA, observou-se que o menor teor de substituição de PRA gerou um aumento expressivo, quando comparado à argamassa com 0% PRA, o qual foi reduzindo gradativamente com o teor de substituição (30% e 45% PRA). Ainda no caso da argamassa com AMA deve-se alertar que observou-se uma segregação dos agregados com o acúmulo de água no entorno da palheta do ensaio de reometria rotacional, fato que pode ter mascarado os resultados obtidos para a argamassa com 0% PRA. Se considerarmos esse fator, pode-se dizer que o comportamento da argamassa nos ensaios de reometria e *squeeze flow* foram bastante coerentes, sendo que o teor de 15% PRA proporcionou argamassas com uma maior viscosidade e um menor deslocamento. Já para os teores de 30% e 45% de PRA houve uma menor viscosidade e um maior deslocamento.

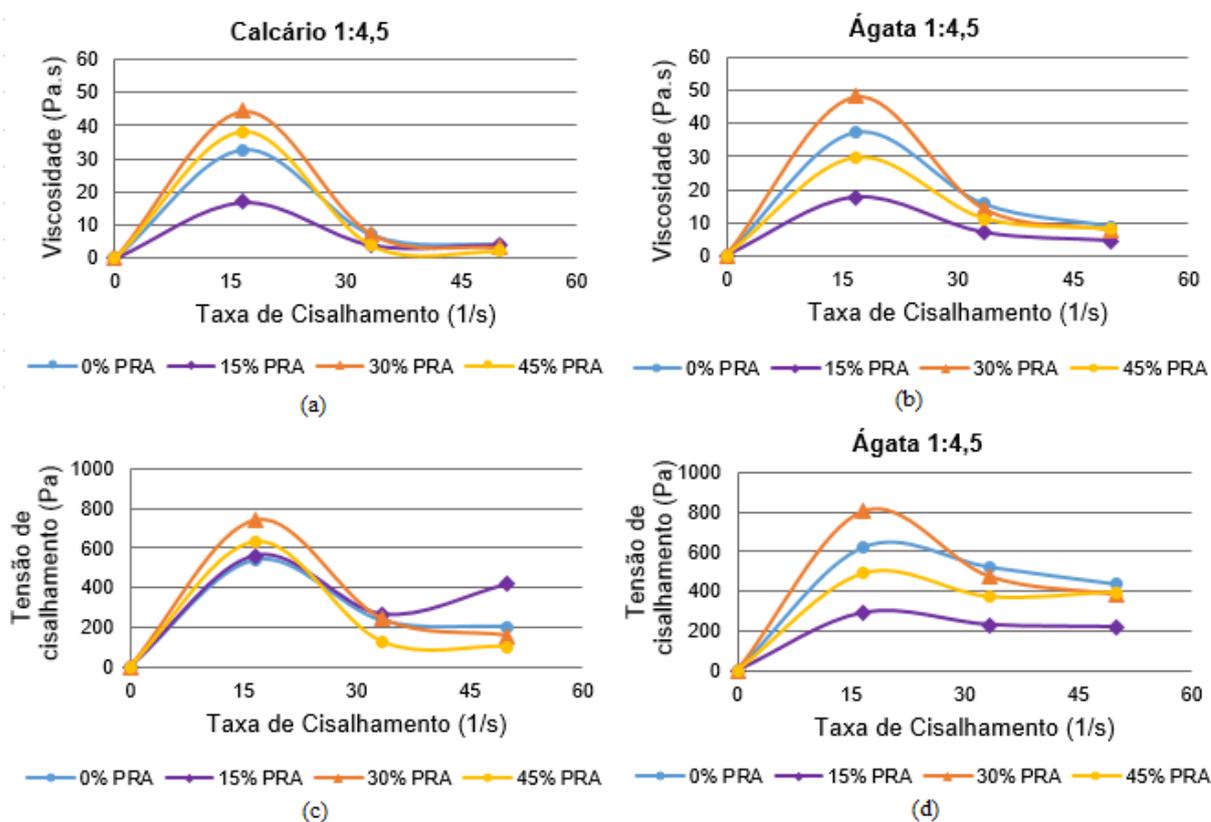


Figura 37 – Influência dos agregados miúdos no traço 1:4,5: (a) AMA com a velocidade de 3mm/s; (b) AMC com velocidade de 3 mm/s; (c) AMA com velocidade de 0,1 mm/s; (d) AMC com velocidade de 0,1 mm/s.

Analisando a Figura 37, que apresenta os resultados do proporcionamento 1:4,5, a argamassa com AMC continuou apresentando comportamento semelhante aos observados para os demais proporcionamentos. No entanto, verificou-se que ocorreu uma redução da viscosidade

do 0% PRA, com o aumento do teor de agregado nos proporcionamentos. A argamassa com 15% PRA continuou sendo a de menor viscosidade neste traço, sendo que o aumento da substituição aumentou também a viscosidade da argamassa. Desta maneira percebeu-se que o aumento de finos nas misturas acabou gerando atrito interno entre os agregados o que travou a mistura.

Já para a argamassa com AMA, no traço 1:4,5, diferente do observado para os demais traços, foi verificada uma significativa redução de viscosidade para o teor de 15% PRA. O comportamento desta argamassa para o ensaio de reometria rotacional e *squeeze flow* foi bastante diferente. Acredita-se que a maior quantidade de grãos de AMA, presentes nessa argamassa, deve estar gerando esta variabilidade, já que estes grãos, lamelares, dependendo da posição que eles se encontrarem na mistura, podem influenciar na forma de como a mistura estaria escoando.

É importante ressaltar que durante a execução do ensaio de reometria rotacional, observou-se que a argamassa com agregado miúdo de ágata, com 0% PRA, apresentou segregação entre a pasta e os agregados (Figura 38), este fator pode ter influenciado o resultado da viscosidade desta argamassa.

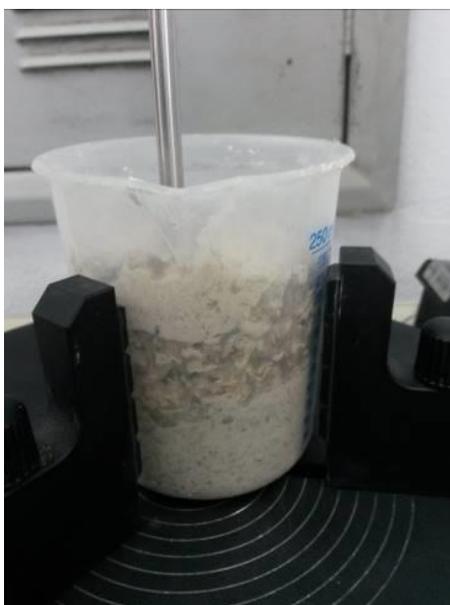


Figura 38 – Segregação da argamassa observada no ensaio de reologia em argamassa com agregado miúdo de ágata, traço 1:4,5, sem substituição por pó de rolagem de ágata

Outro fator que pode estar influenciando na realização do ensaio é o curto tempo de pega do cimento Portland Branco.

5.1.3 Squeeze flow

A Figura 39 apresenta os gráficos força vs. deslocamento, onde foi demonstrada a influência do pó de rolagem de ágata no comportamento das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário e ágata, respectivamente, para o traço 1:1,5.

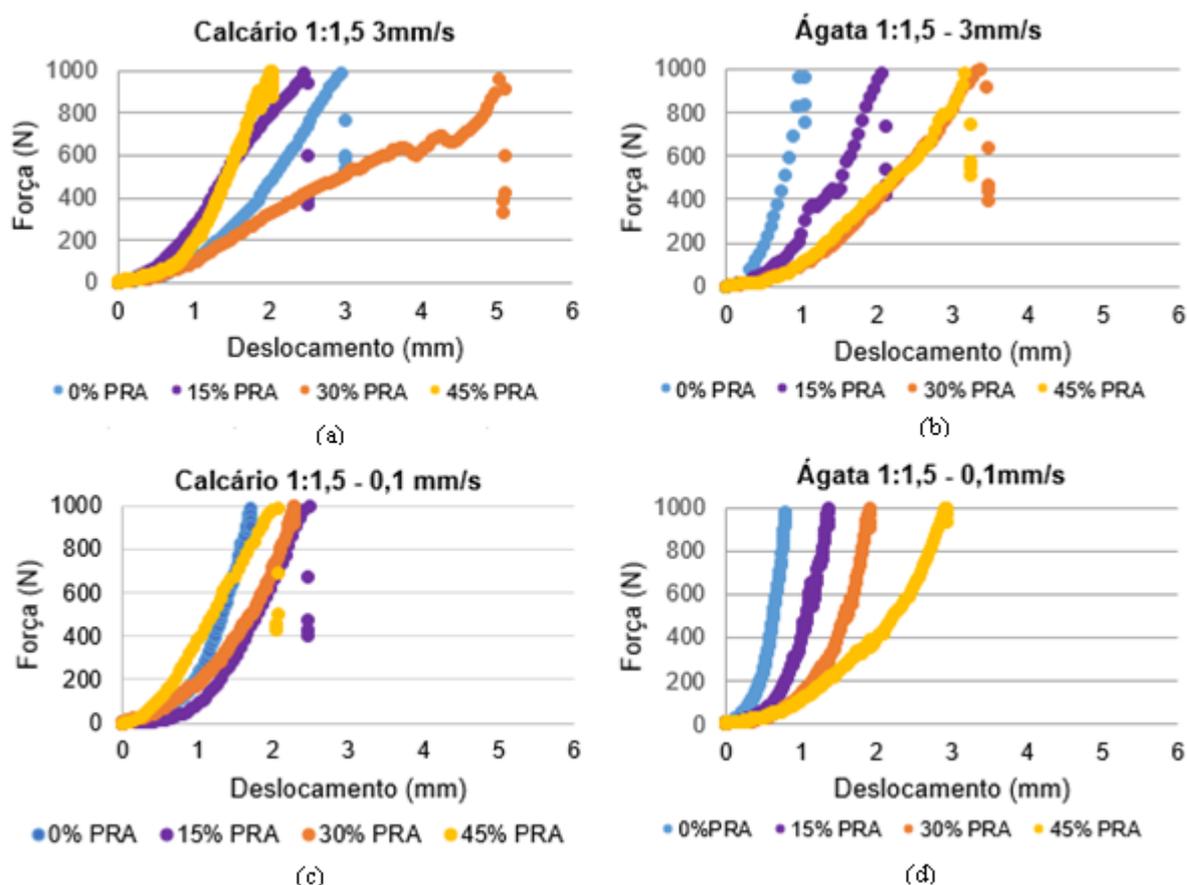


Figura 39 – Influência do tipo de AM com diferentes teores de substituição por PRA no traço 1:1,5: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 0,1 mm/s; (d) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 0,1 mm/s

Analisando a Figura 39, observa-se que todas as argamassas apresentaram resistência ao escoamento com curto estágio de deformação elástica e plástica, seguida do estágio de enrijecimento por deformação dos grãos de forma que o ensaio foi finalizado quando se atingiu o valor máximo de força de 1kN. Considerando que o escoamento máximo permitido pelo ensaio é de 9mm e o máximo obtido foi de 5mm, pode-se dizer que as argamassas analisadas apresentaram resistência ao escoamento.

Com relação à velocidade de realização do ensaio, observa-se que para a menor velocidade (0,1mm/s) houve uma maior resistência ao escoamento. Este fato já foi citado por outros pesquisadores, uma vez que submetidas a menores velocidades de escoamento as suspensões possuem maior tempo para um reposicionamento dos grãos, gerando um maior travamento da mistura.

Segundo Cardoso (2009), quando as argamassas são submetidas a maiores velocidades de deslocamento, há uma menor suscetibilidade destas apresentarem uma segregação da pasta, de forma que seu escoamento é facilitado, como exemplificado na Figura 40.

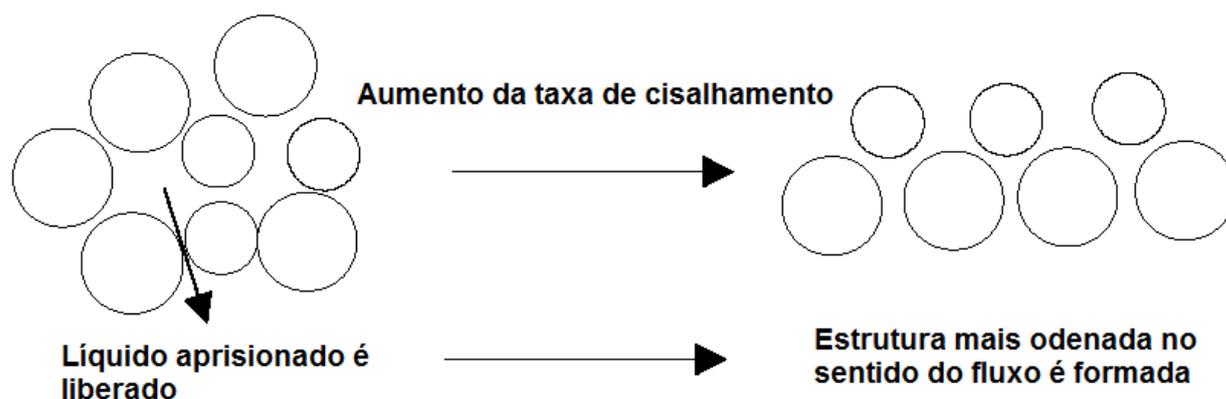


Figura 40 - Comportamento de suspensões submetidas a baixas taxas de cisalhamento [Fonte: Adaptação de OLHERO, FERREIRA, 2004]

Entretanto, é preciso levar em consideração que o cimento Portland branco, apresenta tempo de pega reduzido, e velocidade de aplicação das cargas ocorre em tempos diferentes, a velocidade mais alta (3mm/s) é realizada aos 10 minutos e a velocidade mais baixa (0,1mm/s) é realizada aos 15 minutos. Então, desta maneira é possível que o tempo de pega do CPB também esteja influenciando nesta diferença de escoamento das argamassas, quando comparada as velocidades de aplicação de carga.

As argamassas produzidas com o agregado miúdo de calcário, quando sob uma velocidade de carga de 3mm/s, apresentam um acréscimo significativo do escoamento para a substituição de 30% PRA, em relação às demais, bem como uma redução de escoamento para os teores de 15% e 45% PRA. Pode-se considerar como teor ótimo de substituição, com vistas melhora da trabalhabilidade, o valor de 30%. O teor de 15% de substituição de PRA parece não ter sido o suficiente para lubrificar a interface das partículas de calcário, sendo possível que esses finos apenas tenham preenchido os vazios existentes entre as partículas do agregado miúdo. Ao acrescentar maior quantidade de PRA (30%) parece ter ocorrido uma melhora da trabalhabilidade da argamassa a partir da uma lubrificação dos grãos de calcário através destes

finos. No entanto, a substituição de 45% PRA parece ter excedido o teor ótimo para esta argamassa de forma que foi observada a redução de seu escoamento, fenômeno provavelmente decorrente do travamento das partículas (empacotamento) ou do excesso de finos na mistura.

Para a menor velocidade de aplicação da carga observa-se que o rearranjo das partículas reduziu o escoamento, no entanto para os teores de 0% e 30% PRA observa-se ainda uma redução na trabalhabilidade da argamassa.

Para as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata, observou-se que para a velocidade de 3mm/s, o aumento da porcentagem de substituição gerou um aumento no escoamento, no entanto, não se observou diferença entre a substituição de 30 e 45% de PRA, diferentemente do observado para a argamassa com o agregado miúdo de calcário. A argamassa com o agregado miúdo de ágata parece receber de melhor forma a presença dos finos. Esta substituição pode funcionar como um lubrificante entre os grãos do agregado miúdo de ágata. Logo a substituição do agregado miúdo de ágata (de formato lamelar) pelo pó de rolagem de ágata (de formato hexagonal) auxiliou na melhora do escoamento da mistura, reduzindo a influência negativa do formato lamelar do grão do agregado miúdo de ágata.

A velocidade de aplicação de carga, no caso da argamassa de ágata, parece não ter exercido tanta influência nos resultados, mas mostrou claramente, bem como na maior velocidade, o incremento do escoamento com o aumento da substituição.

Por fim, observa-se que a forma do agregado exerce influência no comportamento reológico das argamassas, conforme já observado por outros pesquisadores, Arnold (2010) e Heineck (2012). A adição de finos em argamassas de grãos lamelares possui uma maior influência na melhora da trabalhabilidade do que a adição destes mesmos finos em uma argamassa com agregados mais cúbicos (que favorecem o rolamento), para este determinado proporcionamento.

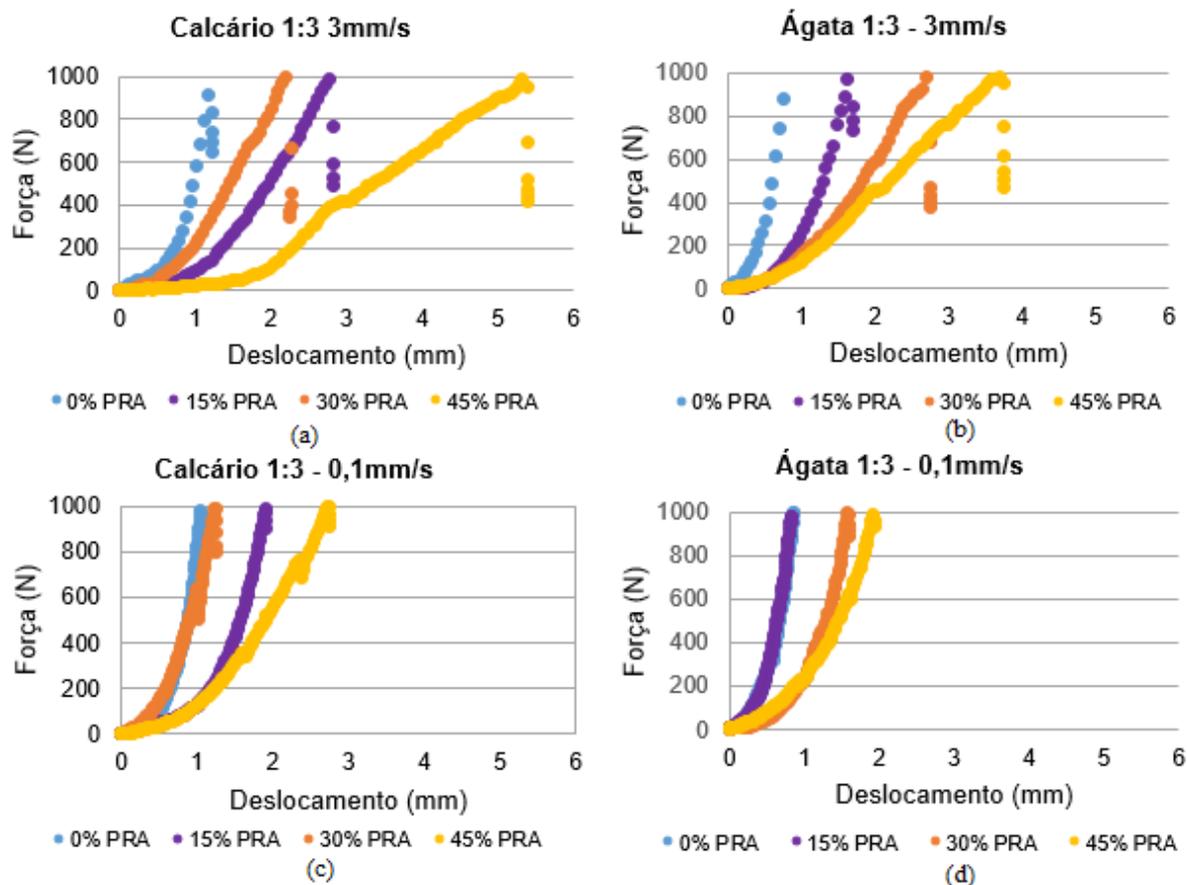


Figura 41 – Influência do tipo de agregado miúdo com diferentes teores de substituição por PRA no traço 1:3: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com velocidade de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 0,1 mm/s; (d) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA ensaiadas com vel. de carga de 0,1 mm/s.

A Figura 41 demonstra o comportamento das argamassas com proporcionamento de 1:3, que possui menor quantidade de cimento, em relação ao traço 1:1,5. Observou-se que as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário tiveram melhora na sua trabalhabilidade, com o aumento do teor de substituição de PRA, já que estas argamassas apresentaram maior escoamento. Acredita-se que os finos do PRA, possam estar substituindo os finos do cimento, melhorando o empacotamento, sem ultrapassar o valor crítico. A aplicação da carga com menor velocidade, no caso das argamassas com AMC, reduziu o estágio plástico dessas argamassas, devido ao rearranjo dos grãos, conforme já discutido anteriormente.

As argamassas com AMA apresentaram comportamento muito similares no proporcionamento 1:3, com relação ao 1:1,5, para a velocidade de 3 mm/s. No entanto, para a velocidade de 0,1 mm/s, o traço com maior quantidade de agregados apresentou enrijecimento

por deformação dos grãos mais precoce, indicando que o aumento da quantidade destes agregados influenciou de forma negativa o escoamento das argamassas.

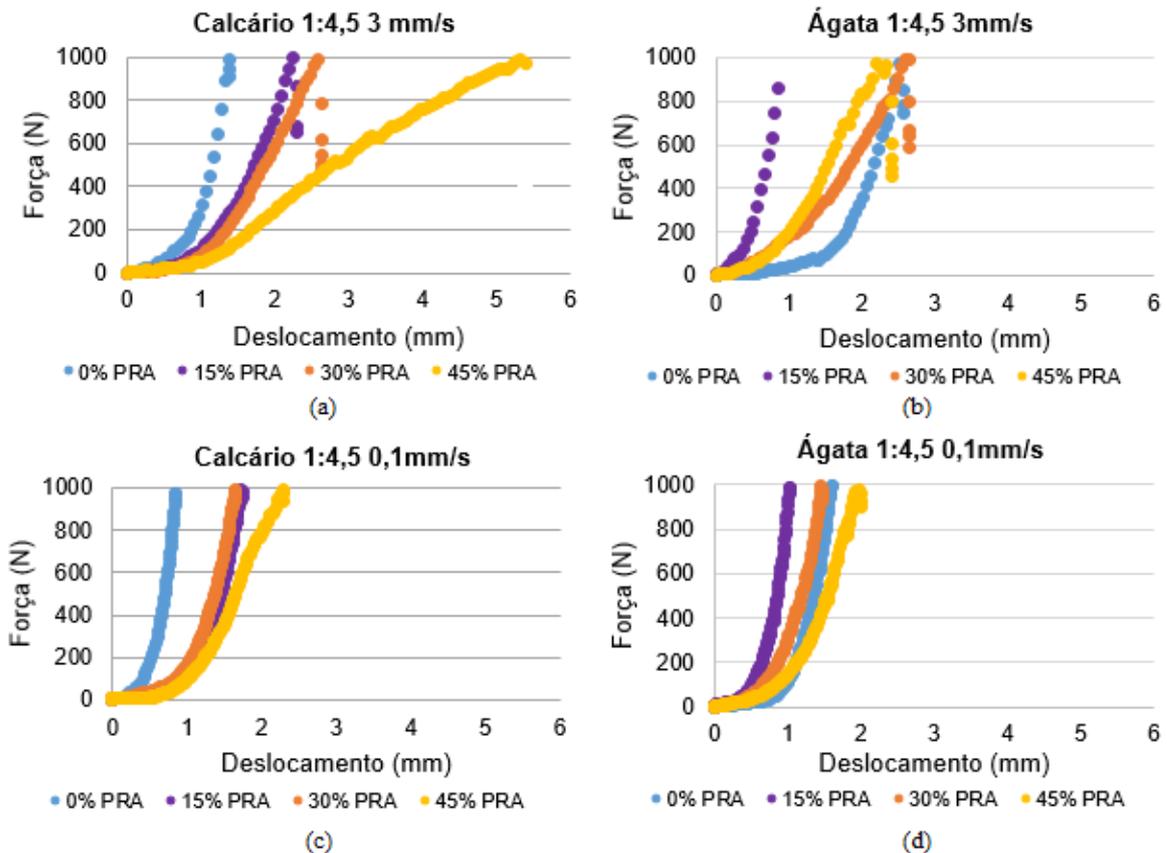


Figura 42 – Influência do tipo de AM com diferentes teores de subst. por PRA no traço 1:4,5: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 3mm/s; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 3mm/s; (c) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA com vel. de carga de 0,1 mm/s; (d) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA es com vel. de carga de 0,1

Por fim, observando a Figura 42, que demonstra o comportamento do traço 1:4,5, o mais pobre, nota-se que este seguiu a mesma linha de comportamento para as argamassas com AMC. Certamente, a forma dos grãos favoreceu o comportamento destas argamassas, de forma que esta não sofreu influência tão significativa do traço. As argamassas com AMA, ao contrário, sofreram uma influência negativa neste proporcionamento, visto ser esse o que apresenta a maior quantidade de agregado miúdo, comparado à quantidade de cimento. Este fato pode estar relacionado ao formato do grão do AMA, que apresenta uma forma lamelar (desfavorável ao escoamento), que quando é predominante na mistura, necessita de grandes quantidades de pasta para favorecer o seu escoamento. Deste modo, para essa mistura, as substituições por PRA analisadas não foram suficientes para envolver os agregados e

promover uma lubrificação, resultando em um maior travamento das misturas. Uma vez que ocorreu uma inversão nos resultados destas combinações.

O estudo de Apolinário (2014), ao avaliar a adição de resíduo de corte de mármore e granito em argamassas com cimento Portland, observou um comportamento similar ao determinado neste trabalho. O autor verificou que a adição de fíler s nas misturas promoveu um maior deslizamento das partículas dos materiais, quando comparado a materiais com menos finos, até um limite ótimo de adição de finos, sendo que, após este limite, as adições acabaram travando a mistura.

Arnold (2011) observou que agregados britados que apresentam uma forma lamelar necessitam de maior carga para o deslocamento. Comportamento também observado neste trabalho, pois as misturas com o agregado miúdo de ágata (formato mais lamelar) demandaram uma carga maior, enquanto que as argamassas com o agregado miúdo de calcário (formato mais cúbico) demandaram uma carga menor para que o mesmo deslizamento seja obtido. Entretanto, esta mesma autora notou que conforme o teor de fíler era aumentado, a carga necessária para que ocorresse o deslocamento era maior, sendo este comportamento oposto ao observado neste trabalho.

Outro fator que influencia na reologia das argamassas e no empacotamento é o formato do grão. Segundo o estudo de Heineck (2012), grãos mais arredondados e esféricos apresentam uma tendência de movimentar-se com mais facilidade quando comparados aos grãos lamelares, quando incorporados em matrizes cimentícias. Ainda segundo esta mesma autora, os agregados que possuem forma mais lamelar apresentaram uma maior viscosidade e, por consequência, uma menor trabalhabilidade, fator atribuído aos grãos que apresentam maior angulosidade, pioram o empacotamento.

De um modo geral, para os três traços e suas respectivas substituições, percebeu-se que existe uma diferença no escoamento das argamassas relacionados com a velocidade com que a carga é aplicada, entretanto esta correlação também pode estar atrelada ao tempo de pega reduzido apresentado pelo cimento Portland branco utilizado. Uma vez que a velocidade de aplicação das cargas ocorre em tempos diferentes, a velocidade mais alta (3mm/s) é realizada aos 10 minutos e a velocidade mais baixa (0,1mm/s) é realizada aos 15 minutos.

Notou-se que embora em alguns pontos haja uma coerência entre os ensaios de reometria rotacional e *squeeze flow*, não é possível realizar uma correlação direta entre eles. Este fato também foi observado por Stolz (2015).

5.2 ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido das argamassas.

5.2.1 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova em argamassa são apresentados na Tabela 21. As médias foram adquiridas através da ruptura de 5 cp's na idade de 28 dias. No apêndice 01, encontram-se todos os valores obtidos neste ensaio.

Tabela 21 – Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas confeccionadas com diferentes traços e teores de substituição dos agregados por PRA

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário				Agregado miúdo de ágata			
		a/agl.	Resistência Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	a/agl.	Resistência Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
1:1,5	0	0,36	57,66	4,69	8,13	0,32	64,35	2,52	3,92
1:3		0,56	45,57	1,57	3,45	0,52	43,20	2,67	6,18
1:4,5		0,79	25,14	1,95	7,74	0,75	19,36	1,90	9,82
1:1,5	15	0,40	56,57	4,39	7,76	0,37	57,12	3,27	5,72
1:3		0,58	43,01	1,60	3,72	0,56	46,64	1,25	2,68
1:4,5		0,80	26,98	1,18	4,36	0,76	30,65	1,06	3,46
1:1,5	30	0,44	51,78	4,98	9,62	0,43	49,03	4,99	10,18
1:3		0,62	41,88	3,37	8,06	0,61	40,58	2,67	6,58
1:4,5		0,83	34,25	1,21	3,54	0,84	30,52	0,66	2,15
1:1,5	45	0,47	57,46	2,77	4,82	0,48	48,34	6,27	12,96
1:3		0,73	39,09	2,86	7,33	0,72	35,80	1,25	3,49
1:4,5		0,97	31,538	1,179	3,738	0,90	29,29	1,94	6,61

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, tipo de agregado miúdo (calcário e ágata) e percentual de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 28 dias

<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>SQF</i>	<i>Teste F</i>	<i>p</i>	<i>Sig.</i>
Intercept	204370,2	1	204370,2	21606,51	0,000000	-
Agregado	52,1	1	52,1	5,51	0,021042	Sim
Traço	13954,9	2	6977,5	737,67	0,000000	Sim
% Substituição	175,9	3	58,6	6,20	0,000694	Sim
Agregado*Traço	7,3	2	3,7	0,39	0,679554	Não
Agregado* % Subst.	223,4	3	74,5	7,87	0,000098	Sim
Traço* % Substituição	1372,0	6	228,7	24,17	0,000000	Sim
Agregado*Traço*% Subst.	291,4	6	48,6	5,13	0,000135	Sim
Error	879,7	93	9,5	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Observou-se que todas as variáveis estudadas são consideradas significativas, com exceção da interação entre o tipo de agregado e o traço.

A seguir são analisados os efeitos significativos das variáveis controláveis, bem como de suas interações, os quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

5.2.1.1 Efeito do tipo de agregado na resistência à compressão das argamassas

Analisando o efeito isolado do tipo de agregado miúdo é possível perceber que as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário apresentam resistência à compressão maior que as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, conforme Figura 43.

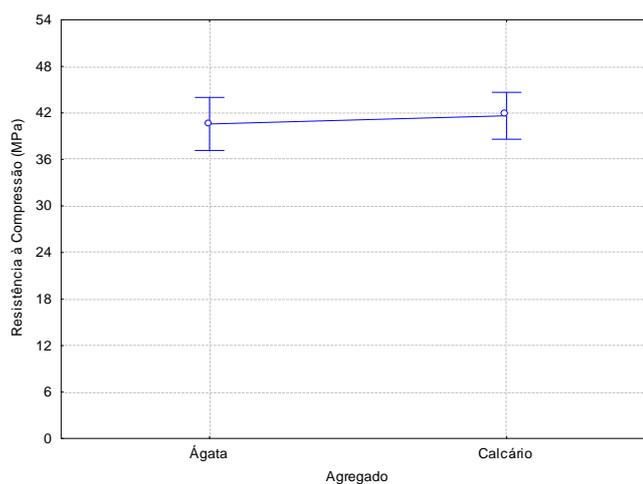


Figura 43 – Agregado miúdo de ágata - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão

Embora na análise estatística o tipo de agregado miúdo tenha sido considerado significativo, observando a Figura 43, nota-se que os dois apresentam praticamente a mesma resistência.

Este fato vai ao encontro ao observado por Gonçalves et al. (2007), onde foi realizada uma comparação entre agregados miúdos naturais e britados, tendo os autores concluído que o fator que influencia a resistência à compressão não é a forma do agregado miúdo e sim a densidade de empacotamento destes agregados.

Entretanto, é preciso levar em consideração, que a relação água/aglomerante não foi mantida constante, este fator pode estar causando alguma influência no efeito do tipo do agregado, uma vez que realizando uma *One Way* apenas dos agregados, estes valores não foram significativos.

5.2.1.2 Efeito da interação de terceira ordem sobre a resistência à compressão das argamassas

A Figura 44 mostra a influência para cada tipo de agregado, do traço e teor de substituição na resistência à compressão aos 28 dias de idade.

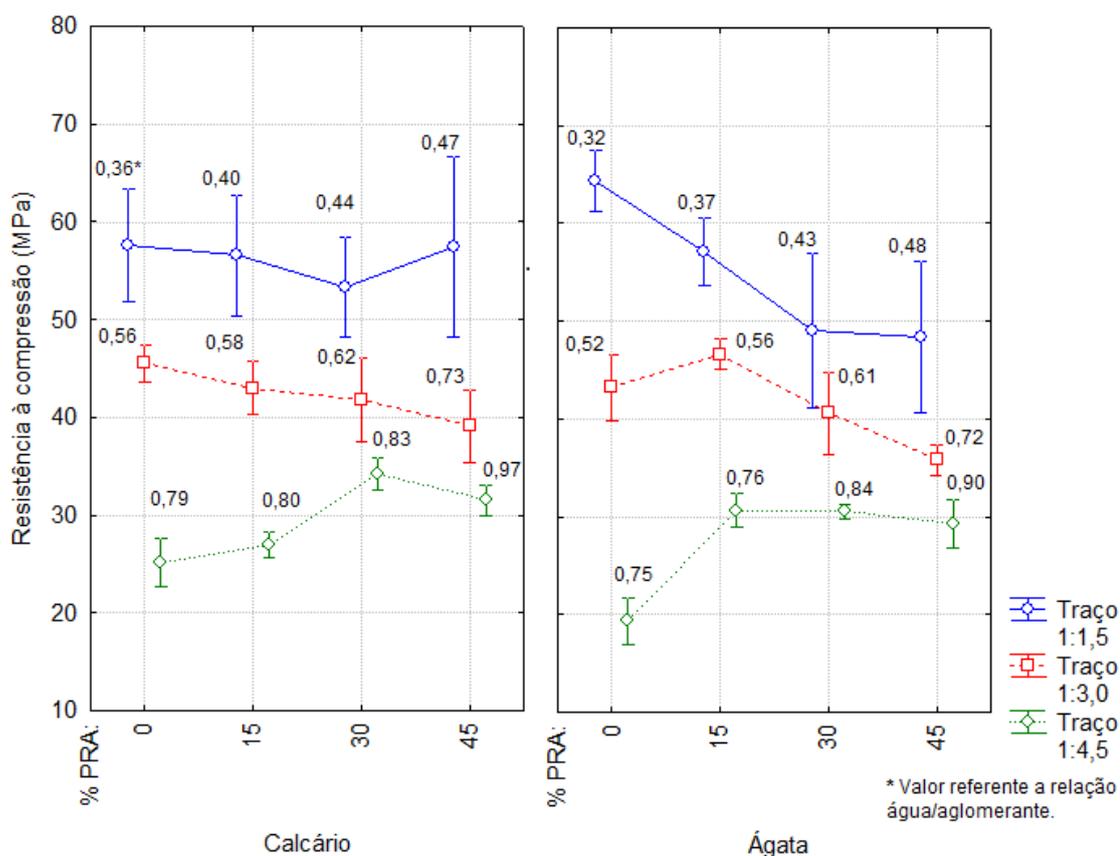


Figura 44 – Influência do tipo de agregado, traço e teor de substituição em função da resistência à compressão aos 28 dias

Para o traço 1:4,5 (pobre), a substituição dos agregados por pó de rolagem de ágata se mostrou benéfica para todos os teores, provavelmente associado a um efeito de

empacotamento, uma vez que para todos os teores de substituição ocorreu um aumento do consumo de água, comparando com 0% substituição. Para o AMC a relação a/aglom aumentou 22,78% e para o AMA o incremento foi de 20% . Logo, o pó de rolagem de ágata proporcionou um efeito fíler , colmatando os poros, densificando o esqueleto granular, e aumentando a resistência à compressão destas argamassas. Segundo Dal Molin (2011), os fílers proporcionam um efeito físico de empacotamento granular e agem como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos do cimento.

Realizando o teste Fisher, para as misturas com agregado miúdo de calcário, para o traço rico, não houve diferença significativa entre os teores de substituição de 0% e 15% PRA. No traço intermediário, os teores de 0%, 15% e 30% de PRA não apresentaram diferença significativa entre si. E para o traço pobre, os teores de 0% e de 15% PRA não foram significativamente diferentes entre si, o mesmo vale para os teores de 30% e 45% PRA, não havendo diferença significativa.

Para as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata, analisando estatisticamente através de Fischer, no traço 1:4,5 (pobre), não houve diferença significativa entre os teores de 15%, 30% e 45% PRA. Para as misturas com relação 1:1,5 (rica) não apresentaram diferenças significativas, entre a substituição nos teores de 30% e 45% de PRA. E para o traço intermediário (1:3), no mesmo agregado miúdo, não houve diferença significativa para os teores de substituição de 0%, 15% e 30% PRA, desta maneira a substituição (15% e 30%) não causou diferença na resistência, se comparada às argamassas com o teor de 0%.

5.2.1.3 Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão das argamassas

Como a relação água/aglomerante não foi mantida constante, pode-se perceber, na Figura 45 e na Figura 46, que esta sofreu variação, influenciada pelo tipo de agregado e pela quantidade do teor de substituição dos agregados miúdo por pó de rolagem de ágata. Os dados constantes nas referidas figuras são resultantes dos valores médios obtidos para cada combinação. Para cada curva de dosagem foi calculado a respectiva equação exponencial, a qual foi utilizada para o cálculo dos valores estimados, que serão apresentados na sequencia deste trabalho.

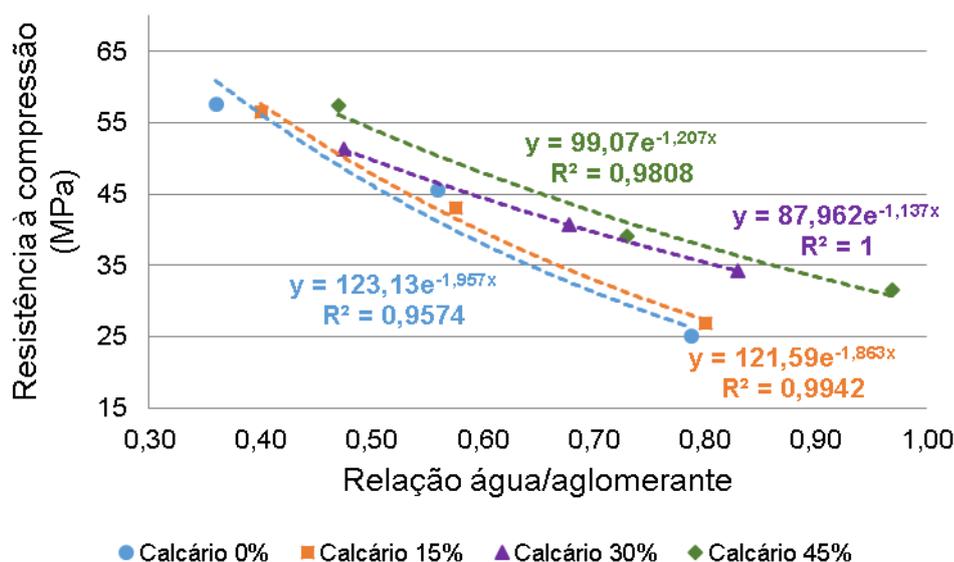


Figura 45 – Agregado miúdo de calcário - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias

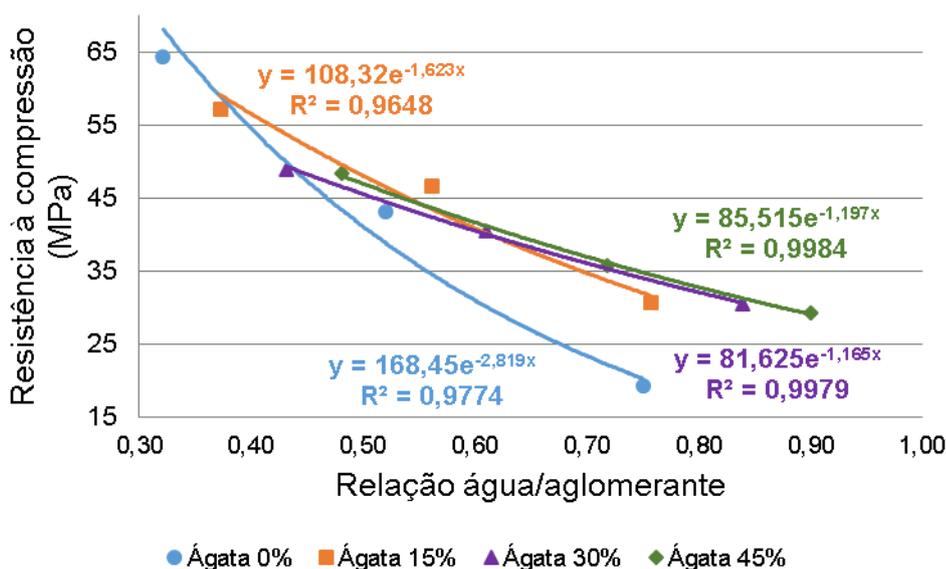


Figura 46 – Agregado miúdo de ágata - Influência da relação água/aglomerante na resistência à compressão aos 28 dias

Analisando a Figura 47, ao comparar a resistência à compressão, fixando a relação água/aglomerante, percebeu-se que para o agregado miúdo de ágata, o teor de 15% de pó de rolagem de ágata reflete melhores valores, chegando a 48,57% de aumento de resistência para uma mesma relação (0,70). Já para as misturas com agregado miúdo de calcário, o incremento foi também significativo, destaque para as misturas com relação a/aglom. de 0,70 e teor de substituição de 45% de PRA, se comparado à argamassa referência (calcário miúdo com 0% PRA), onde ocorreu um aumento de 36% na resistência à compressão. Analisando

comparativamente os dois agregados miúdos e seus respectivos teores de substituição, percebeu-se que as argamassas produzidas com calcário apresentam uma resistência à compressão maior que as produzidas com agregado miúdo de ágata.

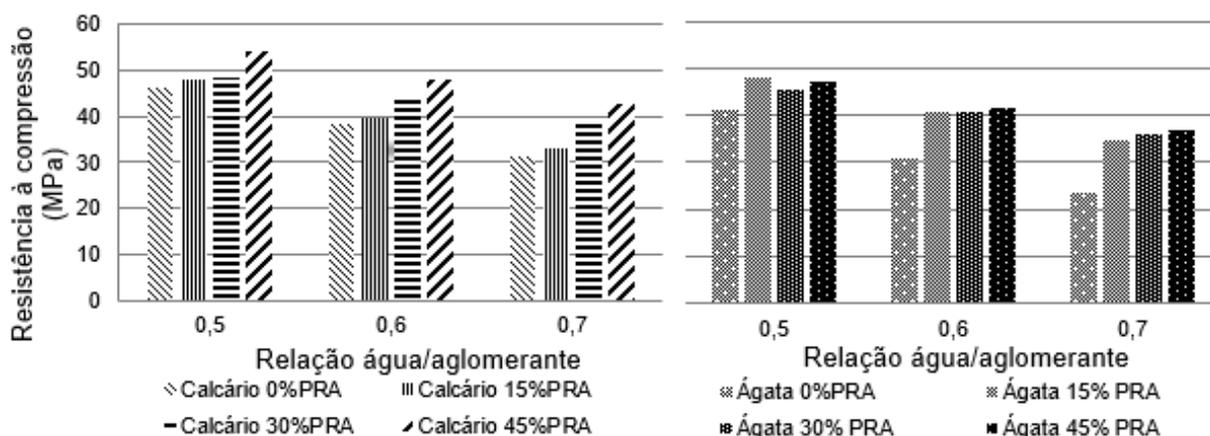


Figura 47 – Resistência à compressão aos 28 dias estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com o AMC e teores de PRA; (b) argamassas com AMA e teores de PRA.

Entretanto, nas misturas com substituição dos agregados por PRA, as argamassas com AMA apresentaram melhoras mais significativas, principalmente para o teor de 15% PRA, para todas as relações a/aglom. que foram analisadas.

Esperava-se que as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata, por demandarem menor quantidade de água, apresentassem maiores resistências, entretanto isto não se confirmou. Este fato possivelmente ocorreu devido à falta de rugosidade do agregado, o que possivelmente influenciou na aderência entre a pasta de cimento e o mesmo. Outro fator que pode ter contribuído para a redução na resistência das argamassas é a lamelalidade do agregado, uma vez que quanto mais lamelar for o agregado maior será a zona de transição.

O incremento da resistência nas argamassas com a utilização do pó de rolagem de ágata, deve-se provavelmente ao efeito físico, ocasionado por ele, o qual pode ter proporcionado um tamponamento dos poros e ter servido de complemento da granulometria. Segundo Moraes (2001) e Dal Molin (2011), o aumento da quantidade de fíler em matrizes cimentícias é capaz de ativar a hidratação do cimento atuando como pontos de nucleação, provocando a precipitação de produtos hidratados, e deste modo, acelerando o incremento de resistência, tornando a pasta de cimento mais densa e homogênea a partir do refinamento do diâmetro e melhor distribuição dos poros.

5.2.1.4 Efeito da resistência à compressão das argamassas no consumo de cimento

Tabela 23 – Consumo de cimento teórico x Resistência à compressão média

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário			Agregado miúdo de ágata		
		a/agl.	Consumo de cimento teórico (kg/m ³)	Resistência Média (MPa)	a/agl.	Consumo de cimento teórico (kg/m ³)	Resistência Média (MPa)
1:1,5	0	0,36	808,899	57,66	0,32	835,07	64,35
1:3		0,56	503,601	45,57	0,52	513,83	43,20
1:4,5		0,79	361,970	25,14	0,75	366,95	19,36
1:1,5	15	0,40	783,093	56,57	0,37	800,70	57,12
1:3		0,58	499,685	43,01	0,56	503,24	46,64
1:4,5		0,80	360,282	26,98	0,76	366,03	30,65
1:1,5	30	0,44	759,679	51,78	0,43	764,69	49,03
1:3		0,62	488,775	41,88	0,61	491,09	40,58
1:4,5		0,83	356,487	34,25	0,84	355,25	30,52
1:1,5	45	0,47	742,572	57,46	0,48	736,84	48,34
1:3		0,73	463,887	39,09	0,72	466,48	35,80
1:4,5		0,97	339,657	31,54	0,90	347,71	29,29

A partir dos dados expressos na Tabela 23 foi possível plotar gráficos e estipular as equações para cada uma das curva (Figura 48 e Figura 49), que foram utilizadas para a estimativa do cálculo do consumo de cimento teórico para três determinadas relações de água/aglomerante.

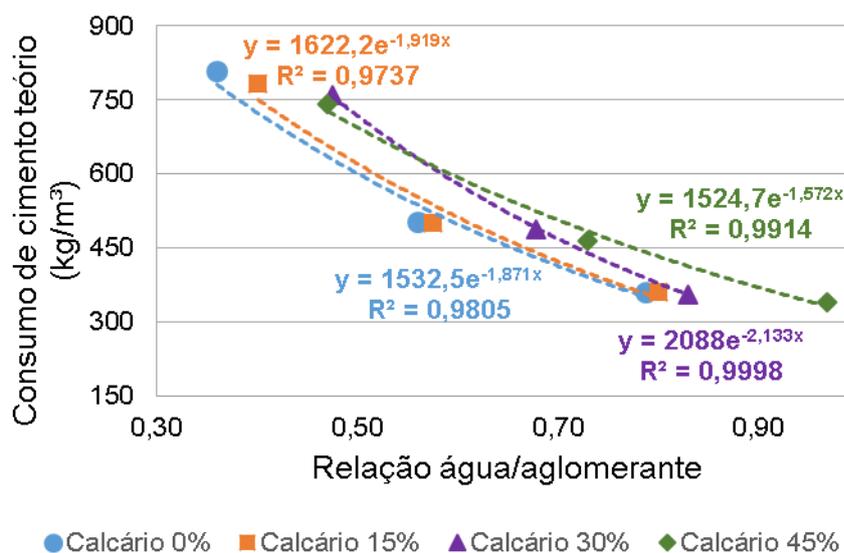


Figura 48 – Consumo de cimento teórico em função da relação a/aglomerante em argamassas com o AMC e teores de PRA.

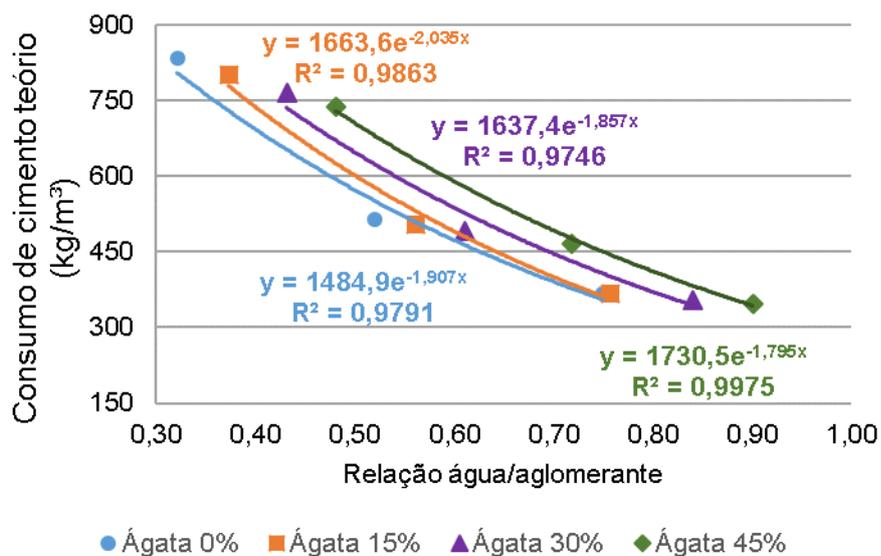


Figura 49 – Consumo de cimento teórico em função da relação a/aglomerante em argamassas com o AMA e teores de PRA.

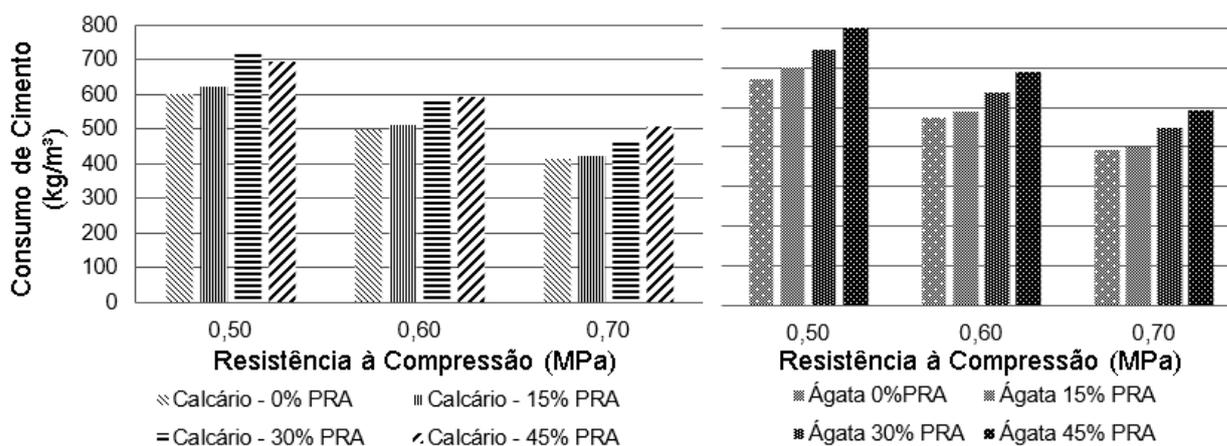


Figura 50 – Consumo de cimento (Kg/m³) estimado em função relação água/aglomerante: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.

Analisando a Figura 50 é possível observar que em todas as relações água/aglomerante, o aumento da substituição do agregado miúdo por pó de rolagem de ágata aumenta o consumo de cimento. Observou-se também que as argamassas produzidas com AMA apresentaram um maior consumo de cimento, para todas as relações analisadas.

Na Figura 51, é apresentada a influência da substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata frente ao consumo de cimento, em misturas com igualdade de resistência, onde verifica-se uma alteração no comportamento para cada agregado.

Para o AMC, em todas as resistências comparadas, os teores de substituição ocasionam uma redução no consumo de cimento, atingindo valores de até 16,64% para a resistência à compressão de 35MPa, com 30% PRA de substituição.

Já para o agregado miúdo de ágata, o teor de 15% PRA é o que apresentou a maior redução do consumo de cimento nas misturas, principalmente para a resistência de 35 MPa, sendo esta de 15,65%.

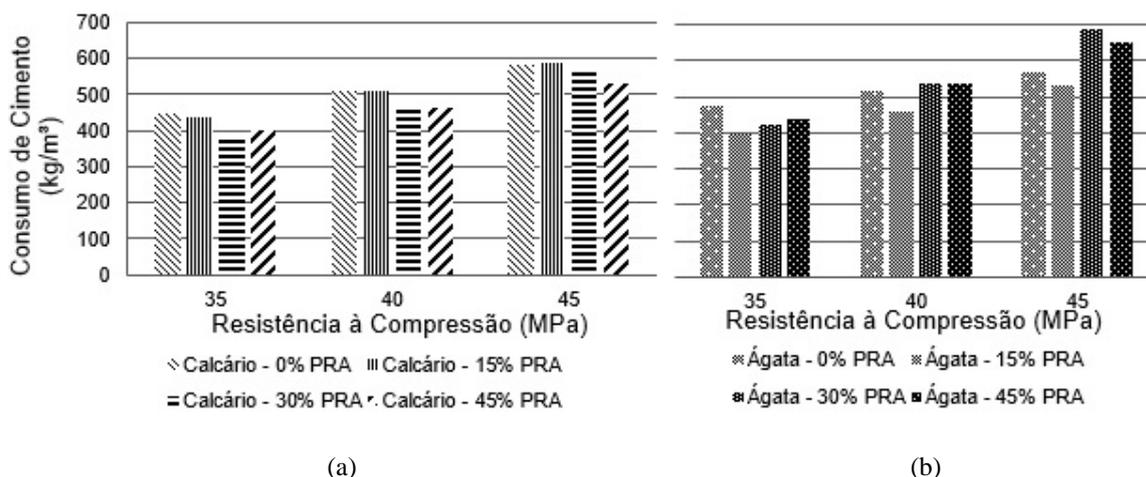


Figura 51 – Consumo de cimento (Kg/m³) estimado em função da resistência à compressão aos 28 dias: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.

Segundo Tristão (2005), em termos gerais, menores consumos dos aglomerantes em argamassas estão correlacionados ao melhor empacotamento das partículas, que também está associado à sua fração e ao formato do grão. Para o autor, a partir da combinação destes fatores é possível o desenvolvimento de combinações de agregados miúdo com os menores volume de vazios.

5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova em argamassa são apresentados na Tabela 24. As médias foram obtidas através da ruptura de 3 corpos de prova na idade de 28 dias. No apêndice 02, encontram-se todos os valores obtidos neste ensaio.

Tabela 24 – Resistência à tração por compressão diametral média aos 28 dias

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário				Agregado miúdo de ágata			
		a/agl.	Resistência Média (Mpa)	DP (Mpa)	CV (%)	a/agl.	Resistência Média (Mpa)	DP (Mpa)	CV (%)
1:1,5	0	0,36	5,701	0,89	15,63	0,32	5,734	0,81	14,20
1:3		0,56	3,821	0,12	3,27	0,52	4,749	0,32	6,78
1:4,5		0,79	2,789	0,29	10,55	0,75	2,781	0,08	2,97
1:1,5	15	0,40	5,255	0,94	17,81	0,37	5,793	0,28	4,82
1:3		0,58	4,065	0,30	7,46	0,56	4,646	0,69	14,83
1:4,5		0,80	3,542	0,33	9,21	0,76	3,882	0,62	16,09
1:1,5	30	0,44	4,187	0,28	6,66	0,43	5,314	0,33	6,28
1:3		0,62	4,465	0,06	1,33	0,61	4,669	0,09	1,96
1:4,5		0,83	3,925	0,60	15,28	0,84	3,559	0,18	5,04
1:1,5	45	0,47	4,643	0,70	14,99	0,48	4,802	0,52	10,80
1:3		0,73	3,858	0,27	7,02	0,72	3,715	0,17	4,71
1:4,5		0,97	3,856	0,64	16,57	0,90	3,683	0,13	3,54

Observou-se também um coeficiente de variação maior do que no ensaio de resistência à compressão, comportamento também verificado em outras pesquisas. Esta variação está correlacionada com a quantidade de corpos de prova ensaiados. A presente pesquisa realizou ensaio com 3 cp's para cada mistura, visto que a NBR 7222 indica o uso de apenas 2 cp's, e mesmo alterando a quantidade a variabilidade de ensaio permaneceu elevada.

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, tipo de agregado miúdo (calcário e ágata) e percentual de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzado no software Statistica 7, onde foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – ANOVA – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Intercept	1283,807	1	1283,807	5395,880	0,000000	-
Agregado	1,243	1	1,243	5,226	0,026906	Sim
Traço	32,776	2	16,388	68,880	0,000000	Sim
% Substituição	1,726	3	0,575	2,418	0,078275	Não
Agregado*Traço	0,918	2	0,459	1,930	0,156763	Não
Agregado* % Subst.	0,683	3	0,228	0,957	0,420849	Não
Traço* % Substituição	9,067	6	1,511	6,352	0,000064	Sim
Agregado*Traço*% Subst.	1,669	6	0,278	1,169	0,339082	Não
Error	10,944	46	0,238			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

A seguir serão avaliados os efeitos mais significativos.

5.2.2.1 Efeito do tipo de agregado na resistência à tração por compressão diametral das argamassas

Na Figura 52 é apresentada a influência do tipo de agregado, de forma isolada, frente a resistência à tração por compressão diametral. Por esta análise, as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata apresentam uma resistência superior, quando comparadas às argamassas produzidas com o agregado miúdo de calcário. Este comportamento não seguiu ao obtido na resistência à compressão. Ainda que na análise estatística o tipo de agregado miúdo tenha sido considerado significativo, a variabilidade do ensaio pode ter mascarado a análise.

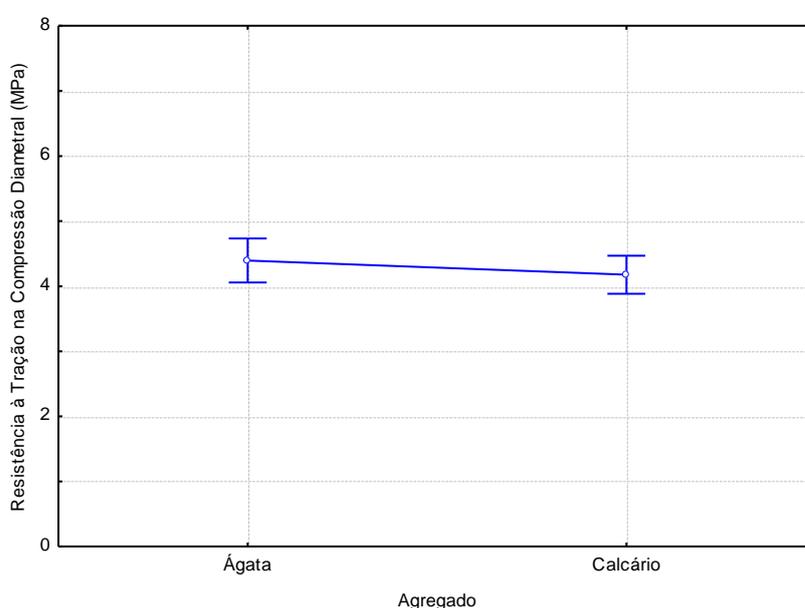


Figura 52 –Influência do tipo de agregado na resistência à tração na compressão diametral

5.2.2.2 Efeito da interação de terceira ordem sobre a resistência à tração por compressão diametral das argamassas

A Figura 53

Figura 53 apresenta a influência do tipo de agregado, traço e teor de substituição em função da resistência à tração por compressão diametral.

Da mesma forma que nas misturas anteriores, verificou-se um incremento superior de resistência à tração na compressão diametral nas misturas com menor consumo de cimento (traço pobre), quando maiores teores de PRA foram utilizados. Observou-se um comportamento oposto nas misturas ricas em cimento (1:1,5). Entretanto deve-se considerar a

variação na relação água/aglomerante, principalmente para este traço, que pode ter influenciado na redução destas resistências. Por exemplo, as argamassas com o AMC a relação a/aglom. aumentou 30%, quando comparado o teor de 0% PRA e 45%PRA. Esta diferença na relação a/aglom. provocou uma redução de 18,50% na f_{td} . Já as argamassas com AMA a relação a/aglom. aumentou 50%, se comparar o teor de 0% PRA e 45% PRA e, por consequência, a resistência à tração por compressão diametral reduziu 16,23%, todas essas considerações para o traço 1:1,5.

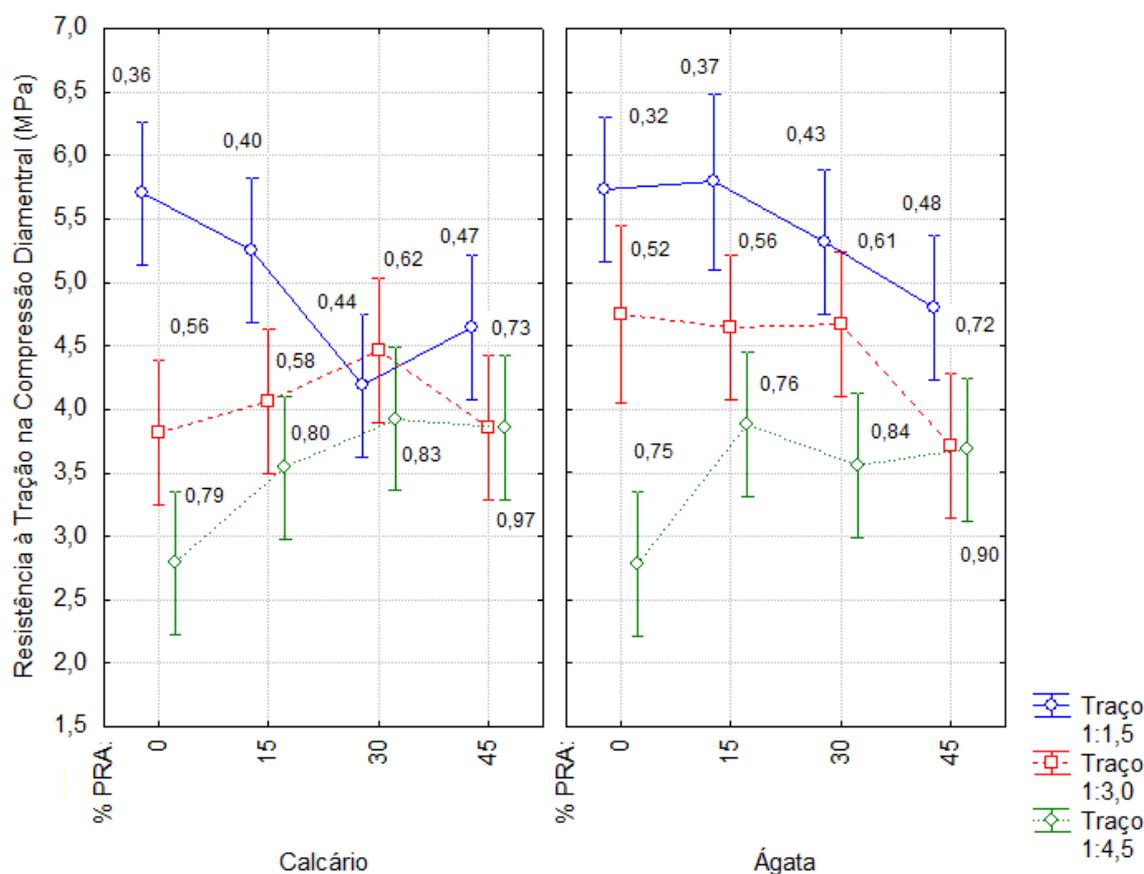


Figura 53 –Influência do tipo de agregado, traço e teor de substituição em função da resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias.

Quanto ao agregado miúdo de calcário, estatisticamente, para o traço rico, não há diferença entre a substituição nos teores de 30% e 45% de PRA. No traço intermediário, todas as substituições não apresentaram diferenças significativa. Para o traço pobre, não há diferença significativa entre os teores de 0% e 15% e entre os teores de 30% e 45% PRA.

Porém, analisando estatisticamente através do teste de Fisher, não foram verificadas diferenças significativas na resistência das misturas com adições de 15% e 30% de PRA para

o traço rico e o traço intermediário com agregado miúdo de ágata. Entretanto para o traço pobre, os teores de 15%, 30% e 45% de PRA não apresentou diferença significativa entre si.

5.2.2.3 Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à tração por compressão diametral das argamassas

Na Figura 54 é possível observar o comportamento do agregado miúdo de calcário e a influência dos diferentes teores de substituição por pó de rolagem de ágata. Percebeu-se que houve um incremento na resistência à tração por compressão diametral, com o aumento dos teores de substituição.

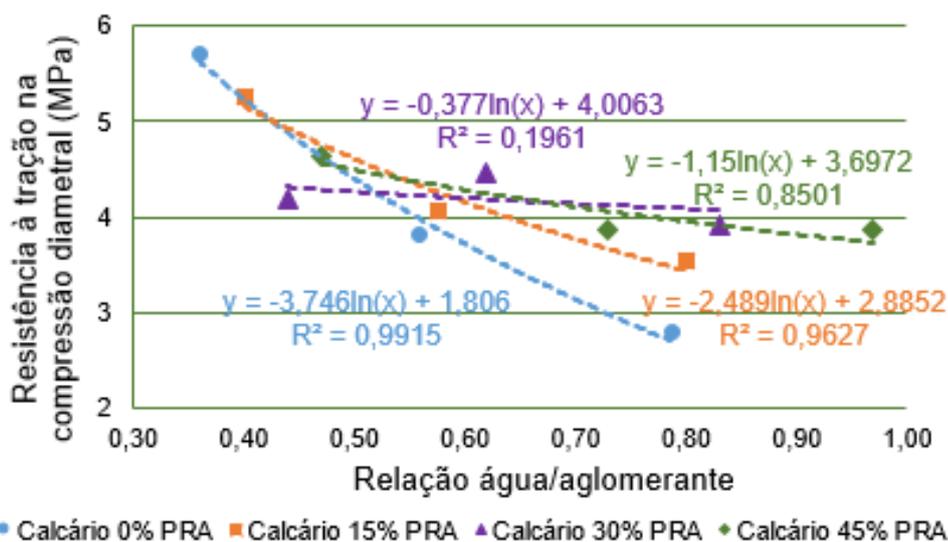


Figura 54 –Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração por compressão diametral em argamassas com diferentes teores de substituição

A Figura 55 retrata o comportamento do agregado miúdo de ágata e a influência dos diferentes teores de substituição por PRA. Percebeu-se que a utilização do PRA incrementou a resistência à tração por compressão diametral, em todos os teores estudados.

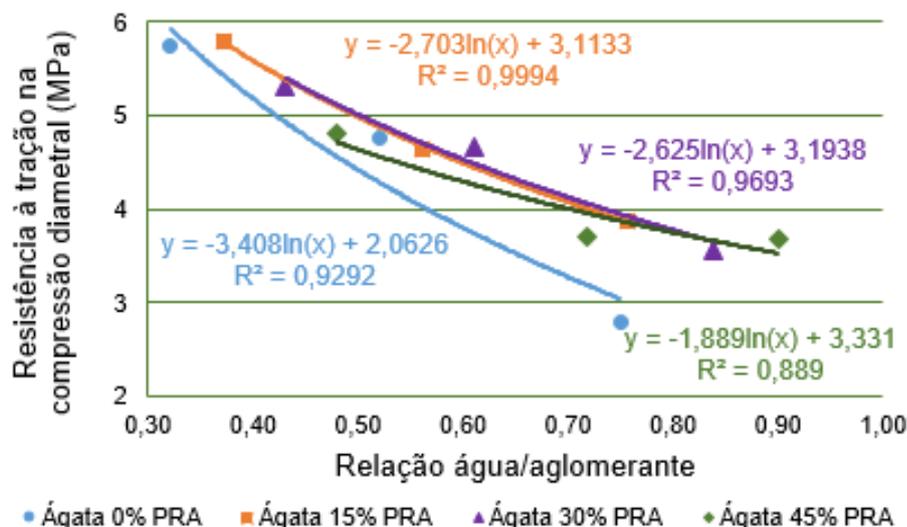


Figura 55 –Influência da relação água/aglomerante na resistência à tração por compressão diametral em argamassas com diferentes teores de substituição

A Figura 56 apresenta uma comparação da resistência à tração por compressão diametral em níveis de relação água/aglomerante iguais, percebe-se que há uma influência do PRA nas argamassas de agregado miúdo de calcário, onde o maior incremento ocorreu para as misturas na relação a/aglom. 0,70, para o teor de substituição de 45% PRA, tendo sido verificado um acréscimo de 30,57% na resistência. Já para as argamassas com o agregado miúdo de ágata, ocorreu um maior incremento para o teor de 15% PRA, em todas as relações água/aglomerante estudadas, sendo que para a relação a/aglom. de 0,70 este aumento na resistência chegou ao valor de 24,46%.

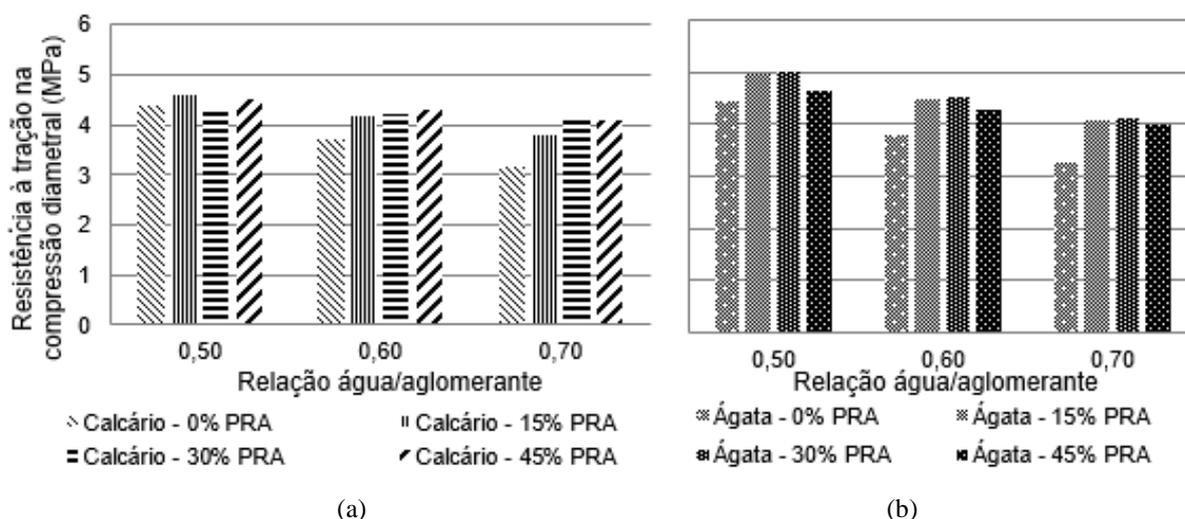


Figura 56 – Resistência à tração por compressão diametral estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.

Embora acredita-se que o efeito fíler , provocado pela substituição dos agregados pelo PRA, tenha auxiliado no incremento das resistências. Segundo Dal Molin (2011), o acréscimo da resistência à compressão decorrente do efeito microfíler não corresponderá a um aumento na resistência à tração, sendo que o ganho significativo da resistência à tração se dá somente quando ocorrem as reações pozolânicas, com a redução do tamanho e da concentração dos cristais de hidróxidos de cálcio na zona de transição.

Observou-se que o acréscimo de resistência à tração por compressão diametral não foi proporcional ao incremento ocasionado na resistência à compressão. Esse fato já foi salientado por Gonçalves (2000), quando inserido o fíler de corte de granito na mistura, que por conta de sua finura auxilia na densificação da zona de transição, há ganhos na resistência à compressão, entretanto na resistência à tração este incremento não é proporcional. Este efeito também já foi salientado por outros autores.

5.2.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido dos corpos de prova em argamassa são apresentados na Tabela 26. As médias foram obtidas através do ensaio de 4 corpos de prova na idade de 28 dias. No apêndice 03 encontram-se todos os valores obtidos neste ensaio.

Tabela 26 – Densidade de massa aparente média no estado endurecido de diferentes argamassas aos 28 dias

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário				Agregado miúdo de ágata			
		a/agl.	DMA (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)	a/agl.	DMA (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)
1:1,5	0	0,36	2262,71	8,38	0,37	0,32	2217,07	16,30	0,74
1:3		0,56	2208,43	20,42	0,92	0,52	2102,50	4,86	0,23
1:4,5		0,79	2145,87	19,43	0,91	0,75	1973,21	40,72	2,06
1:1,5	15	0,40	2181,67	7,05	0,32	0,37	2105,61	12,85	0,61
1:3		0,58	2100,37	86,98	4,14	0,56	2053,92	21,65	1,05
1:4,5		0,80	2043,03	8,93	0,44	0,76	1978,30	5,39	0,27
1:1,5	30	0,44	2019,64	5,51	0,27	0,43	1997,27	6,27	0,31
1:3		0,62	2033,50	2,27	0,11	0,61	1991,77	12,26	0,62
1:4,5		0,83	2061,27	9,06	0,44	0,84	1960,44	12,83	0,65
1:1,5	45	0,47	1990,67	8,70	0,44	0,48	2059,00	7,76	0,38
1:3		0,73	1972,88	3,75	0,19	0,72	1935,30	17,76	0,92
1:4,5		0,97	1967,38	13,89	0,71	0,90	1932,99	1,93	0,10

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, tipo de agregado miúdo (calcário e ágata) e percentual de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de

ágata, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada na ferramenta Statistica 7, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – ANOVA – Densidade de massa aparente no estado endurecido aos 28 dias

<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>SQF</i>	<i>Teste F</i>	<i>p</i>	<i>Sig.</i>
Intercept	373883380	1	373883380	836294,2	0,000000	-
Agregado	71709	1	71709	160,4	0,000000	Sim
Traço	134012	2	67006	149,9	0,000000	Sim
% Substituição	407084	3	135695	303,5	0,000000	Sim
Agregado*Traço	23376	2	11688	26,1	0,000000	Sim
Agregado* % Subst.	31995	3	10665	23,9	0,000000	Sim
Traço* % Substituição	78351	6	13059	29,2	0,000000	Sim
Agregado*Traço*% Subst.	14194	6	2366	5,3	0,000167	Sim
Error	29507	66	447			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

5.2.3.1 Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a densidade de massa aparente

Analisando o efeito isolado do tipo de agregado miúdo é possível perceber que as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário apresentaram uma densidade de massa aparente maior que as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, conforme observa-se na Figura 57.

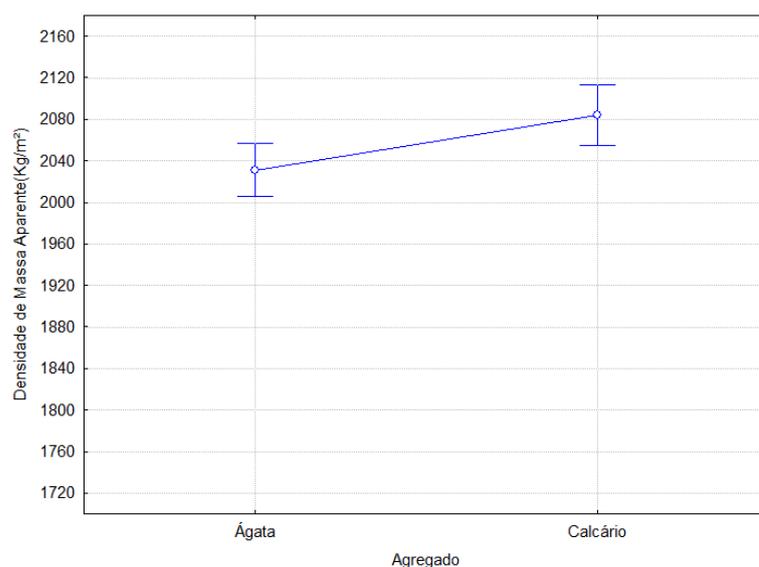


Figura 57 – Influência do tipo do agregado miúdo na densidade de massa aparente das argamassas

Possivelmente a menor densidade de massa aparente das misturas com agregado miúdo de ágata pode estar relacionada, à sua massa específica, já que o AMA apresenta uma massa específica de $2,63\text{g/cm}^3$ e o AMC uma massa específica de $2,73\text{g/cm}^3$.

5.2.3.2 Efeito da interação de terceira ordem sobre a densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas

Analisando a Figura 58 observou-se que as argamassas com AMC apresentaram maior densidade de massa aparente, quando comparadas com as argamassas produzidas com AMA. Verificou-se também que para os dois agregados miúdos a substituição por PRA provocou uma redução nesta propriedade. Estes fatos devem estar relacionados a massa específica dos agregados utilizados. Deste modo, ao passo que se substitui, em volume, um agregado mais pesado por um mais leve, consequentemente tem-se uma densidade de massa aparente reduzida.

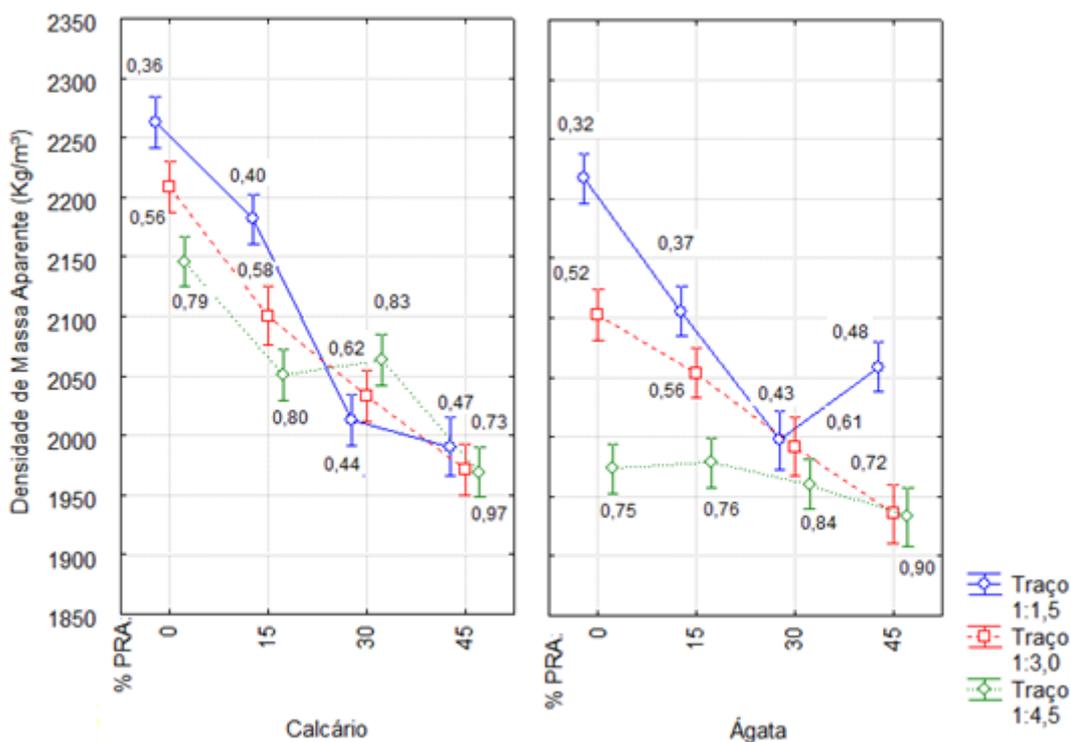


Figura 58 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido

Embora todos os efeitos tenham sido considerados significativos, analisando estatisticamente através do teste de Fisher, foi possível notar que para as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, no traço pobre em cimento, a substituição de 15% e 30% PRA não foram

significativas. Já para as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário, também o traço pobre em cimento, a densidade de massa aparente para o teor de 30% PRA foi equivalente ao teor de 15% PRA, logo, esta substituição não apresenta influência na densidade.

Jiménez (2013) observou em seu estudo que a densidade de massa aparente de argamassa diminuiu à medida que a relação de substituição dos agregados aumentou, sendo que esse autor comparou argamassas produzidas com agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado de RCD, onde essa substituição foi realizada em volume, e o RCD tinha menor massa específica. Este fato também foi identificado no estudo de argamassas fabricadas com areia natural e com a substituição desta por resíduos de tijolos cerâmicos britados, realizado por Silva et al. (2009). Os autores verificaram uma diminuição significativa na densidade de massa aparente, à medida que a percentagem de finos incorporados aumentava. Este comportamento foi justificado pela menor densidade dos finos dos resíduos de tijolo cerâmico, em comparação com a areia utilizada no experimento.

Entretanto, outros autores (BRAGA et al, 2012; ARNOLD, 2011) chegaram a conclusões opostas em seus trabalhos, observando que conforme se aumentava a percentagem de substituição maior era a densidade de massa aparente.

O trabalho de Braga et al. (2012) analisou a influência da adição de fíler (< 0.150 mm) de concreto britado, nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Já o trabalho de Arnold (2013) analisou a influência da forma do grão do agregado miúdo e do teor de fíler das areais de britagem de rocha basáltica e areia natural, nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Acredita-se que estes dois estudos, por terem realizado adições à mistura, a densidade de massa aparente tenha aumentado, enquanto que os 2 trabalhos iniciais realizaram a substituição dos materiais, por este motivo a densidade pode ter sido reduzida. Dal Molin (2011) coloca que dentre os efeitos físicos gerados pelas adições minerais, tem-se o efeito micro fíler, onde observa-se um aumento na densidade das misturas, que é resultante do preenchimento dos vazios pelas partículas da adição, e que o efeito das adições pozolânicas reduziriam a densidade de massa aparente.

5.2.3.3 Efeito da relação a/aglomerante sobre a densidade de massa aparente

Analisando a Figura 59 e a Figura 60 é possível notar um comportamento padrão, com exceção de apenas dois pontos, onde observou-se uma inversão no comportamento. Assim,

como o observado anteriormente, as argamassas de referência, neste caso as produzidas com AMC, apresentam uma densidade de massa aparente maior que as demais com a substituição por pó de rolagem de ágata, conseqüentemente quanto maior o percentual de substituição maior é a redução na densidade de massa aparente, o que já se esperava, visto que a substituição ocorreu em volume e os agregados apresentavam massas específicas diferentes.

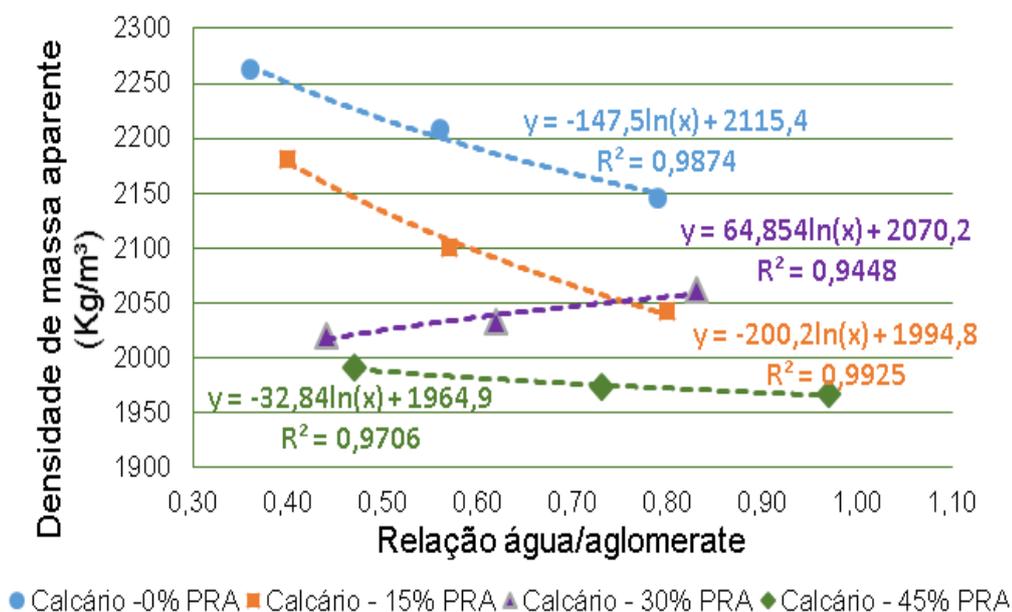


Figura 59 –Influência da relação água/ aglomerante na densidade de massa aparente das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário

Ainda observando a Figura 59 é possível notar que a curva com 30% de substituição apresenta uma inversão no comportamento, quando comparada com as demais. Sendo que este comportamento para a curva de 30% PRA também será observado nos ensaios que serão apresentados a seguir.

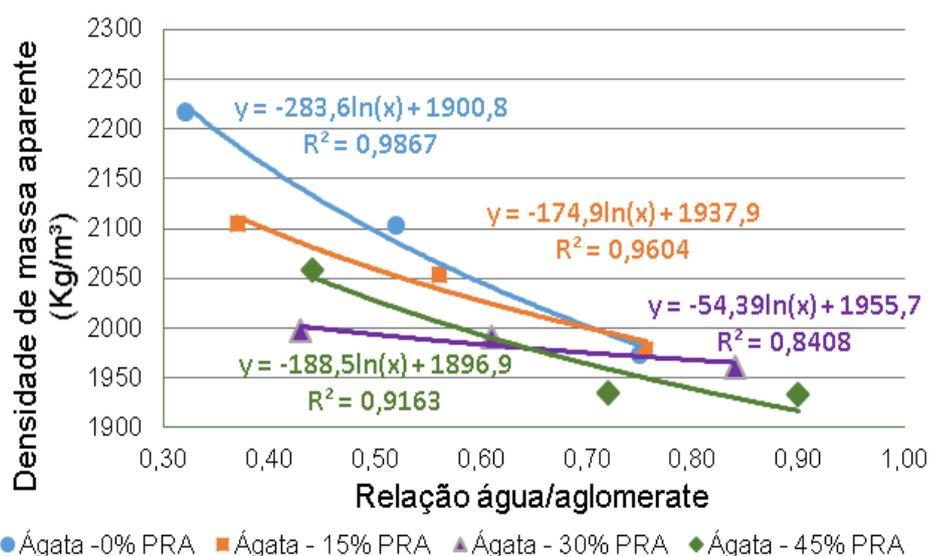


Figura 60 – Influência da relação água aglomerante na densidade de massa aparente das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata

A Figura 61 apresenta um comparativo da influência do pó de rolagem de ágata para relações água/aglomerante determinadas. Com o aumento da relação água/aglomerante, ocorreu uma redução da densidade de massa aparente, como o esperado. Para as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário, em todas as relações a/aglom. analisadas, o acréscimo do PRA contribuiu para a redução na sua densidade. Já as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, apenas o teor de 45% PRA não promoveu esta redução, para as relações água/aglom. de 0,50 e 0,60, quando comparadas com o teor de 30% PRA.

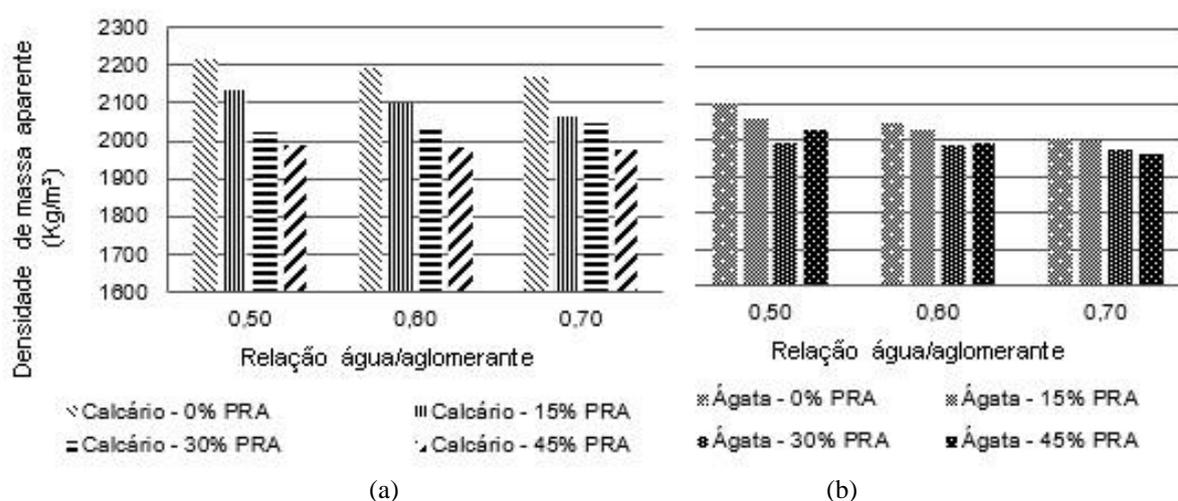


Figura 61 – Densidade de massa aparente estimada em função da relação a/aglomerante: (a) argamassas com AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA.

Para o agregado miúdo de calcário, a redução de densidade de massa aparente chegou a 10,37%, para uma relação a/aglom. 0,50, teor de substituição de 45% PRA. Já para o agregado miúdo de ágata, o teor que apresenta o maior redução na densidade foi o de 30% PRA na relação a/aglom. 0,50, onde essa diminuição foi de 4,96%.

Todas as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata apre sentaram uma densidade de massa aparente menor do que as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário. Conforme já mencionado, este fato deve-se ao AMA apresentar uma massa específica menor que o AMC, como já comentado anteriormente nesta análise de resultados.

5.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico nos corpos de prova em argamassa são apresentados na Tabela 28. As médias foram obtidas através da medição em 4 corpos de prova na idade de 28 dias. No apêndice 04, encontram-se todos os valores obtidos neste ensaio.

Tabela 28 –Módulo de elasticidade dinâmico médio aos 28 dias

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário				Agregado miúdo de ágata			
		a/agl.	MED (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	a/agl.	MED (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
1:1,5	0	0,36	45,18	1,56	3,45	0,32	38,46	1,18	3,07
1:3		0,56	38,97	1,77	4,55	0,52	29,65	0,62	2,10
1:4,5		0,79	30,39	1,02	3,34	0,75	20,28	1,61	7,95
1:1,5	15	0,40	37,81	0,82	2,18	0,37	34,29	1,02	2,97
1:3		0,58	28,34	1,63	5,76	0,56	30,28	0,96	3,16
1:4,5		0,80	19,92	0,63	3,15	0,76	26,07	0,34	1,32
1:1,5	30	0,44	22,23	0,61	2,76	0,43	29,01	0,35	1,19
1:3		0,62	22,37	0,39	1,73	0,61	27,11	0,71	2,60
1:4,5		0,83	29,49	0,33	1,13	0,84	25,59	1,28	5,01
1:1,5	45	0,47	29,05	0,78	2,67	0,48	31,68	0,68	2,14
1:3		0,73	27,50	0,31	1,11	0,72	25,78	0,75	2,91
1:4,5		0,97	27,11	0,35	1,29	0,90	27,12	0,39	1,45

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, tipo de agregado miúdo (calcário e ágata) e percentual de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada na ferramenta Statistica 7, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – ANOVA – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>SQF</i>	<i>Teste F</i>	<i>p</i>	<i>Sig.</i>
Intercept	75216,74	1	75216,74	80986,80	0,000000	-
Agregado	25,76	1	25,76	27,74	0,000002	Sim
Traço	908,12	2	454,06	488,89	0,000000	Sim
% Substituição	759,78	3	253,26	272,69	0,000000	Sim
Agregado*Traço	11,61	2	5,80	6,25	0,003291	Sim
Agregado* % Subst.	467,79	3	155,93	167,89	0,000000	Sim
Traço* % Substituição	861,82	6	143,64	154,66	0,000000	Sim
Agregado*Traço*% Subst.	234,23	6	39,04	42,03	0,000000	Sim
Error	60,37	65	0,93			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

5.2.4.1 Efeito da relação a/aglomerante sobre o módulo de elasticidade dinâmico

Analisando o efeito isolado do tipo de agregado miúdo é possível perceber as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário apresentam um módulo de elasticidade dinâmico maior que as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, conforme Figura 62.

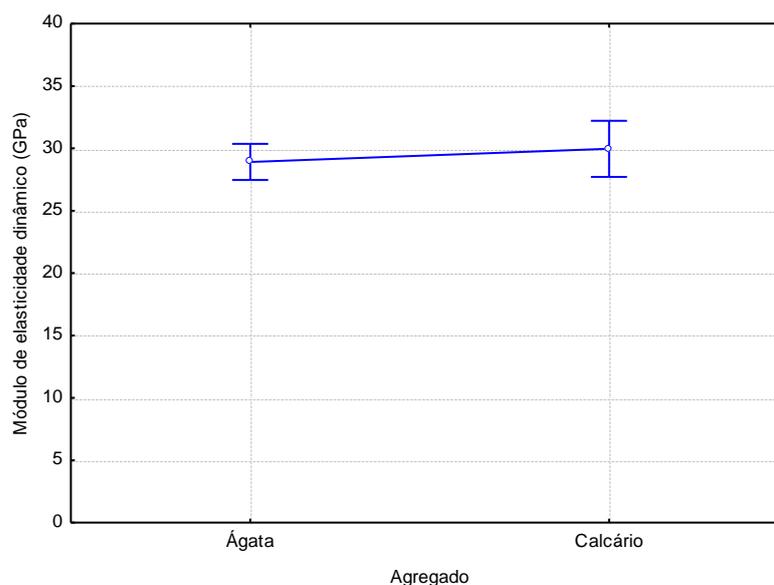


Figura 62 – Influência do tipo do agregado miúdo no módulo de elasticidade dinâmico

5.2.4.2 Efeito da interação de terceira ordem sobre o módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido das argamassas

Analisando a

Figura 63, observou-se que, de um modo geral, nas argamassas sem substituição por PRA, as que apresentam maior relação agregado miúdo/aglomerante, foram as que apresentaram menor módulo de elasticidade dinâmico. O estudo de Silva e Campiteli (2008), o qual analisou as propriedades mecânicas de argamassas produzidas com agregado natural e agregado britado, também detectou essa correlação entre a relação de agregado miúdo/aglomerante e o módulo.

Outro fato observado, foi que as argamassas com o AMA apresentaram menor módulo de elasticidade dinâmico, quando comparadas com às argamassas com AMC. Nas argamassas que utilizaram como agregado miúdo o calcário, o traço rico em cimento, a substituição por PRA reduziu o MED para os teores de 15% e 30%, entretanto, para o teor de 45% há um acréscimo no módulo, se comparado com o teor de 30%. O mesmo comportamento ocorreu para o traço 1:3. Já para o traço pobre em cimento, os teores de 30 e 45% elevaram o valor do MED. Entretanto, para as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata, o traço rico em cimento apresentou o mesmo comportamento da argamassa com AMC para o respectivo traço. O proporcionamento intermediário apresentou um aumento no módulo para o teor de 15% e para os demais ocorreu uma redução. Já o traço pobre em cimento, conforme se substituía o agregado miúdo de ágata por PRA o módulo foi se elevando.

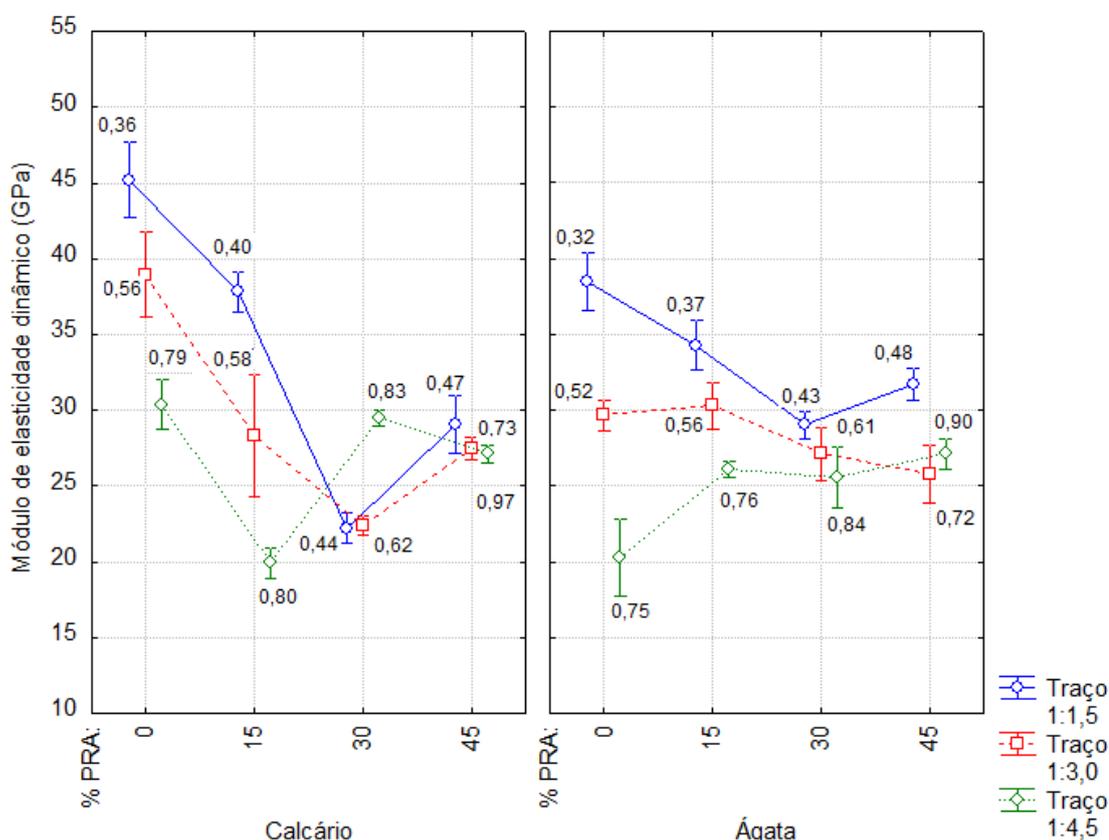


Figura 63 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.

Entretanto, embora todos os efeitos tenham sido considerados significativos, analisando estatisticamente através do teste de Fisher, foi possível notar que para as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, no traço intermediário, a substituição de 15% PRA não foi significativa, sendo equivalente a 0% PRA, logo, o valor do módulo de elasticidade dinâmico é igual estatisticamente para os dois teores. Ainda para este mesmo traço o teor de 45% PRA também não foi significativo, equivalente ao teor de 30% PRA. Já no traço pobre em cimento, os teores de 30% e 45% PRA não foram significativos, sendo considerados iguais ao teor de 15% PRA, logo a substituição de PRA, estatisticamente não fez diferença entre esses teores.

Analisando as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário, no traço intermediário o teor de 45% PRA não significativo, equivalendo ao teor de 15% PRA. Ainda para as argamassas com AMC no traço pobre em cimento, o teor de 30% é equivalentes ao teor de 0% de PRA, conforme Figura 63.

Observou-se ainda, que em quase todos os traços, o comportamento das argamassas na resistência à compressão, densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico foi diretamente proporcional, corroborando com o estudo de Arnold (2011) e Braga (2010).

5.2.4.3 Efeito da relação a/aglomerante sobre o módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 64 é possível observar o comportamento do agregado miúdo de calcário e a influência dos teores de substituição por pó de rolagem de ágata quanto ao módulo de elasticidade dinâmico. Percebe-se que há uma redução nesta propriedade conforme se aumentou a substituição por pó de rolagem de ágata.

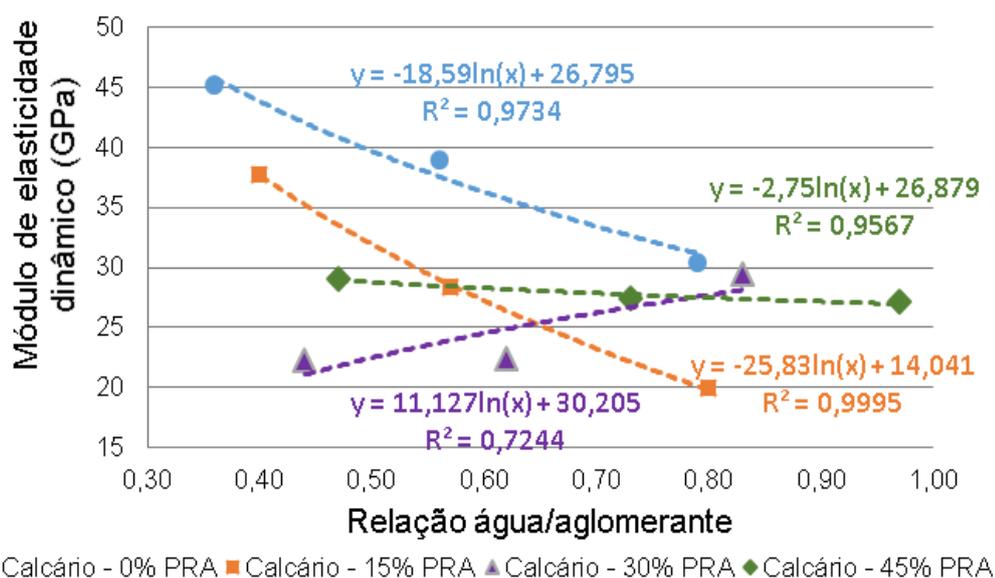


Figura 64 – Influência da relação água/ aglomerante no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário

A Figura 65 demonstra o comportamento do agregado miúdo de ágata e a influência dos teores de substituição por PRA, quanto ao módulo de elasticidade dinâmico. Observou-se que conforme aumentava-se a substituição do agregado por pó de rolagem de ágata, ocorria um aumento na propriedade, embora em alguns pontos este comportamento tenha se invertido.

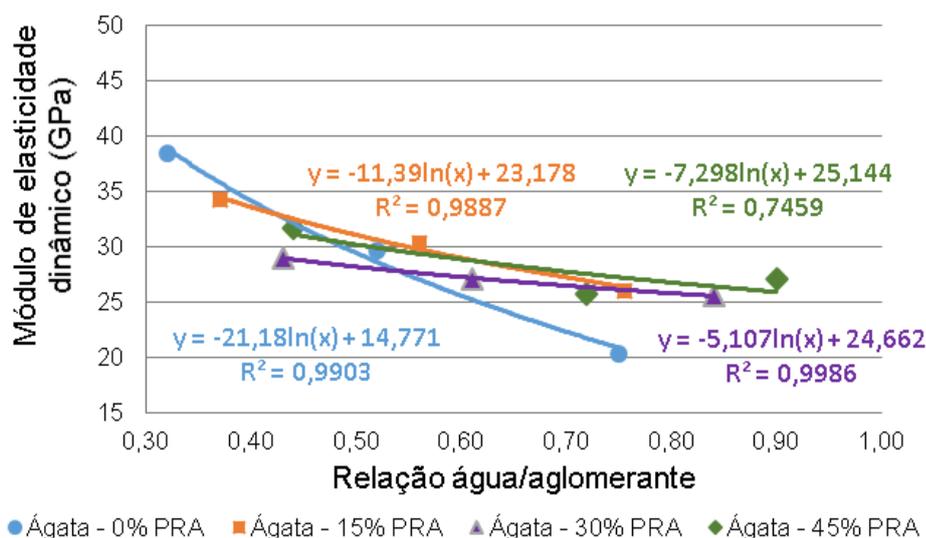


Figura 65 – Influência da relação água/ aglomerante no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata

A Figura 66 demonstra a influência do pó de rolagem de ágata, a partir de relações a/aglom. iguais.

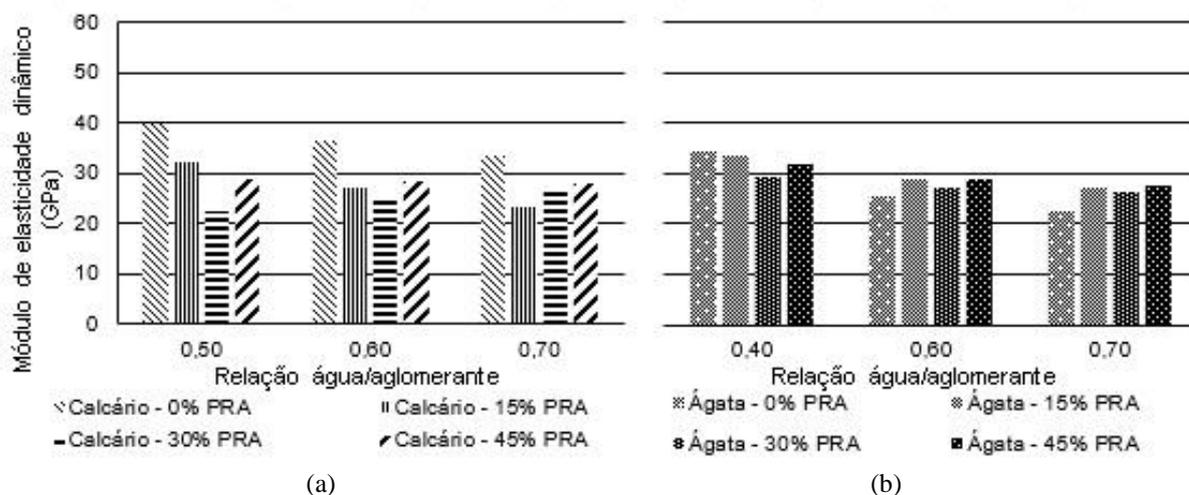


Figura 66 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição no Módulo de elasticidade dinâmico: (a) argamassas com o AMC e diferentes teores de PRA; (b) argamassas com AMA e diferentes teores de PRA

A Figura 66 mostra, o efeito do pó de rolagem de ágata nas argamassas produzidas com AMC observou-se que para as relações a/aglom. de 0,50 e 0,60, há uma redução no módulo de elasticidade dinâmico nos teores de 15% e 30%, já para a a/aglom. 0,70, esta redução se dá apenas no teor de 15%PRA.

Nas argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, houve um incremento na propriedade, para os teores de 15%, 30% e 45% para as relações a/aglom. 0,60 e 0,70. Na relação a/glom. 0,40, os teores de 15% e 30% apresentam uma pequena redução e no teor de 45% ocorreu um leve incremento quando comparado com o teor de 30%.

5.2.5 Absorção de água

A absorção de água por capilaridade é uma propriedade que está atrelada à durabilidade das matrizes cimentícias e por este motivo é que o presente trabalho contempla a sua análise.

5.2.5.1 Absorção de água ao longo do tempo

As Figura 67 a 69 mostram a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, em 0, 1h30min, 3, 4h30min, 6, 24, 48, 72 e 96 horas, para cada mistura.

A Figura 67 demonstra o comportamento dos agregados miúdos de calcário e ágata, respectivamente com os teores de substituição por pó de rolagem de ágata para o traço 1:1,5. Neste traço o teor de 30% de substituição apresentou maior absorção de água ao longo do

tempo, e o teor de 45% foi o que apresentou menor absorção ao longo do tempo. Logo, para os dois agregados, no traço rico em cimento, os teores de 15% e 30% PRA não foram considerados eficientes para a redução de água na absorção.

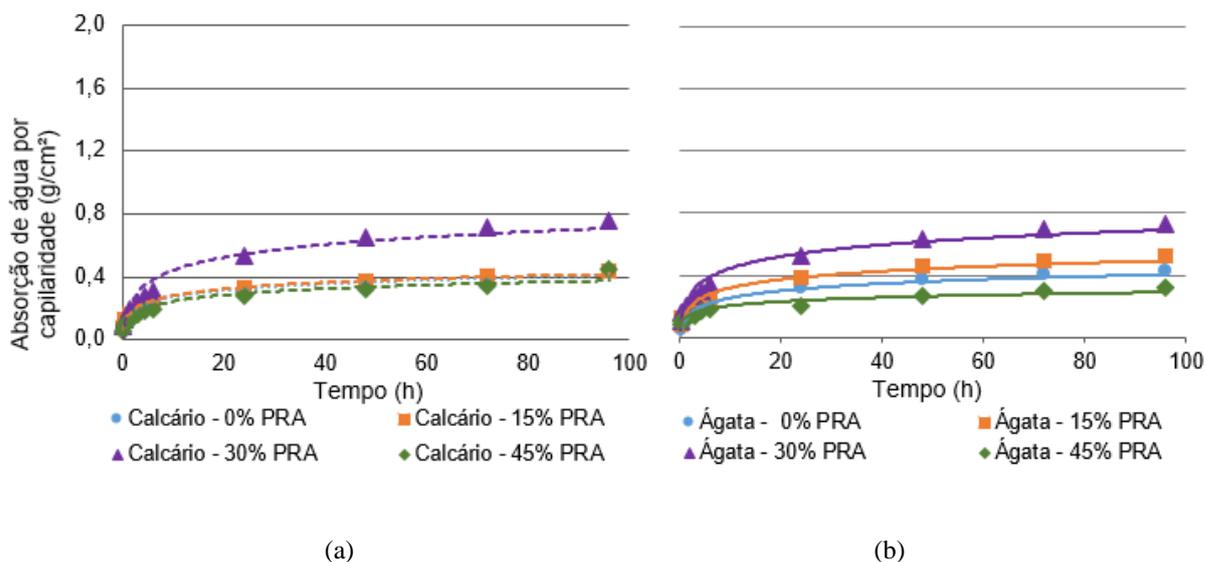


Figura 67 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:1,5: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.

Já analisando a Figura 68, que refere-se ao comportamento dos agregados miúdos de calcário e ágata, com diferentes teores de substituição por pó de rolagem de ágata para o traço 1:3, observou-se que no agregado miúdo de calcário, o teor de 15% aumentou a absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, entretanto, os teores de 30% e 45% de pó de rolagem de água diminuiu esta absorção, fato que é considerado benéfico para as argamassas. Com relação ao agregado miúdo de ágata, todos os teores de substituição diminuíram a absorção de água das misturas. Acredita-se que o fato da substituição de 15% PRA para a argamassa de AMC ter apresentado aumento na absorção pode estar correlacionado com o empacotamento granular, sendo que este teor pode não ser suficiente para causar o efeito do empacotamento.

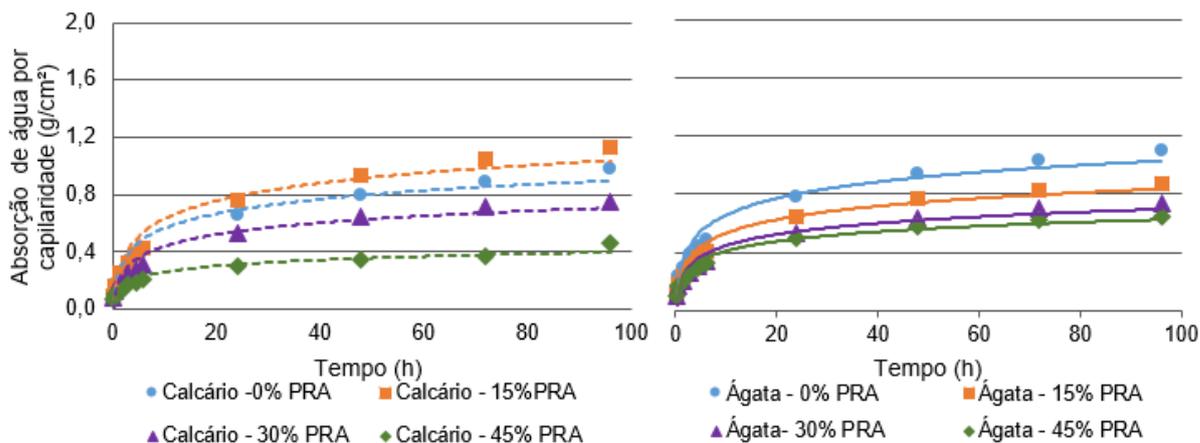


Figura 68 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:3: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.

Na Figura 69, tem-se o comportamento dos agregados miúdo de calcário e ágata, com seus teores de substituição, no traço 1:4,5.

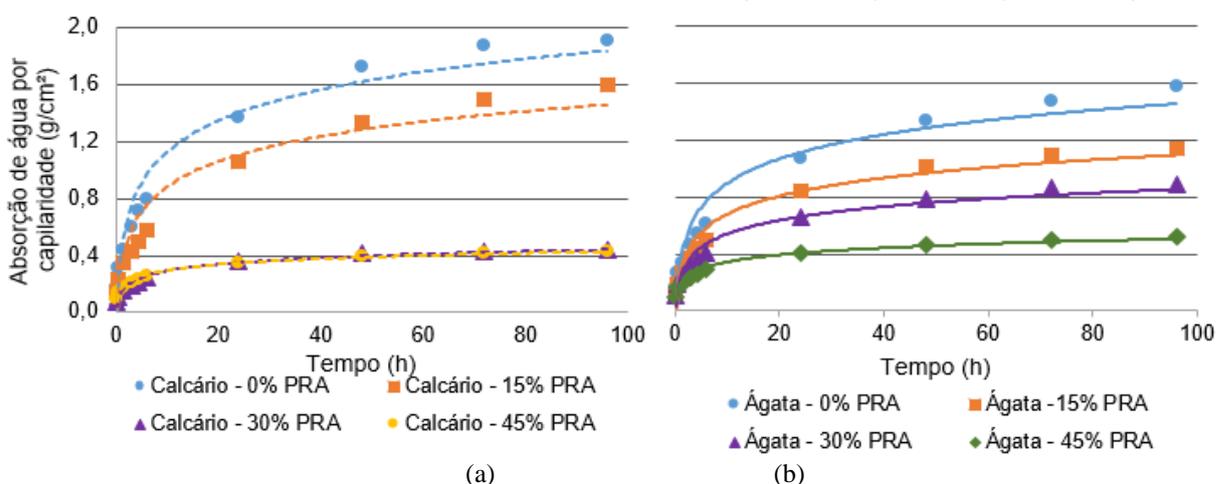


Figura 69 – Absorção de água por capilaridade, no traço 1:4,5: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.

Foi possível notar na Figura 70 – Influência do tipo do agregado miúdo na absorção de água por capilaridade que para os dois tipos de agregados a substituição por pó de rolagem de ágata foi benéfica, pois reduziu de maneira significativa a absorção de água por capilaridade. Sendo que os melhores resultados foram obtidos nas misturas com AMC e os teores de 30% e 45% de substituição por PRA. Já para as argamassas com o AMA o teor de 45% de PRA foi o que apresentou melhor resultado. Essa redução na absorção de água por capilaridade pode estar correlacionada com o melhor do empacotamento dos agregados quando se utiliza o PRA. Também acredita-se que o PRA, por apresentar grande quantidade de finos, possa ter

ocasionado um efeito fíler nessas argamassa, uma vez que esse efeito causa um refinamento da estrutura dos poros e altera a microestrutura da zona de transição. Segundo Dal Molin (2005), efeito físico gera essas melhoras, refletindo no desempenho mecânico e de durabilidade.

5.2.5.2 Absorção total de Água por Capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova em argamassa, que são apresentados na

Tabela 30, correspondem à média dos valores de absorção de água após 96 horas de contato dos corpos de prova com a água.

Tabela 30 – Absorção de água por capilaridade médio das argamassas confeccionadas com diferentes traços e teores de substituição dos agregados por PRA.

Traço	% de Subst. PRA	Agregado miúdo de calcário				Agregado miúdo de ágata			
		a/agl.	Absorção (g/cm ²)	DP (g/cm ²)	CV (%)	a/agl.	Absorção (g/cm ²)	DP (g/cm ²)	CV (%)
1:1,5	0	0,36	0,43	0,02	3,76	0,32	0,43	0,08	19,18
1:3		0,56	0,98	0,07	7,41	0,52	1,10	0,06	5,66
1:4,5		0,79	1,91	0,05	2,73	0,75	1,58	0,04	2,49
1:1,5	15	0,40	0,44	0,01	2,09	0,37	0,52	0,03	5,79
1:3		0,58	1,13	0,04	3,67	0,56	0,88	0,01	1,63
1:4,5		0,80	1,60	0,14	8,55	0,76	1,15	0,04	3,37
1:1,5	30	0,44	0,74	0,05	7,35	0,43	0,73	0,02	2,18
1:3		0,62	0,75	0,07	9,25	0,61	0,73	0,02	2,49
1:4,5		0,83	0,44	0,02	5,08	0,84	0,89	0,04	4,36
1:1,5	45	0,47	0,45	0,01	1,17	0,48	0,33	0,02	5,85
1:3		0,73	0,46	0,01	2,13	0,72	0,64	0,003	0,41
1:4,5		0,97	0,43	0,02	4,51	0,90	0,52	0,004	0,83

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, tipo de agregado miúdo (calcário e ágata) e percentual de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada na ferramenta Statistica 7, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Análise de Variância (ANOVA) – Absorção de água por capilaridade

<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>SQF</i>	<i>Teste F</i>	<i>p</i>	<i>Sig.</i>
Intercept	56,37230	1	56,37230	21972,12	0,000000	-
Agregado	0,01276	1	0,01276	4,97	0,029185	Sim
Traço	4,70444	2	2,35222	916,82	0,000000	Sim
% Substituição	4,55526	3	1,51842	591,83	0,000000	Sim
Agregado*Traço	0,01748	2	0,00874	3,41	0,039177	Sim
Agregado* % Subst.	0,37593	3	0,12531	48,84	0,000000	Sim
Traço* % Substituição	5,03626	6	0,83938	327,16	0,000000	Sim
Agregado*Traço*% Subst.	0,81902	6	0,13650	53,20	0,000000	Sim
Error	0,16677	65	0,00257			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

5.2.5.3 Efeito isolado do agregado sobre a absorção de água por capilaridade

Analisando o efeito isolado do tipo de agregado miúdo percebe-se que as argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário apresentaram uma absorção de água maior que as argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata, conforme Figura 70. Acredita-se que essa diferença possa estar relacionada com o maior índice de absorção do agregado miúdo de calcário (1,81%), frente ao índice de absorção do agregado miúdo de ágata (0,76%).

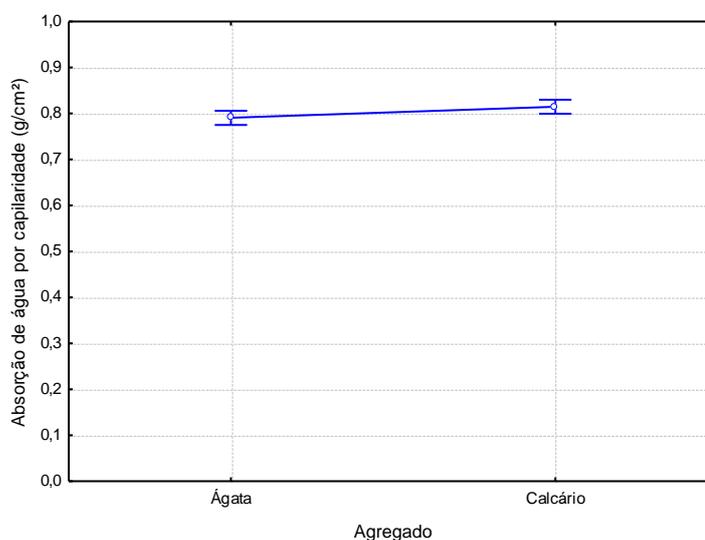


Figura 70 – Influência do tipo do agregado miúdo na absorção de água por capilaridade

5.2.5.4 Efeito da interação de terceira ordem sobre absorção por capilaridade no estado endurecido das argamassas

Na Figura 71, observou-se que para os dois agregados estudados, quanto maior a relação agregado miúdo/aglomerante maior a absorção, fato já esperado. Notou-se também que para as argamassas produzidas com AMC, no proporcionamento 1:1,5, a absorção de água por

capilaridade apresentou um aumento para os teores de 15%, 30% e 45%, entretanto foi necessário considerar que embora tivesse ocorrido esse aumento, houve também um aumento considerável na relação água/aglomerante, que chegou a 11,11% para o teor de 15% PRA e 22,22% para o teor de 30%PRA, quando comparados ao teor de 0% PRA. Esse aumento na absorção também foi notado para o traço 1:3, para as argamassas com o mesmo agregado, onde a relação água/aglomerante aumento 6,55% para o teor de 15% PRA. Já para as argamassas produzidas com o AMA, observou-se apenas um aumento da absorção para o proporcionamento 1:1,5. Esse incremento na absorção foi de 15,61% para o teor de 15% PRA e de 34,37% para o teor de 30% PRA.

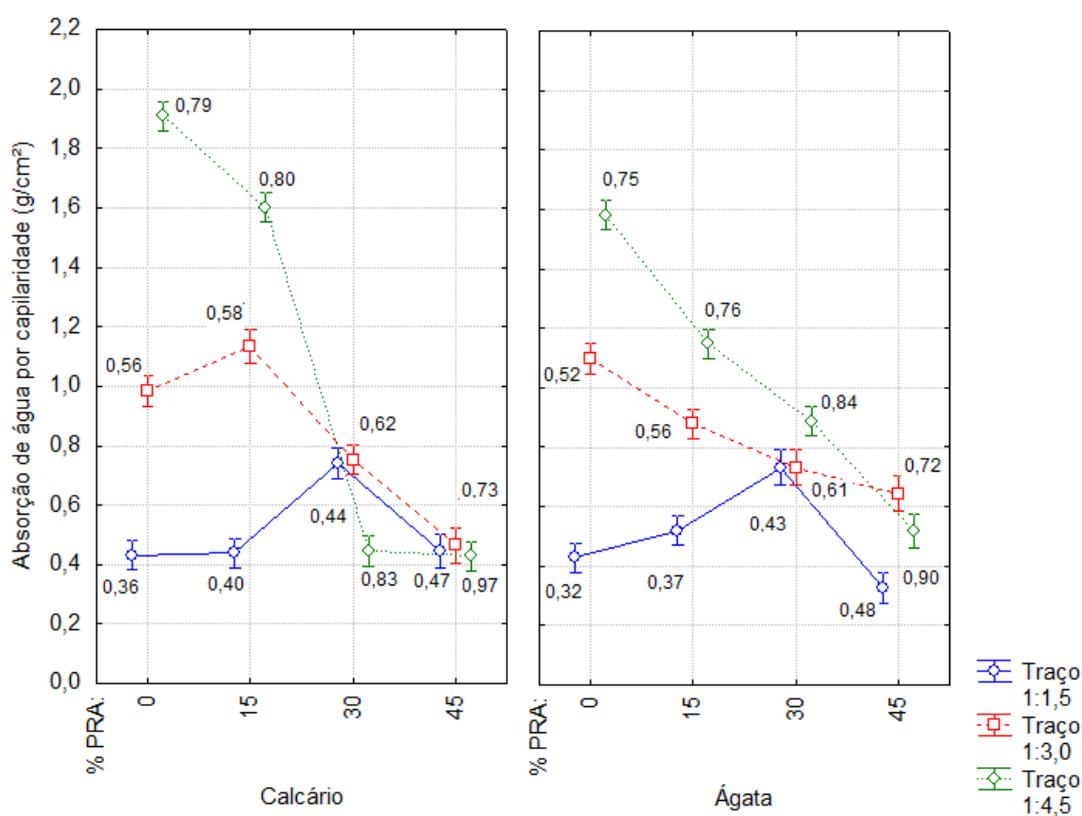


Figura 71 – Influência do tipo agregado, traço e teor de substituição na absorção de água por capilaridade

Deste modo, embora todos os efeitos tenham sido considerados significativos a partir da análise da ANOVA, realizou-se uma análise estatisticamente através do teste de Fisher, onde foi possível notar que para as argamassas produzidas com agregado miúdo calcário, no traço rico em aglomerante, os teores de 15% e 45% de PRA não foram considerados significativos, logo, o incremento de absorção que tinha ocorrido para estes dois teores, estatisticamente corresponde à absorção do teor de 0%PRA, deste modo o acréscimo do PRA não influenciou nesta absorção. Já para o traço pobre de aglomerante, o teor de 45% PRA apresenta uma

absorção de água equivalentes ao teor de 30% de pó de rolagem de ágata, deste modo a substituição não interferiu na absorção.

No estudo de Silva et al. (2009) foi observada reduções significativas na absorção de água por capilaridade devido ao aumento dos teores de finos nas argamassas avaliadas. Este fato corrobora com os resultados da presente pesquisa, principalmente para o traço mais pobre, onde ficou evidente a melhora desta propriedade.

É possível estabelecer relações entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão, visto que quanto maior as resistências das argamassas, menor era o índice de absorção, com alguns exceções. Esta relação também pode ser observada na pesquisa de Braga (2010) e Arnold (2011).

5.2.5.5 Efeito da relação a/aglomerante sobre a absorção de água por capilaridade

Como a relação água/aglomerante não foi mantida constante, pode-se perceber, na Figura 72 e Figura 73 que esta sofreu variações, influenciadas pelo tipo de agregado e pelo teor de substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata.

Deste modo, analisando a Figura 72, observa-se que a utilização do pó de rolagem de ágata reduziu a absorção de água por capilaridade em todas as misturas, com uma exceção para o traço 1:1,5 com 30% PRA, onde a absorção foi superior.

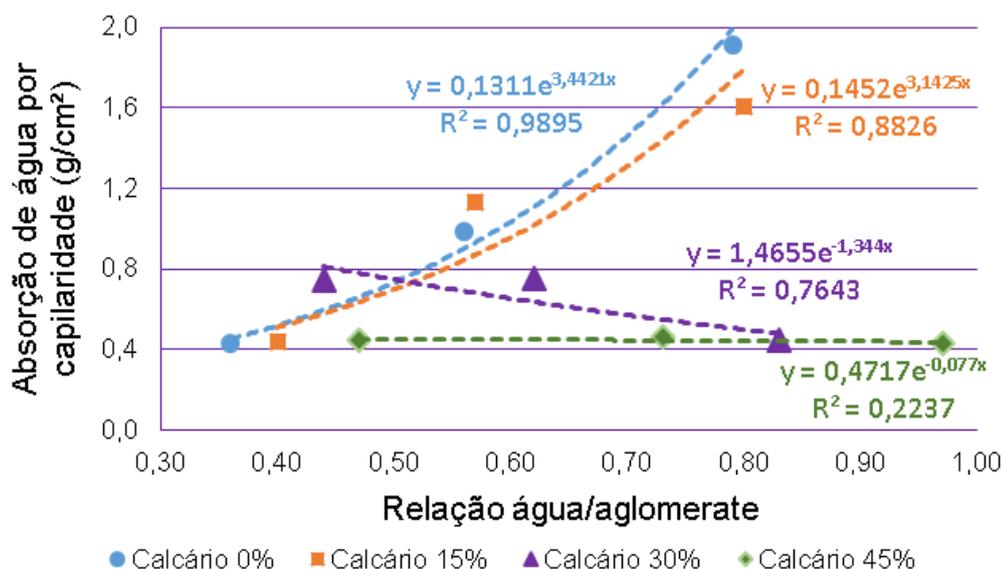


Figura 72 – Influência da relação água/ aglomerante na absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas com agregado miúdo de calcário

Analisando a Figura 73, observou-se que a substituição do agregado miúdo de ágata por pó de rolagem, também reduziu a absorção de água por capilaridade, fato que é considerado benéfico para a durabilidade das argamassas. Entretanto, notou-se que para o proporcionamento de 1:1,5 com 30% PRA, a absorção sofreu leve acréscimo.

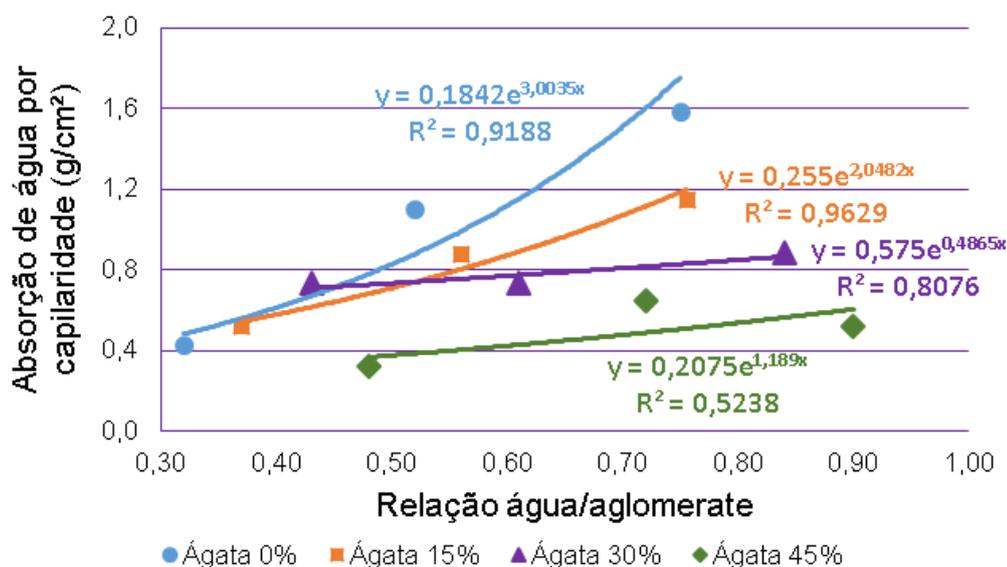


Figura 73 – Influência da relação água/ aglomerante na absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas com agregado miúdo de ágata

A Figura 74 mostra o comportamento das argamassas com os teores de substituição do agregado miúdo por pó de rolagem de ágata, em relações a/aglomerante determinadas.

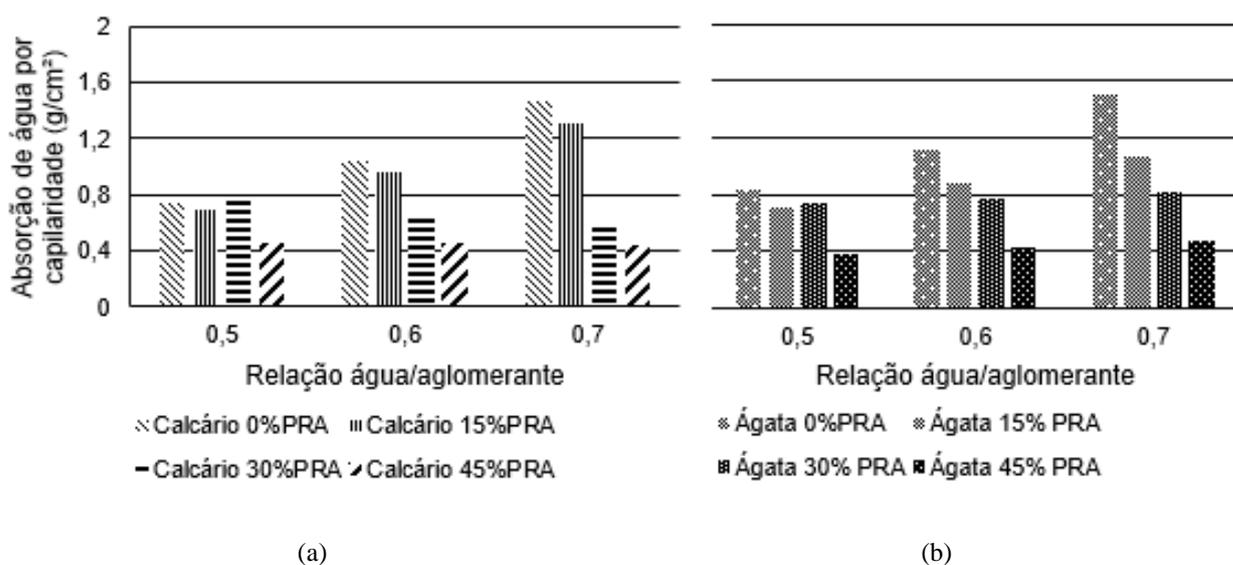


Figura 74 – Absorção de água por capilaridade em função da relação água/aglomerante: (a) argamassas com AMC; (b) argamassas com AMA.

Conforme o esperado, com o aumento da relação água/aglomerante a absorção de água por capilaridade foi sendo acrescida, para os dois tipos de agregado analisados.

De um modo geral, para os dois agregados miúdos, a substituição por pó de rolagem de ágata foi satisfatória, pois incidiu na redução da absorção de água das misturas.

Para as argamassas produzidas com o AMC, a maior redução de absorção aconteceu para a relação água/aglomerante de 0,70, onde a diminuição chegou a 231%, quando se compararam as argamassas com o teor de 0% PRA com as que continham o teor de 45% PRA. Para este mesmo agregado, também observou-se uma redução importante para a a/aglom. de 0,60, onde se obteve uma redução de 69,77%, quando comparadas argamassas com 0% PRA e 45% PRA.

Já para as argamassas com o AMA, para a uma mesma relação a/aglom. de 0,70, houve uma redução de 219% na absorção, se comparada as argamassas com a substituição nos teores de 0% PRA e 45% PRA. Observou-se também uma redução importante para a relação 0,60 (água/aglomerante), onde a diminuição da absorção foi de 164,28%, quando se realizou a comparação das argamassas com a substituição nos teores de 0% PRA e 45% PRA.

Essa redução na absorção de água por capilaridade pode estar atrelada à melhora no empacotamento das argamassas e no efeito fíler proporcionado pelo pó de rolagem de ágata, como já mencionado anteriormente, que apresenta elevada quantidade de finos ($< 150\mu\text{m}$).

No estudo de Arnold (2011) também observou-se um comportamento similar, embora a autora tenha utilizado fíler oriundo da britagem da areia basáltica. A medida que o teor deste material era acrescido nas misturas, a absorção de água era reduzida.

Não se pode esquecer que a durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim está relacionada com o desempenho dos mesmos sob determinadas condições de exposição (POSSAN, 2010).

5.2.6 Reação álcali-agregado

A fim de avaliar a potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-agregado, realizou-se o ensaio acelerado das barras de argamassa com o agregado miúdo de ágata e o agregado miúdo de calcário e diferentes teores de pó de rolagem de ágata.

Na Figura 75 é apresentada a evolução, ao longo do tempo, das expansões das barras de argamassa com os agregados miúdos de calcário e ágata, quando ensaiados de acordo com a Parte 4 da NBR 15577, ou seja, empregando-se o cimento padrão, fornecido pela ABCP.

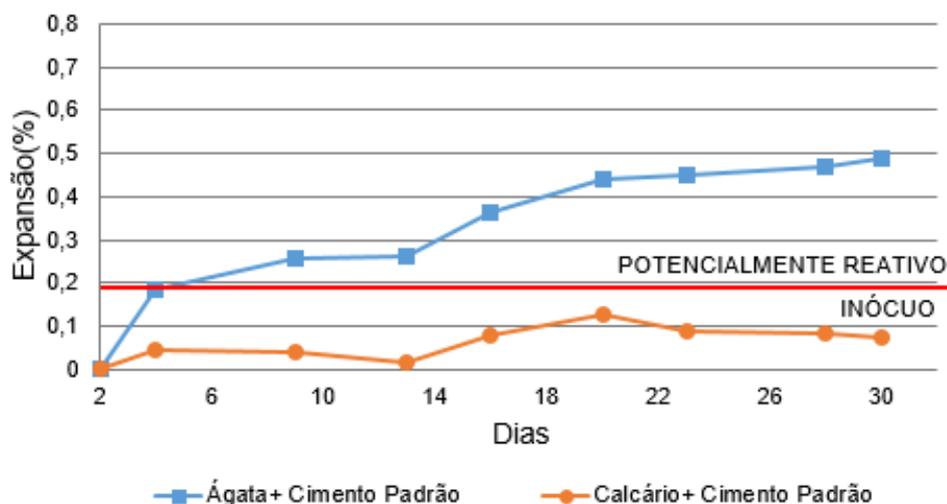


Figura 75 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, agregado miúdo de calcário e cimento padrão

A Figura 75 mostrou que empregando o cimento padrão, fornecido pela ABCP, o agregado miúdo de ágata apresenta comportamento considerado potencialmente reativo, com uma expansão de 0,48% aos 30 dias, enquanto que o agregado miúdo de calcário com este cimento não foi considerado reativo.

Os resultados obtidos neste ensaio comprovaram o que era esperado, balisando teoricamente a composição química dos agregados, ressaltando a importância de não ser possível a utilização do AMA de forma isolada.

Continuando, como o foco do presente trabalho foi também a análise da influência do pó de rolagem de ágata substituindo parte dos agregados miúdos, foram ensaiadas argamassas com o AMA e os respectivos teores de substituição de 0%, 15%, 30% e 45% PRA, com o cimento padrão da ABCP, conforme demonstrado na Figura 76.

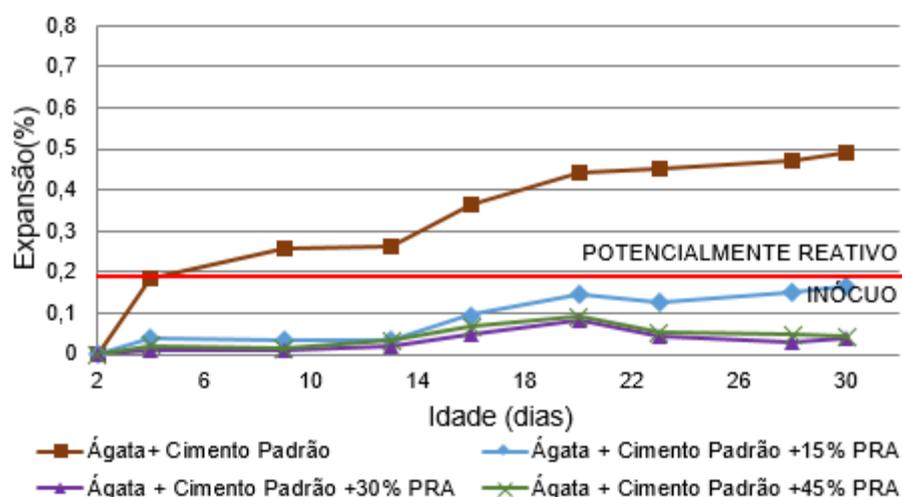


Figura 76 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, teores de pó de rolagem de ágata e cimento padrão

Analisando a Figura 76, percebeu-se que as argamassas com o agregado miúdo de ágata e o pó de rolagem de ágata, nos teores de 15%, 30% e 45%, são consideradas inócuas, logo não provocariam a reação álcali-agregado.

Esse resultado não era esperado, pois acreditava-se que com a substituição do agregado miúdo de ágata por PRA, a reação fosse ser maior, visto que estava-se substituindo um agregado por um material com uma área superficial maior. Esta redução ocorrida na expansão é uma característica típica do uso de materiais pozolânicos. Entretanto o PRA não apresenta índice de pozolanicidade, conforme observado anteriormente.

A Figura 77 demonstra o comportamento do agregado miúdo de calcário, e a substituição deste pelo teor de 45% de PRA, utilizando o cimento padrão/ABCP.

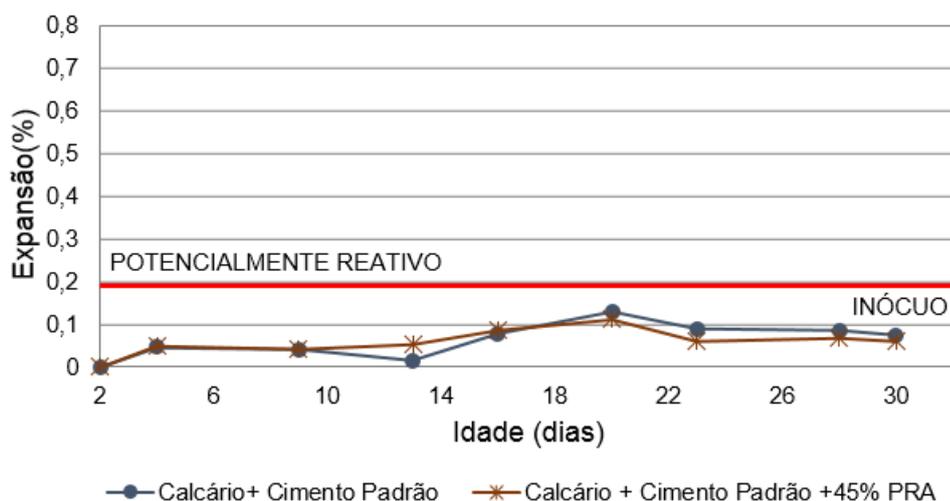


Figura 77 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de calcário, cimento padrão da ABCP

Ao analisar a Figura 77, notou-se que o agregado miúdo de calcário com este cimento não foi considerado reativo e que mesmo teores elevados de substituição, como o de 45% de PRA não influenciou na expansão das barras em argamassa.

Já a Figura 78 apresenta o comportamento das argamassas ao longo do tempo, quando moldadas com agregado miúdo de ágata, teores de substituição de pó de rolagem de ágata de 0%, 15%, 30 e 45% e cimento Portland branco.

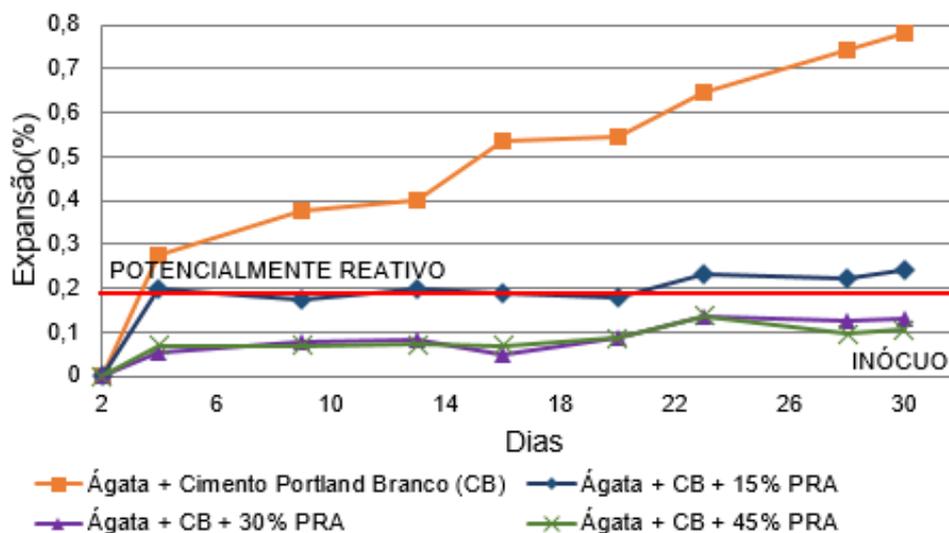


Figura 78 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de ágata, teores de pó de rolagem de ágata e cimento Portland branco

Analisando a figura acima, percebeu-se que em misturas com cimento Portland branco o agregado miúdo de ágata pode ser considerado um agregado reativo de grau 3, o que exigiria uma forte medida de mitigação para que o mesmo fosse utilizado sem restrições. Esta reatividade do agregado miúdo de ágata também foi verificada no estudo de Dal Bello et al. (2013), entretanto, no estudo de Chiaro et al. (2013) o agregado miúdo de ágata com cimento Portland branco, foi considerado como reativo de grau 1. O que pode estar causando essa diferença entre os ensaios realizados é o lote de cimento Portland branco utilizado, visto que o teor de álcalis presentes nos cimento pode ter variado, a fim de que o cimento Portland branco utilizado é bem mais fino que o cimento padrão da ABCP, logo o CBP por este motivo é mais reativo e também devido ao tipo de moagem utilizado para o fracionamento do agregado, o que influenciariam de forma direta o resultado. Outro ponto que pode ter contribuído para essa diferença quanto ao grau de reatividade com o trabalho de Chiaro et al. (2013), é o fato das argamassas apresentarem granulometrias diferentes, visto que no trabalho destas autoras, a argamassa com AMA foi dosada a partir da recomendação da norma quanto as frações granulométrica, e o presente trabalho utilizou o agregado miúdo de ágata sem nenhum tipo de peneiramento, sendo que este foi utilizado sem beneficiamento. Ainda, observou-se na Figura 78 que a substituição do agregado miúdo de ágata por pó de rolagem de ágata provoca uma redução nas expansões, funcionando como uma medida de mitigação da reação e/ou inibindo a seu aparecimento. Andriolo (1997) verificou um comportamento similar em misturas com areia artificial de basalto e o uso de fíler de pó de pedra em teores de 0%, 5%, 10%, 20% e 40%, onde quanto maior a quantidade de teor de

finos incorporados menor era a expansão provocada pela reação. Andriolo (2006) cita trabalhos que analisaram a utilização de material pulverulento de agregado miúdo reativo como minimizador das reações expansivas. Ainda de acordo com este autor a utilização de finos (ou fillers), produzidos a partir dos próprios agregados reativos, funciona como “uma vacina” para a inibição das reações expansivas. Desta maneira se faz necessário uma maior investigação para que se possa determinar o que realmente está acontecendo com as argamassas em estudo.

Já na Figura 79, analisou-se a substituição do agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata conjuntamente com o cimento Portland branco, entretanto para este agregado miúdo optou-se por analisar apenas o teor máximo de substituição, visto que se esperava que este, por apresentar a maior quantidade de quartzo, seria a pior situação.

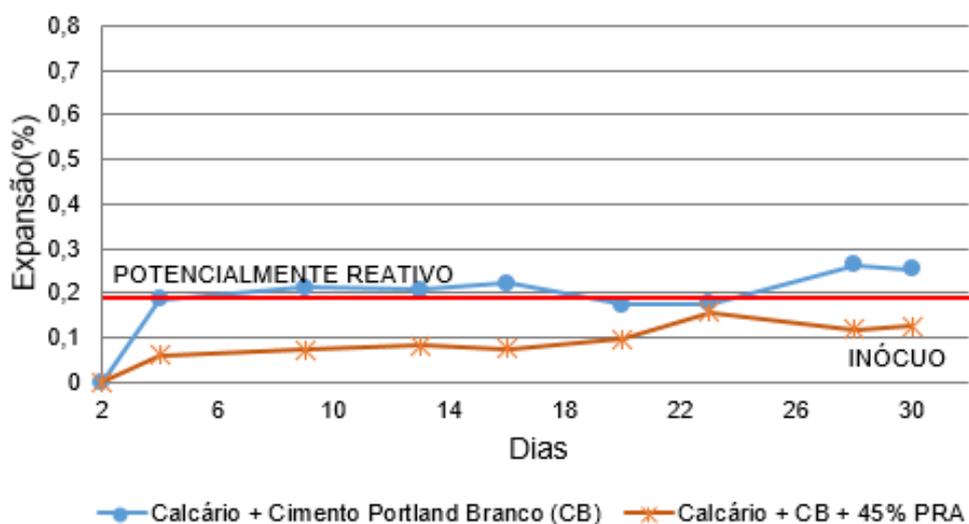


Figura 79 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo de calcário, teor de 45% de pó de rolagem de ágata e cimento Portland branco

Na Figura 79, percebeu-se que agregado miúdo de calcário apresentou uma expansão de 0,25%, ou seja, apresentou potencial de desenvolvimento da reação álcali-agregado. Este é coerente com o estudo realizado por Tiecher et al. (2008), onde as autoras investigaram o desencadeamento da reação álcali-sílica/silicato em rochas carbonáticas, sendo que estas selecionaram uma rocha de origem calcária (calcário dolomítico). Na realização da difração de raio-x, as autoras perceberam a existência de quartzo na matriz da rocha, deste modo quando submetido ao ensaio acelerado de argamassa, mostram a reatividade deste material. Resultados de caracterização similares ao das autoras foram obtidos nesta pesquisa. Entretanto, deve se ressaltar que o agregado miúdo de calcário também deve ser avaliado em relação à potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-carbonato.

Foi possível observar ainda que a substituição por PRA foi benéfica, visto a não ocorrência de expansão provocada para esta combinação.

Como se esperava, que o pó de rolagem de ágata pudesse apresentar reatividade, para avaliar o potencial optou-se pela análise das argamassas no teor de 30%, visto ser este o teor considerado ideal para substituição parcial do agregado miúdo de ágata, a partir da máxima massa unitária, realizada no estudo exploratório deste trabalho. Para esta avaliação o PRA foi ensaiado conjuntamente com o agregado miúdo do IPT, considerado um agregado inócuo, conforme ilustra a Figura 80, pode notar que a partir do 16 dias de ensaio ocorre uma estabilização na expansão. Observa-se também, que tanto para o cimento Portland branco quanto para o cimento padrão da ABCP, o pó de rolagem de ágata apresentou-se como um agregado inócuo. E a areia do IPT, quando ensaiada com os dois cimentos, apresenta uma leve reatividade, provavelmente provocada pelo próprio ensaio, visto ser este um meio muito agressivo, devido a concentração da solução utilizada.

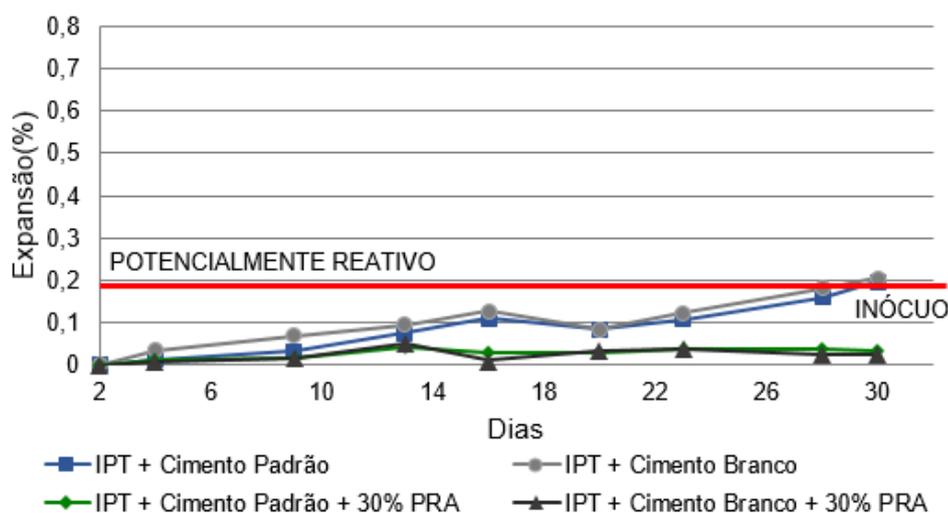


Figura 80 – Expansões ao longo do tempo das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo do IPT, teor de 30% de PRA, cimento Portland branco e cimento da ABCP

Diante do observado, o pó de rolagem de ágata se mostrou benéfico em praticamente todas as combinações realizadas, mitigando a reação álcali-agregado. Este efeito ocasionado pelo PRA é semelhante ao provocado pelo uso de material pozolânico. No estudo de Chiaro et. al. (2013), Petry e Kirchheim (2012) e Dal Bello (2013), que estudaram a reatividade do agregado miúdo de ágata combinado com o uso de sílica ativa, esta combinação apresentou comportamentos similar. Entretanto o PRA, pelas normas vigentes não apresenta índice de pozolanicidade, sendo necessário a realização de estudos complementares para avaliar, se a

reação química provocada pelo pó de rolagem de ágata é mais lenta que as pozolanas tradicionalmente utilizadas.

5.2.7 MEV – Microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários

As análises de microscopia eletrônica com elétrons secundários possibilitam verificar a morfologia da matriz cimentícia. Para a realização destes ensaios, escolheu-se o traço 1:4,5 com 0% e 45% de substituição de pó de rolagem de ágata, para os dois agregados miúdos estudados (calcário e ágata) visto que esta combinação foi a que apresentou um dos melhores comportamentos, tanto nos ensaios de resistência mecânica, como nos ensaios de durabilidade. Para todas as amostras foram coletadas pelo imagens de dois pontos distintos.

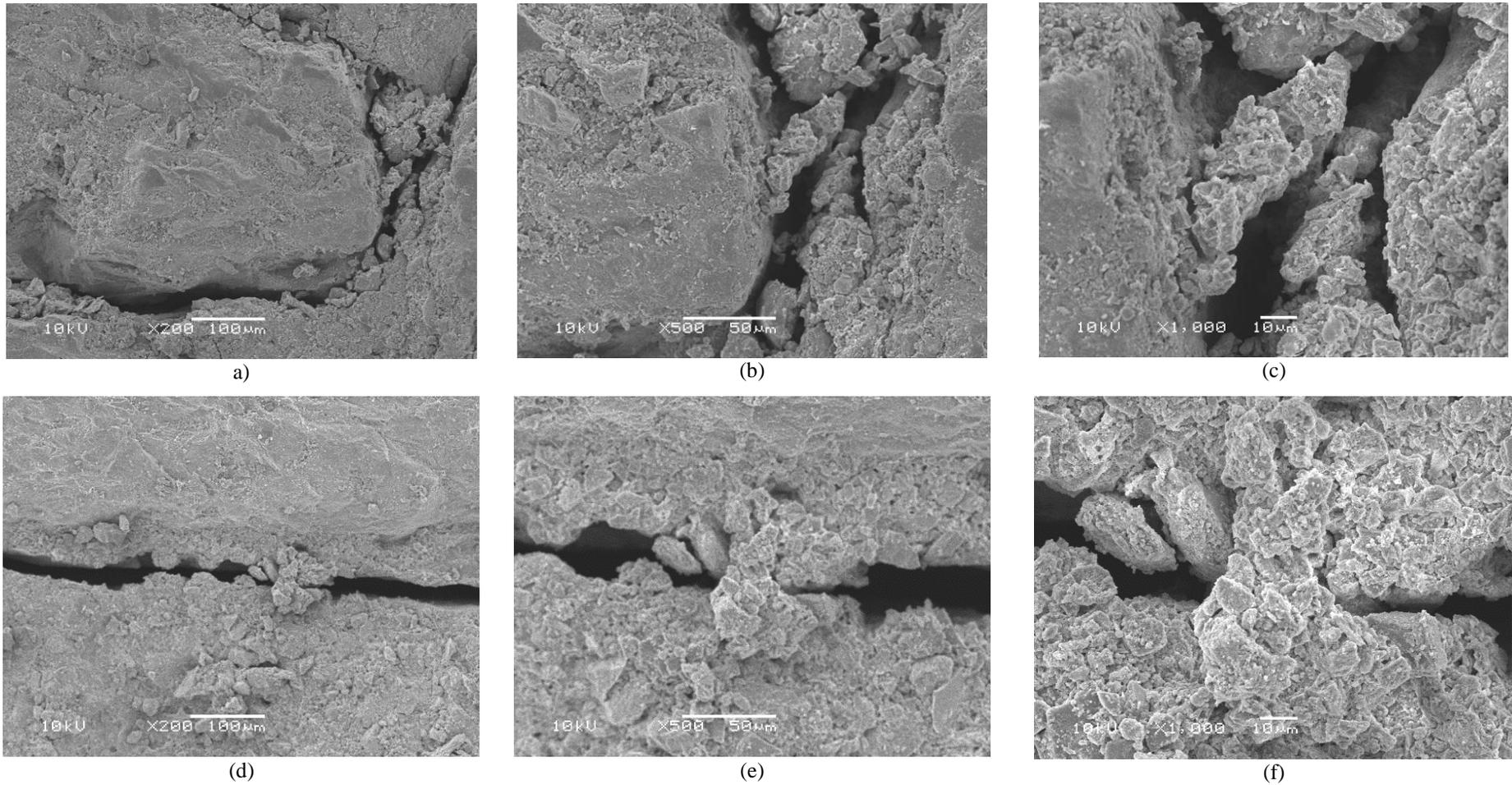


Figura 81 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa com traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 0% de Pó de rolagem de ágata: (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x

A Figura 81a-c refere-se a imagens coletadas do mesmo ponto, sendo que a Figura 81a apresenta um aumento de 200x e é possível observar um grão de agregado miúdo de ágata e os vazios da zona de transição que o circundam. Já a Figura 81b apresenta um aumento de 500x, possibilitando ver melhor a zona de transição entre o agregado miúdo e a pasta de cimento e a Figura 81c apresenta um aumento de 1000x, onde fica claro a falta de aderência entre o agregado e a pasta. A Figura 81d-f refere-se a imagens coletadas de um mesmo ponto, sendo que nestas imagens fica mais claro a falta na zona de transição entre os agregados miúdos.

A Figura 82a apresenta um aumento de 200x, onde se observou um grão de agregado miúdo de ágata, os vazios que o circundam e a deposição do pó de rolagem de ágata. Já a Figura 82b apresenta um aumento de 500x, possibilitando ver a densificação formada sobre o agregado e a Figura 82c apresenta um aumento de 1000x, e nesta imagem é possível perceber que o agregado miúdo de ágata é completamente liso. A Figura 82 d-f refere-se a imagens coletadas de um outro ponto.

Quando se substitui parte do AMA por PRA, é nítida a melhora na matriz, embora ainda tenham ficado muitos vazios. Esta melhora na densificação na zona de transição refletiu nas propriedades mecânicas e de durabilidade, visto que com a utilização do PRA, obtiveram-se argamassas com maiores resistências e menor absorção de água.

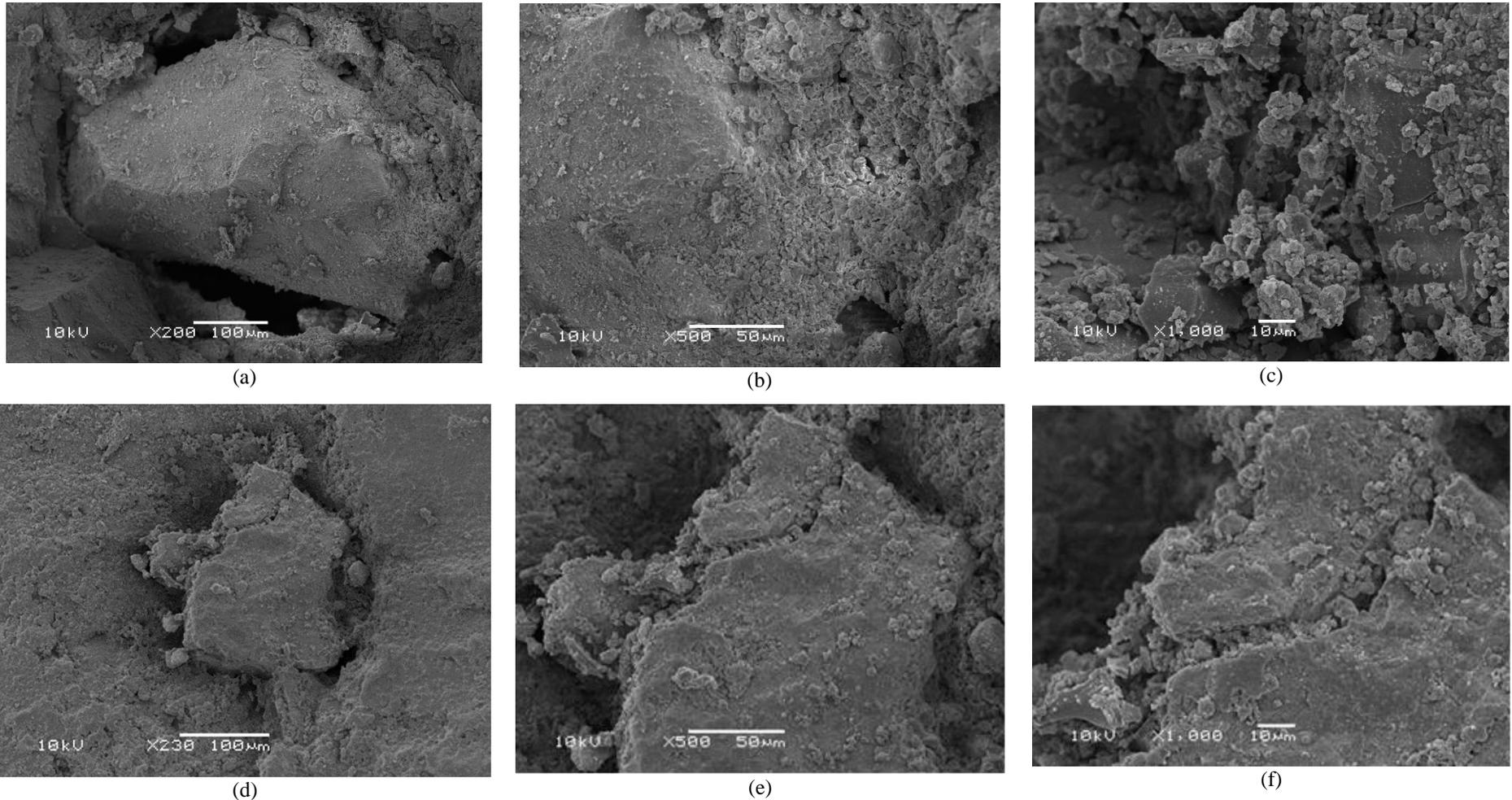


Figura 82 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 30% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x.

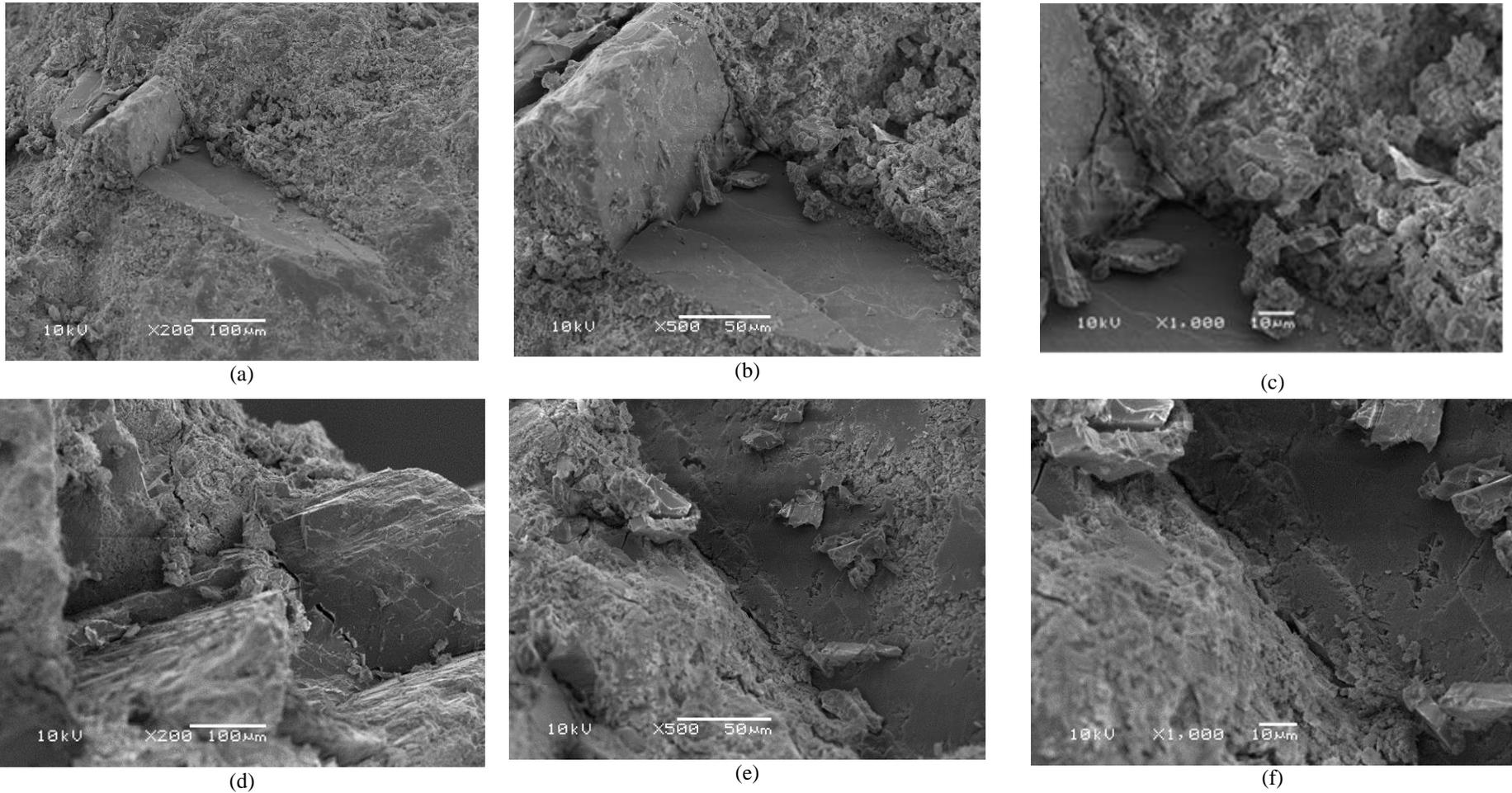


Figura 83 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de calcário e 0% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x.

A Figura 83a apresenta um aumento de 200x, onde é possível observar uma parte do agregado miúdo de calcário e os vazios que o circundam. A Figura 83b apresenta um aumento de 500x, onde pode-se observar a pasta sobre o agregado e a Figura 83c apresenta um aumento de 1000x, onde nota-se a existências de vazios na zona de transição entre o agregado e a pasta. A Figura 83 d-f, refere-se a imagens coletados de um segundo ponto da amostra, com os mesmos aumentos da anterior.

Comparando as imagens das argamassa produzida com AMA, com as que utilizaram AMC apresentam bem menos vazios na zona de transição. Isso pode ser decorrência do formato do grão do AMC que é menos lamelar que o AMA.

A Figura 84a apresenta um aumento de 200x , onde é possível observar grãos de agregado miúdo de calcário, os vazios que o circundam e a deposição do pó de rolagem de ágata. Já a Figura 84b apresenta um aumento de 500x, possibilitando ver a densificação formada no entorno do agregado e a Figura 84c apresenta um aumento de 1000x, onde fica mais nítido a deposição do PRA. A Figura 84d-f referem-se a outro ponto de análise na amostra.

Quando se substitui parte do AMC por PRA, há melhora na matriz, percebe-se uma densificação na zona de transição, que refletiu nas propriedades mecânicas e de durabilidade, visto que com a utilização do PRA, obteve-se argamassas com maiores resistências e menor absorção de água.

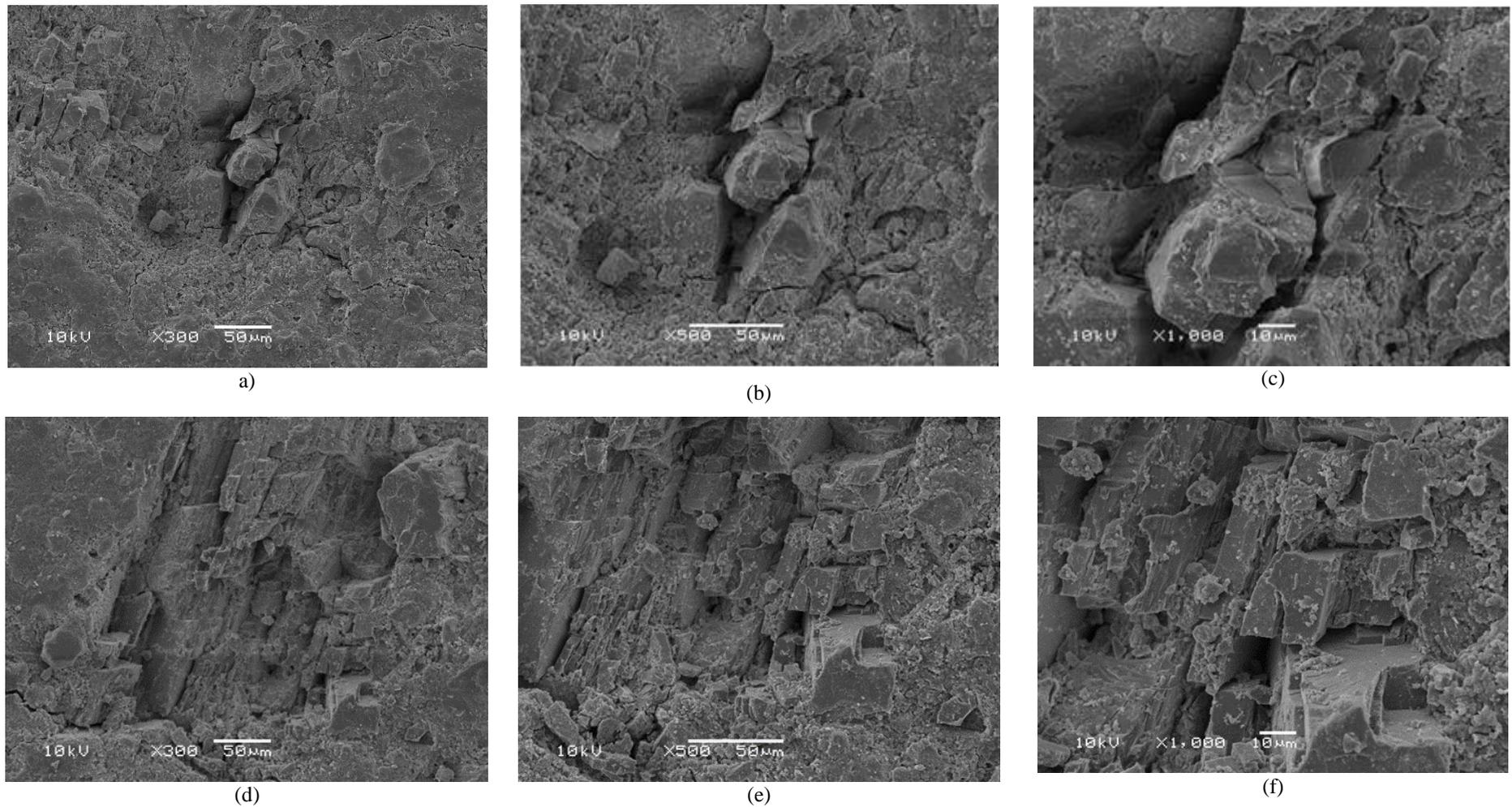


Figura 84 – Imagem de MEV através de elétrons secundários da argamassa no traço 1:4,5 com agregado miúdo de ágata e 30% de Pó de rolagem de ágata: Ponto 1 (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500; (c) aumento de 1000x; Ponto 2 (d) aumento de 200x; (e) aumento de 500; (f) aumento de 1000x.

5.2.8 Considerações gerais do capítulo

Para simplificar a análise dos dados das argamassas no estado endurecido, todos os resultados foram reunidos na Tabela 32.

Tabela 32 – Resumo dos resultados estimados das argamassas ensaios no estado endurecido estimados

AGREGADO	TRAÇO	% PRA	a/c	ESTADO ENDURECIDO				
				Resistência compressão (MPa)	Res. tração compressão diametral (MPa)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Módulo de elast. (GPa)	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)
CALCÁRIO	1:1,5	0	0,50	46,28	4,4025	2217,64	39,68	0,73
	1:1,5	15		47,90	4,6104	2133,57	31,94	0,69
	1:1,5	30		48,25	4,2676	2025,25	22,49	0,74
	1:1,5	45		54,18	4,4943	1987,66	28,79	0,45
	1:3	0	0,60	38,06	3,7196	2190,75	36,29	1,03
	1:3	15		39,76	4,1566	2097,07	27,24	0,95
	1:3	30		43,41	4,1989	2037,07	24,52	0,65
	1:3	45		48,02	4,2846	1981,68	28,28	0,45
	1:4,5	0	0,70	31,29	3,1421	2168,01	33,43	1,45
	1:4,5	15		33,00	3,7730	2066,21	23,25	1,31
	1:4,5	30		39,05	4,1408	2047,07	26,24	0,57
	1:4,5	45		42,56	4,1074	1976,61	27,86	0,44
ÁGATA	1:1,5	0	0,50	41,15	4,4248	2097,38	34,18	0,82
	1:1,5	15		48,11	4,9869	2059,13	33,61	0,71
	1:1,5	30		45,59	5,0133	1993,40	29,34	0,73
	1:1,5	45		47,00	4,6404	2027,56	31,83	0,37
	1:3	0	0,60	31,04	3,8035	2045,67	25,59	1,11
	1:3	15		40,91	4,4941	2027,24	29,00	0,87
	1:3	30		40,57	4,5347	1983,48	27,27	0,76
	1:3	45		41,70	4,2959	1993,19	28,87	0,42
	1:4,5	0	0,70	23,41	3,2781	2001,95	22,33	1,50
	1:4,5	15		34,78	4,0774	2000,28	27,24	1,06
	1:4,5	30		36,11	4,1301	1975,10	26,48	0,80
	1:4,5	45		37,00	4,0048	1964,13	27,75	0,47

Realizando um cruzamento de todos os resultados, pode-se concluir que a substituição dos agregados miúdos de calcário e ágata por pó de rolagem de ágata se mostrou benéfica para estes traços de argamassa, de um modo geral.

Para o agregado miúdo de calcário, a substituição por PRA auxiliou no acréscimo da resistência à compressão e da resistência à tração na compressão diametral, porém reduziu a densidade de massa aparente das argamassas em função da diferença da massa específica dos materiais. Também reduziu o módulo de elasticidade dinâmico, bem como a absorção de

água por capilaridade. Estes mesmos comportamentos foram identificados para as misturas com o agregado miúdo de ágata com a substituição por pó de rolagem de ágata.

Estabelecendo uma comparação entre os dois tipos de agregado, foi possível observar que as argamassas produzidas com o agregado miúdo de ágata apresentaram uma resistência à compressão e resistência à tração na compressão diametral menores do que as das argamassas produzidas com calcário. Este comportamento pode ser explicado principalmente pelo fato de o calcário apresentar uma forma mais cúbica e superfície mais rugosa, o que possibilita uma melhor aderência entre os grãos de agregados e a pasta de cimento. Outro fato que foi observado foi que as argamassas com AMA apresentaram densidade de massa aparente e módulo de elasticidade menor quando comparadas com as argamassas com AMC. Quanto à absorção de água por capilaridade, fator relacionado com a durabilidade das matrizes cimentícias, as argamassas que apresentaram maior resistência, foram as que tiveram menor índice de absorção de água, com exceção do traço 1:1,5 com 30% PRA e 45% PRA e o traço 1:4,5 com 45% PRA. Finalizando pode-se observar que absorção de água foi a propriedade mais beneficiada com a substituição por pó de rolagem de ágata nas argamassas estudadas.

Ainda, quanto as questões de durabilidade, observou que o AMA é considerado potencialmente reativo, e que o uso dos teores de substituição dos agregados miúdo por pó de rolagem de ágata é benéfico, visto que estas argamassas com o PRA foram consideradas potencialmente inócuas. Entretanto são necessários outros estudos para comprovar a eficiência do PRA como um agente mitigador da reação álcali-agregado.

Diante de todos os resultados obtidos com a substituição dos agregados miúdos por pó de rolagem de ágata, embora os ensaios de índice de pozolanicidade não tenham classificado o material como pozolânico, o comportamento que este proporcionou nas argamassas, pode ser comparado a resultados obtidos com o uso de um material pozolânico de baixa reatividade. Uma vez que se obteve um incremento na resistência à compressão axial quanto na resistência à tração por compressão diametral, redução da densidade de massa aparente, redução do módulo de elasticidade dinâmico, redução significativa na absorção e principalmente na mitigação da reação álcali-agregado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com o meio ambiente e os impactos ambientais provocados pelo setor da construção civil servem de incentivo para a busca de materiais alternativos para serem empregados no lugar de matérias-primas naturais, deste modo o uso de resíduos passa a ser um grande atrativo para suprir a demanda do setor.

Esta pesquisa teve por objetivo analisar a influência dos agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento Portland branco, produzidas com agregado miúdo de calcário e agregados de ágata quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade. Para tal produziram-se argamassas em três traços, 1:1.5, 1:3, 1:4.5, com quatro teores de substituição dos agregado miúdos por pó de rolagem de ágata, 0%, 15%, 30% e 45%.

Para se alcançar os objetivos foram realizadas análises no estado fresco, que contemplou o índice de consistência e *squeeze flow*, e no estado endurecido, onde foram avaliadas as propriedades mecânicas destas argamassas, através da realização dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, e de durabilidade, foram avaliando a absorção de água por capilaridade, coeficiente de absorção e reação álcali-agregado.

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas ao final desta pesquisa, ressaltando-se que estas se referem aos materiais e às condições laboratoriais utilizados neste trabalho, bem como a suas quantidades de materiais utilizadas e forma de execução pré-definidas.

6.1 CONCLUSÕES

A partir do programa experimental proposto foi possível obter as seguintes conclusões:

a. as argamassas produzidas com o AMA demandaram menos água quando comparadas com as fabricadas com AMC. A substituição dos dois agregados por pó de rolagem de ágata aumentou o consumo de água;

- b.** o pó de rolagem de ágata aumentou a plasticidade das argamassas produzidas com os dois tipos de agregados estudados;
- c.** as argamassas produzidas com AMC apresentaram uma maior resistência à compressão e à tração na compressão diametral, quando comparadas às produzidas com AMA, e para os dois tipos de agregado o PRA auxiliou no incremento das resistências;
- d.** quanto à densidade de massa aparente no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico, as argamassas produzidas com o AMA apresentaram menores densidades do que as produzidas com os agregados miúdos de calcários, e para estes dois agregados a substituição por PRA também reduziu a densidade de massa;
- e.** a substituição de pó de rolagem de ágata foi benéfica para os dois agregados quanto à absorção de água por capilaridade;
- f.** o agregado miúdo de ágata pode ser considerado reativo de grau 3, enquanto que o mesmo agregado combinado com os diferentes teores de pó de rolagem, mostrou-se inócuo, mitigando a reação álcali-agregado.

6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho visou analisar a influência dos agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento Portland branco, produzidas com agregado miúdo de calcário e agregados de ágata, quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade.

No entanto, este ficou limitado às variáveis controláveis propostas, sendo que durante sua realização, alguns novos questionamentos surgiram, a partir do programa experimental proposto, podendo estes serem aplicados em temas de pesquisas futuras:

- a.** avaliar a influência do pó de rolagem de ágata quanto aos aspectos relacionados à cor das argamassas;
- b.** confirmar ou não a reatividade do agregado miúdo de ágata, frente à reação álcali-agregado, através de ensaios não acelerados e investigar o mecanismo provocado pelo PRA

que reduz a reação álcali-agregado. E realizar o ensaio acelerado conforma a granulometria sugerida pela norma;

c. avaliar a utilização dos resíduos de ágata, quando incorporados em concretos de cimento Portland branco;

d. avaliar a influência do PRA na retração, penetração de íons cloretos e carbonatação de concretos e argamassas;

e. Realizar ensaios químicos para confirmar ou não a atividade pozolânica do PRA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. G.; SILVEIRA, A. A.; MIRANDA, T.. **Pó de resíduos de ágata como adição mineral**. In V Congreso Internacional 19a Reunión Técnica 'Ing. Oscar R. Batic', 2012, Bahía Blanca. V Congreso Internacional 19a Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic". Buenos Aires: Reprografias JMA S. A. CABA, 2012. v. 01. p. 55-62.
- AÏTCIN, P. C.; MINDESS, S. **Sustainability of concrete**. Abingdon, Oxon: Spon Press, London. 2011. 301 p.: il., fots.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. v. 1. 142 p.
- American Society For Testing and Materials. **ASTM C-1260/07: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)**. Philadelphia, 2007. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).
- _____. **ASTM C-295/08: Standard for guide of aggregates for concrete**. Philadelphia, 2008. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).
- _____. **ASTM C-227/10a: Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)**. Philadelphia, 2010. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).
- ANDRIOLO, F. R. **Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcali-agregado**. In: Simpósio sobre reatividade álcali - agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. Anais... Goiânia: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1997. p. 1 –24.
- ANDRIOLO, F. R.. **Agregado deletério – Possibilidade(s) segura(s) de uso**. In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto. 2., 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006 CD-ROM.
- APOLINÁRIO, E. C. A.. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. 2014.193f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2014.
- ARNOLD, D. C. M.; **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 185fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo/RS.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989: 1993**. Cimento Portland branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7215: 1997**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 23:2001** Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 30:2003** agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR NM 65:2001**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2001b.

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

_____. **NBR 10004:2004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45: 2006**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5739: 2007**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15577- 3: 2008** Agregados – Reação Álcali-Agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008c.

_____. **NBR 15577- 4: 2008** agregados – reação álcali-agregado. Parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008c.

_____. **NBR 15577- 5: 2008**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado Rio de Janeiro, 2008c.

_____. **NBR NM 26:2009**: agregados – amostragem. Rio de Janeiro, 2009a.

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

_____. **NBR 7211:2009**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009d.

_____. **NBR 7389-1**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009e.

_____. **NBR 7389-2**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009f.

_____. **NBR 9775**: agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7222: 2012:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9779:2012** argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____.**NBR NM 18:2012:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 8802:2013** concreto endurecido — determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.. **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades.** Brasília: LEM-UnB/Sinduscon-DF, 2005.

BETAT, E. F. **Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: avaliação da resistência à compressão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação de Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais (Graduação em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Luterana do Brasil, Canoas. 2006.

BOANTEG, J. K. A.; KOMBA, J. J.; Mvelase, G. M.; **Three-dimensional laser scanning technique to and ballast shape properties.** Construction and Building Materials 43(2013) 389-398.

BRAGA, M. B. C. **Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão, Efeito de filler e pozolânico.** 2010, 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

BRAGA, M. B. C.; BRITO, J.; VEIGA, R.. **Incorporation of fine concrete aggregates in mortars.** Construction and Building Materials 36 (2012) 960–968.

BRANCO, P.; GIL, C. A. A. **Mapa gemológico do Estado do Rio Grande do Sul.** 2ª Ed. rev. atual. – Porto Alegre: CPRM: 2002.

BRANCO, P.; VIERO, A. I. N. I. **Mercado de gemas e pedras do Rio Grande do Sul.** Conselho em Revista: matérias técnicas, Porto Alegre, n. 4, p. 16-18. 2004. Disponível em: <<http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/04/index.htm>>. Acesso em: 08 jul. 2014.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 001.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> Acesso em: 01 jun. 2014.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/.../lei/112305.htm> Acesso em: 22 jan. 2014.

BRITO, J.; SAIKIA, N.. **Recycled Aggregate in Concrete,** Green Energy and Technology, DOI: 10.1007/978-1-4471-4540-0_2, Springer-Verlag London 2013

BRUXEL, F. R.; OLIVEIRA, E. C.; MULLER, C. S.; ETCHEPARE, H. D.. **Estudo da adição de resíduo (lodo) de gemas na massa cerâmica vermelha**. *Cerâmica* [online]. 2012, vol.58, n.346, pp. 211-215. ISSN 0366-6913.

CAPPELLESSO, V. G. ; DAL BELLO, A. C. ; PETRY, N. S. ; Kirchheim, A. P. . **Influência do tipo de britador na produção de agregado miúdo de ágata**. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2013, Passo Fundo. Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Passo Fundo: UPF, 2013.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação**. 1996. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

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. International Symposium on Mortars Technology, 1. 2005. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005, p. 121-143.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.. **Metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 242 p

CHIARO, S. M. X.. **Reação álcali-agregado em concretos brancos com agregados miúdos reciclados de ágata**. 2012. 78 f., il. Trabalho de conclusão(graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

CHIARO, S. X. ; PETRY, N. S. ; TIECHER, F. ; MASUERO, A. B. ; DAL MOLIN, D. C. C. ; KIRCHHEIM, A. P.. **Avaliação da potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-agregado de agregados oriundos de resíduos de ágata**. In: XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013, Cartagena. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013.

CHUNG, S. S.; LO, C. W. H. **Evaluating sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 37 (2), p. 119 -145, 2003.

CIDADE, M. K.. **Caracterização e padronização do processo de gravação a laser em ágata aplicado ao design de joias**. 2012. 172 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DAL BELLO, A. C. ; CAPPELLESSO, V. G. ; PETRY, N. S.; KIRCHHEIM, A. P. . **Avaliação da utilização de agregado miúdo reciclado de ágata a partir da análise de seu potencial reativo pelo ensaio de reação álcali-agregado (RAA)**. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2013, Passo Fundo. Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Passo Fundo: UPF, 2013.

Dal Molin, D. C. C.. **Adições Minerais**. In ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, v. I-II. São Paulo, INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, 2011

DAMTOFT, J. S., LUKASIK, J., HERFORT, D., SORRENTINO, D., GARTNER, E. M. **Sustainable development and climate change initiative**. Cem Concr Res 2008;38(2):115–27.

FABRA, F; GAVA, G. P.; GRIOGOLI, H.B.; MENEGHETTI, L.C.; **Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Vol. 4, Nº 2 (Junho, 2011), p. 191-212. ISSN 1983-4195

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) workshops for engineers and practitioners : reference manual**. Washington, D.C.: FHWA, 2013. 107 f. : il., fots.

FONSECA, A. A. e NUNES, A. **Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural**. . In: 2a Jornadas de Estruturas de Betão, 1998. Anais... Portugal.: [s.n.], 1998.

FOWLER, D.. **The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete**. International Center for Aggregates Research 104-1F(2004) 382.

FURNAS, Equipe de.; Laboratório de Concreto; ANDRADE, W.P. (Ed.). Reatividade potencial álcali-agregado. In: **Concretos massa estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GIORDANI, C. **Viabilidade técnica do uso de resíduos do beneficiamento de arenito como substituição do agregado miúdo em argamassas**. 2014. 126 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

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

GONÇALVES, J. P.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. ; FAIRBAIRN, E. M. R.; CUNHA, E. R.. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars**. Cement and Concrete Research, v. 37, p. 924-932, 2007.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. Goiânia, 1999. 257p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HEEMANN, R.. **Modelagem Estrutural e Tridimensional para a Prospecção dos Depósitos de Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. 2005. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto.** 2012. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 212.

IPAR, C. E. A. L.. **Desenvolvimento de matéria-prima para impressão tridimensional a partir de rejeitos gemológicos de ágata.** 2011. 103f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design. PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

JIMÉNEZ, JR. AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J.. **Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing.** *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 679-690, Elsevier, acessado em 21 de janeiro de 2015 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200863X>>

JOHN, V. M., AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** In: SEMINÁRIO – RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo, **Anais eletrônicos...** São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2014.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para Desenvolvimento de Reciclagem de Resíduos. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. (Ed.). **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional.** 1. ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 8-71. v. 4.

JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M. M.; FISCHER, A. C.; LICCARDO, A.; CHODUR, N. L. **Potencial gemológico da região sul do Brasil.** In: Seminário sobre desing e gemologia de pedras, gemas e jóias do Rio Grande do Sul, 2009. Soledade. Anais Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2009. p. 1-6.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar.** 2003, 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 2003.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Concreto branco. In: 2V., 1 ed.p. 1684 – 1730. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011.

KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; **Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption.** *Construction and Building Materials*, v. 84, 2015, 320 – 330. Acessado em 27 de março de 2015 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002676?np=y#>>

LAIMER, V. R.. **Avaliação do desempenho ambiental das empresas associadas ao Sindipedras de Soledade-RS.** 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós – Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

LING, T.; POON, C.; KOU, S.. **Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars.** *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 848–854. Acessado em 10 de janeiro 2015 www.elsevier.com/locate/cemconcomp>

LING, T.; POON, C.. **Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes**. Materials and Desing 32 (2011) 2675-2684. Acessado em 10 de janeiro 2015 <www.elsevier.com/locate/cemconcomp>

MASUERO, A. B. **Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento**. 2001. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MOURA, W. A. **Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

OLHERO, S. M.; FERREIRA, J. M. F. **Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions**. In: Powder Technology, 139, 2004, p. 69–75.

PAGNOSSIN, E. M. **A atividade mineira em Ametista do Sul/RS e a incidência de silicose em garimpeiros**. Dissertação (Mestrado em Geografia - Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - UFRGS. Porto Alegre, 2004.

PETRY, N. S., KIRCHHEIM, A. P. **Reação Alkali-agregado em concreto com agregado miúdo reciclado de ágata**. In: Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação CICPG, 2012, São Leopoldo.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP**. São Paulo: obra Limpa: I&T: SindusCon-SP, 48 p. 2005. Disponível em: <http://www.gerenciamento.ufba.br/Downloads/Manual_Residuos_Solidos.pdf>. Acesso em: 25 Jun. 2014.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - 2010.

SABBAG, A. F., **Verificação da Existência de Reação Álcali-Agregado no Concreto da UHE de Mascarenhas**, Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SANVITTO, M. L. A. **Brutalismo Paulista: Uma análise compositiva de residências paulistas entre 1957 e 1972**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- SCHUMANN, W. . **Gemas do mundo**. 9. ed. ampl. atual. Traduzido por Rui Ribeiro Franco e Mario Del Rey. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 2006.
- SBRIGHI NETO, C. A Importância dos Conceitos Tecnológicos na Seleção dos Agregados para Argamassas e Concretos. **Areia & Brita**. São Paulo, n. 12, p. 26-28, out./nov./dez. 2000. Disponível em: < http://anepac.org.br/wp/pdf_revistas/Revista12.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- SBRIGHI NETO, C.. **Agregados naturais, britados e artificiais para concreto**. In ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, v. I-II. São Paulo, INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, 2011
- SILVA, J., BRITO, J., VEIGA, R. **Incorporation of fine ceramics in mortars**. Construction and Building Materials 2009;23:556–64.
- SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado em Engenharia/Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez. 2008.
- SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze-flow**. At.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 6, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005.
- SOUSA, J. G. G, LARA. **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB/Sinduscon-DF, 2005.
- STOLZ, C. M.. **ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA ÁREA DE CONTATO SUBSTRATO/ARGAMASSA DE REVESTIMENTO**. 2015, 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, No prelo 2015.
- TIECHER, F. **Reação álcali:agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006.180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo**. 2002. 213f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.
- VENQUIARUTO, S.; OSSORIO, A.; ZANINI, C.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. **Aproveitamento de Resíduos de Ágata Reciclada em Materiais Cimentícios Sustentáveis**.

In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. da; DONATO, M. (Orgs.). Tecnologia e Inovação em Gemas, Joias e Mineração. 1. ed. Porto Alegre: IGeo/UFRGS, 2014. p. 99-106.

**APÊNDICE 01 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO**

Resistência à compressão dos corpos de prova											
	Média diâmetro (cm)	Média altura (cm)	Área	kN	Rfc (Mpa) Calc.	h/d	Rfc corrigida (Mpa)	Rfc Média (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Coef. Var. (%)	a/c
ÁGATA 1:1,5 0%	50,17	99,40	19,77	120,40	60,93	1,98	60,83	64,35	2,52	3,92	0,32
	50,42	99,76	19,97	131,40	65,84	1,98	65,74				
	50,94	98,32	20,38	136,60	67,05	1,93	66,68				
	50,25	100,13	19,83	124,10	62,62	1,99	62,57				
	50,05	99,53	19,67	129,80	66,01	1,99	65,96				
ÁGATA 1:3 0%	50,66	96,15	20,15	82,20	40,79	1,90	40,46	43,20	2,67	6,18	0,52
	50,28	99,05	19,86	89,80	45,22	1,97	45,11				
	51,13	99,59	20,53	96,30	46,91	1,95	46,72				
	50,20	98,65	19,79	84,60	42,75	1,97	42,65				
	50,33	98,35	19,90	82,00	41,21	1,95	41,05				
ÁGATA 1:4,5 0%	50,17	99,40	19,77	36,50	18,46	1,98	18,43	19,36	1,90	9,82	0,75
	50,10	98,12	19,72	40,80	20,69	1,96	20,63				
	51,14	97,17	20,54	34,70	16,89	1,90	16,76				
	50,13	97,39	19,74	38,40	19,45	1,94	19,36				
	50,04	98,03	19,66	42,70	21,72	1,96	21,65				
ÁGATA 1:1,5 15%	49,64	97,98	19,35	118,10	61,02	1,97	60,88	57,12	3,27	5,72	0,37
	51,27	99,27	20,65	115,30	55,84	1,94	55,57				
	50,10	99,29	19,71	113,30	57,48	1,98	57,39				
	50,11	99,68	19,72	105,40	53,45	1,99	53,41				
	50,15	99,47	19,75	115,40	58,43	1,98	58,34				
ÁGATA 1:3 15%	50,08	98,70	19,70	90,70	46,04	1,97	45,93	46,64	1,25	2,68	0,56
	50,20	98,82	19,79	93,00	46,99	1,97	46,88				
	50,09	99,39	19,70	89,30	45,32	1,98	45,25				
	50,14	97,83	19,75	96,30	48,77	1,95	48,58				
	50,11	99,47	19,72	91,90	46,61	1,99	46,57				
ÁGATA 1:4,5 15%	50,16	98,42	19,76	62,60	31,68	1,96	31,58	30,65	1,06	3,46	0,76
	50,68	99,55	20,18	61,30	30,38	1,96	30,29				
	50,13	99,39	19,74	62,10	31,46	1,98	31,41				
	50,15	100,40	19,76	57,90	29,31	2,00	29,31				
ÁGATA 1:1,5 30%	50,26	99,79	19,84	86,30	43,49	1,99	43,46	49,03	4,99	10,18	0,43
	49,66	100,28	19,37	90,80	46,88	2,02	46,95				
	50,89	99,13	20,34	103,30	50,79	1,95	50,59				
	50,18	100,18	19,78	109,00	55,11	2,00	55,11				
ÁGATA 1:3 30%	51,00	100,03	20,43	78,40	38,37	1,96	38,25	40,58	2,67	6,58	0,61
	50,10	99,42	19,71	79,60	40,38	1,98	40,32				
	50,66	100,33	20,16	79,50	39,44	1,98	39,37				
	51,14	97,42	20,54	91,90	44,74	1,90	44,38				

Resistência à compressão dos corpos de prova											
	Média diâmetro (cm)	Média altura (cm)	Área	kN	Rfc (Mpa) Calc.	h/d	Rfc corrigida (Mpa)	Rfc Média (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Coef. Var. (%)	a/c
ÁGATA 1:4,5 30%	50,36	99,17	19,92	59,80	30,02	1,97	29,95	30,52	0,66	2,15	0,84
	50,94	99,15	20,38	61,60	30,23	1,95	30,10				
	51,12	99,31	20,52	63,10	30,75	1,94	30,60				
	50,97	99,25	20,40	62,10	30,44	1,95	30,32				
	50,10	100,20	19,71	62,30	31,61	2,00	31,61				
ÁGATA 1:1,5 45%	50,93	97,62	20,37	105,00	51,55	1,92	51,59	48,34	6,27	12,96	0,48
	50,82	99,84	20,28	92,20	45,45	1,96	45,31				
	50,76	99,88	20,24	117,30	57,96	1,97	57,83				
	50,25	99,69	19,83	85,80	43,26	1,98	43,19				
	49,73	98,99	19,42	85,10	43,81	1,99	43,78				
ÁGATA 1:3 45%	50,11	98,63	19,72	71,30	36,16	1,97	36,07	35,80	1,25	3,49	0,72
	50,94	98,89	20,38	73,60	36,12	1,94	35,94				
	50,20	99,40	19,79	73,00	36,88	1,98	36,82				
	50,14	98,46	19,75	66,60	33,73	1,96	33,62				
	50,23	99,71	19,82	72,50	36,58	1,98	36,52				
ÁGATA 1:4,5 45%	50,30	99,48	19,87	62,80	31,60	1,98	31,55	29,29	1,94	6,61	0,90
	50,25	100,07	19,83	59,90	30,21	1,99	30,18				
	50,09	98,90	19,71	53,80	27,30	1,97	27,23				
	50,23	100,10	19,82	54,10	27,30	1,99	27,28				
	50,23	100,08	19,82	59,90	30,22	1,99	30,20				
CALCÁRIO 1:1,5 0%	50,27	97,72	19,84	117,60	59,26	1,94	59,21	57,66	4,69	8,13	0,36
	50,13	99,23	19,74	106,70	54,06	1,98	53,97				
	50,62	99,47	20,12	124,30	61,77	1,97	61,62				
	50,37	98,16	19,93	103,30	51,83	1,95	51,63				
	51,04	97,59	20,46	127,50	62,31	1,91	61,86				
CALCÁRIO 1:3 0%	50,30	96,60	19,87	88,81	44,69	1,92	44,19	45,57	1,57	3,45	0,56
	50,33	98,51	19,89	90,00	45,24	1,96	45,10				
	50,08	98,28	19,70	91,10	46,25	1,96	46,11				
	50,36	94,08	19,92	96,60	48,49	1,87	47,99				
	50,20	95,24	19,79	88,70	44,82	1,90	44,46				
CALCÁRIO 1:4,5 0%	50,25	95,78	19,83	50,20	25,31	1,91	25,13	25,14	1,95	7,74	0,79
	50,86	96,88	20,32	45,20	22,25	1,90	22,07				
	50,30	97,66	19,87	52,20	26,27	1,94	26,14				
	50,19	98,36	19,78	54,40	27,50	1,96	27,41				
	50,13	98,30	19,73	49,40	25,03	1,96	24,95				
CALCÁRIO 1:1,5 15%	50,15	98,32	19,75	127,30	64,45	1,96	64,24	56,57	4,39	7,76	0,40
	51,08	99,02	20,49	117,70	57,44	1,94	57,16				
	50,87	99,36	20,33	104,10	51,21	1,95	51,01				
	51,31	99,20	20,68	117,70	56,91	1,93	56,60				
	50,31	97,63	19,88	107,60	54,13	1,94	53,87				

Resistência à compressão dos corpos de prova											
	Média diâmetro (cm)	Média altura (cm)	Área	kN	Rfc (Mpa) Calc.	h/d	Rfc corrigida (Mpa)	Rfc Média (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Coef. Var. (%)	a/c
CALCÁRIO 1:3 15%	49,58	99,70	19,30	88,70	45,95	2,01	45,99	43,01	1,60	3,72	0,57
	51,09	96,68	20,50	86,60	42,24	1,89	41,87				
	50,09	99,29	19,71	82,00	41,61	1,98	41,55				
	50,09	99,30	19,71	80,90	41,05	1,98	40,98				
	50,16	99,62	19,76	88,30	44,68	1,99	44,65				
CALCÁRIO 1:4,5 15%	50,19	99,30	19,78	50,50	25,53	1,98	25,49	26,98	1,18	4,36	0,80
	50,15	99,38	19,75	55,80	28,25	1,98	28,21				
	50,75	99,28	20,23	54,00	26,69	1,96	26,61				
	50,95	99,84	20,39	56,20	27,56	1,96	27,47				
	49,57	99,41	19,30	52,30	27,10	2,01	27,12				
CALCÁRIO 1:1,5 30%	50,88	98,89	20,33	88,80	43,67	1,94	43,46	51,78	4,98	9,62	0,44
	50,98	97,12	20,41	100,40	49,19	1,91	48,84				
	50,29	98,91	19,86	107,60	54,18	1,97	54,05				
	50,14	98,17	19,75	106,80	54,09	1,96	53,92				
	49,68	99,68	19,38	113,60	58,60	2,01	58,65				
CALCÁRIO 1:3 30%	50,21	99,35	19,80	89,30	45,11	1,98	45,03	41,88	3,37	8,06	0,62
	50,22	96,84	19,81	85,60	43,21	1,93	43,21				
	50,21	97,75	19,80	74,90	37,83	1,95	37,68				
	50,29	99,57	19,87	89,00	44,80	1,98	44,73				
	50,11	98,01	19,72	76,60	38,85	1,96	38,72				
CALCÁRIO 1:4,5 30%	50,17	98,53	19,77	67,90	34,35	1,96	34,24	34,25	1,21	3,54	0,83
	50,33	99,25	19,90	71,30	35,83	1,97	35,75				
	50,90	99,09	20,35	69,60	34,20	1,95	34,06				
	50,25	99,15	19,83	69,50	35,05	1,97	34,97				
	50,18	93,63	19,77	64,40	32,57	1,87	32,23				
CALCÁRIO 1:1,5 45%	50,92	99,12	20,36	120,40	59,13	1,95	58,89	57,46	2,77	4,82	0,47
	50,66	98,71	20,16	113,20	56,15	1,95	55,93				
	50,89	97,96	20,34	120,00	59,00	1,92	58,62				
	50,87	97,18	20,32	109,20	53,74	1,91	53,35				
	50,29	98,85	19,86	120,50	60,67	1,97	60,53				
CALCÁRIO 1:3 45%	50,28	98,86	19,86	83,20	41,90	1,97	41,80	39,09	2,86	7,33	0,73
	51,08	96,54	20,50	76,40	37,28	1,89	36,95				
	50,11	99,74	19,72	82,80	41,99	1,99	41,96				
	50,07	98,61	19,69	77,90	39,56	1,97	39,47				
	50,94	98,41	20,38	72,30	35,47	1,93	35,27				
CALCÁRIO 1:4,5 45%	50,27	98,67	19,85	59,80	30,13	1,96	30,03	31,54	1,18	3,74	0,97
	50,11	98,04	19,72	63,80	32,35	1,96	32,25				
	51,11	97,07	20,52	62,90	30,66	1,90	30,41				
	50,07	98,48	19,69	64,60	32,81	1,97	32,73				
	50,23	99,92	19,82	64,00	32,30	1,99	32,27				

**APÊNDICE 02 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias								
	Média diâmetro (mm)	Média altura (m)	Rtc (KN)	Rtc (N)	Rtc (Mpa)	Média Rtc (Mpa)	DP	Coef. Var. (%)
ÁGATA 1:1,5 0%	50,47	100,47	38,80	38800,00	4,87	5,73	0,81	14,20
	51,08	101,39	52,80	52800,00	6,49			
	51,13	101,38	47,50	47500,00	5,84			
ÁGATA 1:3 0%	50,30	100,55	35,90	35900,00	4,52	4,75	0,32	6,78
	49,68	100,22	38,90	38900,00	4,98			
ÁGATA 1:4,5 0%	50,10	100,30	22,40	22400,00	2,84	2,78	0,08	2,97
	50,11	99,84	21,10	21100,00	2,69			
	50,07	100,26	22,20	22200,00	2,82			
ÁGATA 1:1,5 15%	50,13	101,05	44,50	44500,00	5,60	5,79	0,28	4,82
	50,07	101,52	47,80	47800,00	5,99			
ÁGATA 1:3 15%	50,14	100,61	41,70	41700,00	5,26	4,65	0,69	14,83
	50,24	100,18	37,70	37700,00	4,77			
	50,15	99,89	30,70	30700,00	3,90			
ÁGATA 1:4,5 15	50,72	101,06	33,40	33400,00	4,15	3,88	0,62	16,09
	50,17	101,80	25,40	25400,00	3,17			
	50,14	101,00	34,40	34400,00	4,33			
ÁGATA 1:1,5 30%	50,49	101,12	43,90	43900,00	5,48	5,31	0,33	6,28
	50,22	101,61	39,50	39500,00	4,93			
	50,16	102,32	44,60	44600,00	5,54			
ÁGATA 1:3 30%	51,06	102,26	38,90	38900,00	4,75	4,67	0,09	1,96
	50,39	102,34	38,00	38000,00	4,69			
	50,23	101,90	36,70	36700,00	4,57			
ÁGATA 1:4,5 30%	50,11	98,25	26,10	26100,00	3,38	3,56	0,18	5,04
	49,60	99,35	28,90	28900,00	3,74			
	50,21	97,52	27,40	27400,00	3,56			
ÁGATA 1:1,5 45%	49,54	100,62	34,10	34100,00	4,36	4,80	0,52	10,80
	50,96	100,06	43,00	43000,00	5,37			
	50,83	98,87	36,90	36900,00	4,68			
ÁGATA 1:3 45%	50,96	98,30	28,60	28600,00	3,64	3,71	0,17	4,71
	50,34	98,56	30,50	30500,00	3,92			
	50,88	100,34	28,80	28800,00	3,59			
ÁGATA 1:4,5 45%	50,28	98,58	28,50	28500,00	3,66	3,68	0,13	3,54
	50,17	98,98	29,80	29800,00	3,82			
	50,12	100,20	28,10	28100,00	3,56			
CALCÁRIO 1:1,5 0%	49,98	100,70	40,70	40700,00	5,15	5,70	0,89	15,63
	50,08	101,32	41,60	41600,00	5,22			
	50,43	100,60	53,60	53600,00	6,73			

Resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias								
	Média diâmetro (mm)	Média altura (m)	Rtc (KN)	Rtc (N)	Rtc (Mpa)	Média Rtc (Mpa)	DP	Coef. Var. (%)
CALCÁRIO 1:3 0%	50,21	100,32	29,40	29400,00	3,72	3,82	0,12	3,27
	50,64	94,34	28,40	28400,00	3,79			
	49,51	99,42	30,60	30600,00	3,96			
CALCÁRIO 1:4,5 0%	50,30	99,31	23,80	23800,00	3,03	2,79	0,29	10,55
	50,18	99,96	22,60	22600,00	2,87			
	50,88	99,63	19,60	19600,00	2,46			
CALCÁRIO 1:1,5 15%	50,32	100,57	41,80	41800,00	5,26	5,25	0,94	17,81
	50,21	101,28	49,40	49400,00	6,19			
	50,07	100,50	34,10	34100,00	4,32			
CALCÁRIO 1:3 15%	50,16	101,13	34,80	34800,00	4,37	4,06	0,30	7,46
	50,46	101,04	32,50	32500,00	4,06			
	50,87	100,48	30,20	30200,00	3,76			
CALCÁRIO 1:4,5 15%	50,37	100,89	30,00	30000,00	3,76	3,54	0,33	9,21
	50,86	101,26	29,90	29900,00	3,70			
	50,25	100,86	25,20	25200,00	3,17			
CALCÁRIO 1:1,5 30%	50,15	101,56	31,00	31000,00	3,88	4,19	0,28	6,66
	51,19	100,84	34,60	34600,00	4,27			
	50,41	101,88	35,60	35600,00	4,42			
CALCÁRIO 1:3 30%	50,16	101,07	35,60	35600,00	4,47	4,47	0,06	1,33
	50,16	100,00	35,60	35600,00	4,52			
	50,36	102,27	35,60	35600,00	4,40			
CALCÁRIO 1:4,5 30%	50,22	98,80	35,90	35900,00	4,61	3,93	0,60	15,28
	49,66	99,78	27,10	27100,00	3,48			
	50,92	99,13	29,20	29200,00	3,68			
CALCÁRIO 1:1,5 45%	50,31	98,90	37,70	37700,00	4,83	4,64	0,70	14,99
	50,97	98,92	41,40	41400,00	5,23			
	50,29	98,73	30,20	30200,00	3,87			
CALCÁRIO 1:3 45%	49,96	99,53	27,80	27800,00	3,56	3,86	0,27	7,02
	50,04	99,23	31,90	31900,00	4,09			
	50,26	99,26	30,70	30700,00	3,92			
CALCÁRIO 1:4,5 45%	51,08	97,28	24,40	24400,00	3,13	3,86	0,64	16,57
	50,71	97,00	31,80	31800,00	4,12			
	50,86	99,09	34,20	34200,00	4,32			

APÊNDICE 03 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE, VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO

Densidade de massa aparente, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico									
Traço	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)				Vel. de prop. da Onda Ultra. (mm/μs)	Módulo de elasticidade dinâmico			
	Densidade (Kg/m ³)	Média (Kg/m ³)	DV (Kg/m ³)	CV (%)		Módulo (GPa)	Média (GPa)	DV (GPa)	CV (%)
ÁGATA 1:1,5 0%	2239,70	2217,07	16,30	0,74	4,33	37,72	38,46	1,18	3,07
	2203,55				4,37	37,88			
	2207,02				4,38	38,02			
	2218,03				4,49	40,22			
ÁGATA 1:3 0%	2102,60	2102,50	4,86	0,23	4,00	30,21	29,65	0,62	2,10
	2107,69				3,90	28,83			
	2103,73				3,95	29,51			
	2096,00				3,99	30,06			
ÁGATA 1:4,5 0%	1967,10	1973,21	40,72	2,06	3,57	22,60	20,28	1,61	7,95
	1923,75				3,35	19,43			
	1979,25				3,36	20,07			
	2022,74				3,23	19,01			
ÁGATA 1:1,5 15%	2088,97	2105,61	12,85	0,61	4,21	33,35	34,29	1,02	2,97
	2120,18				4,33	35,74			
	2105,25				4,24	34,06			
	2108,02				4,23	34,00			
ÁGATA 1:3 15%	2071,59	2053,92	21,65	1,05	4,10	31,35	30,28	0,96	3,16
	2060,53				4,07	30,65			
	2061,21				4,02	30,02			
	2022,35				4,00	29,10			
ÁGATA 1:4,5 15	1975,49	1978,30	5,39	0,27	3,79	25,60	26,07	0,34	1,32
	1983,28				3,83	26,13			
	1972,10				3,86	26,42			
	1982,32				3,83	26,14			
ÁGATA 1:1,5 30%	1992,16	1997,27	6,27	0,31	4,05	29,36	29,01	0,35	1,19
	2004,26				4,01	28,98			
	1995,38				4,00	28,67			
ÁGATA 1:3 30%	2005,67	1991,77	12,26	0,62	3,86	26,92	27,11	0,71	2,60
	1982,48				3,95	27,89			
	1987,15				3,85	26,52			
ÁGATA 1:4,5 30%	1942,43	1960,44	12,83	0,65	3,75	24,56	25,59	1,28	5,01
	1971,95				3,86	26,46			
	1966,51				3,90	26,91			
	1960,88				3,72	24,43			
ÁGATA 1:1,5 45%	2061,30	2059,00	7,76	0,38	4,12	31,54	31,68	0,68	2,14
	2049,18				4,09	30,80			
	2057,76				4,16	32,06			
	2067,78				4,17	32,34			

Densidade de massa aparente, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico									
Traço	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)				Vel. de propagação da Onda Ultrassônica (mm/μs)	Módulo de elasticidade dinâmico			
	Densidade (Kg/m ³)	Média (Kg/m ³)	DV (Kg/m ³)	CV. (%)		Módulo (GPa)	Média (GPa)	DV (GPa)	CV. (%)
ÁGATA 1:3 45%	1934,93	1935,30	12,56	0,65	3,91	26,61	25,78	0,75	2,91
	1919,21				3,79	26,04			
	1948,05				3,84	25,15			
ÁGATA 1:4,5 45%	1941,07	1932,99	7,13	0,37	3,97	27,51	27,12	0,39	1,45
	1943,13				3,96	27,14			
	1927,58				3,92	26,72			
CALCÁRIO 1:1,5 0%	2251,39	2262,71	8,38	0,37	4,6277	43,39	45,18	1,56	3,45
	2265,84				4,8005	46,99			
	2262,38				4,6761	44,52			
	2271,22				4,7337	45,80			
CALCÁRIO 1:3 0%	2185,94	2208,43	20,42	0,92	4,5862	41,38	38,97	1,77	4,55
	2230,74				4,3990	38,85			
	2197,41				4,3329	37,13			
	2219,63				4,3907	38,51			
CALCÁRIO 1:4,5 0%	2145,94	2145,87	19,43	0,91	3,9504	30,14	30,39	1,02	3,34
	2146,88				3,9348	29,92			
	2169,10				4,0414	31,89			
	2121,55				3,9397	29,64			
CALCÁRIO 1:1,5 15%	2174,25	2181,67	7,05	0,32	4,3529	37,08	37,81	0,82	2,18
	2181,57				4,4046	38,09			
	2179,68				4,3564	37,23			
	2191,17				4,4386	38,85			
CALCÁRIO 1:3 15%	2021,40	2100,37	86,98	4,14	3,8577	27,07	28,34	1,63	5,76
	2086,11				3,8450	27,76			
	2193,61				3,9099	30,18			
CALCÁRIO 1:4,5 15%	2033,80	2043,03	8,93	0,44	3,2650	19,51	19,92	0,63	3,15
	2043,65				3,2979	20,00			
	2051,64				3,2398	19,38			
	2073,48				3,3360	20,77			
CALCÁRIO 1:1,5 30%S	2013,77	2019,64	5,51	0,27	3,5174	22,42	22,23	0,61	2,76
	2020,46				3,5395	22,78			
	2024,70				3,5020	22,35			
	1992,84				3,4501	21,35			
CALCÁRIO 1:3 30%S	2031,47	2033,50	2,27	0,11	3,4708	22,03	22,37	0,39	1,73
	2033,06				3,4727	22,07			
	2035,96				3,5101	22,58			
	2031,35				3,5325	22,81			

Densidade de massa aparente, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico									
Traço	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)				Vel. de propagação da Onda Ultrassônica (mm/μs)	Módulo de elasticidade dinâmico			
	Densidade (Kg/m ³)	Média (Kg/m ³)	DV (Kg/m ³)	CV. (%)		Módulo (GPa)	Média (GPa)	DV (GPa)	CV. (%)
CALCÁRIO 1:4,5 30%	2051,90	2067,45	4,80	0,23	3,9858	29,34	29,49	0,33	1,13
	2069,99				3,9586	29,19			
	2061,92				3,9848	29,47			
	2070,46				4,0099	29,96			
CALCÁRIO 1:1,5 45%	2000,09	1990,67	8,70	0,44	4,0581	29,64	29,05	0,78	2,67
	1982,96				4,0544	29,34			
	1988,95				3,9672	28,17			
CALCÁRIO 1:3 45%	1968,56	1972,88	3,75	0,19	3,9484	27,62	27,50	0,31	1,11
	1975,43				3,9079	27,15			
	1974,63				3,9499	27,73			
CALCÁRIO 1:4,5 45%	1981,92	1967,38	13,89	0,71	3,9072	27,23	27,11	0,35	1,29
	1954,25				3,9488	27,43			
	1965,99				3,8783	26,61			
	1974,23				3,9109	27,18			

APÊNDICE 04 – Absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova (g/cm ²)													
	15 min.	45 min.	1h30 min.	3h	4h30 min	6h	24h	48h	72h	96h	Media 96h	DP	CV (%)
ÁGATA 1:1,5 0%	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,22	0,37	0,42	0,46	0,49	0,43	0,08	19,18
	0,07	0,12	0,13	0,17	0,20	0,21	0,36	0,44	0,48	0,51			
	0,05	0,07	0,10	0,13	0,15	0,16	0,27	0,31	0,33	0,36			
	0,03	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,25	0,30	0,33	0,36			
ÁGATA 1:3 0%	0,16	0,24	0,29	0,38	0,44	0,49	0,79	0,96	1,04	1,11	1,10	0,06	5,66
	0,16	0,24	0,30	0,39	0,45	0,50	0,77	0,92	1,00	1,07			
	0,14	0,22	0,28	0,37	0,42	0,46	0,74	0,90	0,97	1,03			
	0,15	0,24	0,30	0,39	0,46	0,51	0,83	1,01	1,10	1,18			
ÁGATA 1:4,5 0%	0,17	0,28	0,37	0,50	0,59	0,66	1,08	1,32	1,45	1,54	1,58	0,04	2,49
	0,17	0,26	0,34	0,45	0,53	0,61	1,07	1,35	1,51	1,63			
	0,17	0,26	0,33	0,45	0,54	0,61	1,07	1,34	1,48	1,60			
	0,18	0,27	0,34	0,46	0,54	0,61	1,08	1,33	1,46	1,56			
ÁGATA 1:1,5 15%	0,08	0,12	0,15	0,19	0,22	0,24	0,36	0,43	0,46	0,48	0,52	0,03	5,79
	0,09	0,13	0,15	0,20	0,23	0,25	0,40	0,48	0,52	0,55			
	0,06	0,11	0,14	0,18	0,20	0,23	0,38	0,46	0,51	0,53			
	0,08	0,12	0,15	0,18	0,21	0,23	0,37	0,45	0,48	0,52			
ÁGATA 1:3 15%	0,11	0,17	0,22	0,29	0,35	0,39	0,63	0,76	0,83	0,87	0,88	0,01	1,63
	0,11	0,18	0,23	0,30	0,35	0,39	0,62	0,75	0,82	0,87			
	0,12	0,19	0,25	0,33	0,38	0,43	0,66	0,79	0,84	0,88			
	0,12	0,18	0,24	0,32	0,37	0,42	0,65	0,78	0,85	0,90			

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova (g/cm ²)													
	15 min.	45 min.	1h30 min.	3h	4h30 min	6h	24h	48h	72h	96h	Media 96h	DP	CV (%)
ÁGATA 1:4,5 15%	0,11	0,20	0,28	0,38	0,45	0,50	0,83	1,01	1,08	1,13	1,15	0,04	3,37
	0,11	0,18	0,26	0,36	0,43	0,47	0,82	0,99	1,06	1,12			
	0,12	0,20	0,28	0,38	0,46	0,52	0,88	1,07	1,15	1,20			
	0,11	0,19	0,26	0,37	0,44	0,48	0,83	1,01	1,08	1,13			
ÁGATA 1:1,5 30%	0,08	0,15	0,19	0,26	0,29	0,33	0,53	0,63	0,69	0,72	0,73	0,02	2,18
	0,10	0,17	0,21	0,27	0,30	0,34	0,53	0,62	0,69	0,72			
	0,13	0,16	0,20	0,27	0,31	0,35	0,51	0,65	0,71	0,75			
ÁGATA 1:3 30%	0,10	0,17	0,21	0,28	0,31	0,36	0,55	0,66	0,72	0,75	0,73	0,02	2,49
	0,10	0,17	0,20	0,26	0,30	0,34	0,54	0,64	0,70	0,73			
	0,09	0,16	0,19	0,25	0,29	0,33	0,52	0,62	0,69	0,71			
ÁGATA 1:4,5 30%	0,11	0,18	0,23	0,31	0,35	0,40	0,66	0,79	0,86	0,89	0,89	0,04	4,36
	0,13	0,21	0,26	0,34	0,39	0,44	0,70	0,83	0,90	0,94			
	0,10	0,16	0,20	0,27	0,31	0,35	0,60	0,73	0,81	0,85			
	0,12	0,20	0,25	0,33	0,37	0,43	0,68	0,81	0,89	0,87			
ÁGATA 1:1,5 45%	0,09	0,12	0,14	0,17	0,18	0,20	0,26	0,30	0,32	0,33	0,33	0,02	5,85
	0,07	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,24	0,28	0,29	0,30			
	0,09	0,12	0,15	0,18	0,19	0,21	0,27	0,30	0,32	0,33			
	0,10	0,13	0,15	0,18	0,19	0,21	0,28	0,31	0,33	0,35			
ÁGATA 1:3 45%	0,10	0,16	0,19	0,23	0,26	0,28	0,40	0,46	0,50	0,51	0,64	0,003	0,41
	0,10	0,16	0,18	0,23	0,26	0,28	0,41	0,47	0,51	0,52			
	0,10	0,17	0,20	0,24	0,26	0,29	0,41	0,47	0,50	0,52			

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova (g/cm ²)													
	15 min.	45 min.	1h30 min.	3h	4h30 min	6h	24h	48h	72h	96h	Media 96h	DP	CV (%)
ÁGATA 1:4,5 45%	0,07	0,12	0,15	0,19	0,21	0,23	0,33	0,39	0,42	0,44	0,52	0,004	0,83
	0,07	0,11	0,14	0,17	0,19	0,20	0,29	0,35	0,38	0,41			
	0,08	0,11	0,14	0,18	0,20	0,21	0,31	0,37	0,41	0,43			
	0,08	0,12	0,15	0,18	0,20	0,22	0,32	0,38	0,41	0,44			
CALCÁRIO 1:1,5 0%	0,12	0,14	0,25	0,32	0,37	0,40	0,60	0,72	0,81	0,89	0,43	0,02	3,76
	0,11	0,19	0,26	0,34	0,39	0,43	0,66	0,80	0,89	0,98			
	0,10	0,17	0,24	0,32	0,38	0,41	0,66	0,80	0,90	0,99			
	0,11	0,19	0,28	0,36	0,42	0,46	0,71	0,86	0,97	1,07			
CALCÁRIO 1:3 0%	0,12	0,14	0,25	0,32	0,37	0,40	0,60	0,72	0,81	0,89	0,98	0,07	7,41
	0,11	0,19	0,26	0,34	0,39	0,43	0,66	0,80	0,89	0,98			
	0,10	0,17	0,24	0,32	0,38	0,41	0,66	0,80	0,90	0,99			
	0,11	0,19	0,28	0,36	0,42	0,46	0,71	0,86	0,97	1,07			
CALCÁRIO 1:4,5 0%	0,17	0,30	0,42	0,58	0,69	0,77	1,34	1,70	1,86	1,90	1,91	0,05	2,73
	0,19	0,33	0,46	0,64	0,76	0,83	1,39	1,72	1,85	1,88			
	0,18	0,31	0,43	0,58	0,69	0,76	1,31	1,66	1,83	1,87			
	0,17	0,30	0,43	0,60	0,73	0,81	1,44	1,84	1,96	1,98			
CALCÁRIO 1:1,5 15%	0,08	0,12	0,16	0,19	0,22	0,23	0,31	0,37	0,40	0,43	0,44	0,01	2,09
	0,08	0,12	0,15	0,19	0,21	0,22	0,32	0,37	0,41	0,43			
	0,08	0,13	0,16	0,19	0,22	0,23	0,33	0,38	0,41	0,44			
	0,07	0,13	0,16	0,20	0,22	0,24	0,34	0,39	0,42	0,45			

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova (g/cm ²)													
	15 min.	45 min.	1h30 min.	3h	4h30 min	6h	24h	48h	72h	96h	Media 96h	DP	CV (%)
CALCÁRIO 1:3 15%	0,09	0,16	0,25	0,31	0,37	0,42	0,73	0,90	1,02	1,11	1,13	0,04	3,67
	0,10	0,18	0,27	0,34	0,41	0,45	0,79	0,98	1,10	1,18			
	0,09	0,16	0,25	0,32	0,38	0,43	0,75	0,92	1,03	1,11			
CALCÁRIO 1:4,5 15%	0,13	0,22	0,33	0,42	0,45	0,56	1,04	1,31	1,48	1,59	1,60	0,14	8,55
	0,19	0,29	0,41	0,50	0,60	0,66	1,20	1,50	1,68	1,79			
	0,12	0,21	0,31	0,39	0,47	0,53	0,96	1,21	1,36	1,46			
	0,13	0,22	0,33	0,41	0,50	0,55	1,03	1,30	1,47	1,57			
CALCÁRIO 1:1,5 30%S	0,09	0,15	0,22	0,26	0,31	0,34	0,55	0,65	0,70	0,75	0,74	0,05	7,35
	0,08	0,14	0,21	0,25	0,30	0,33	0,56	0,68	0,75	0,80			
	0,09	0,15	0,21	0,26	0,31	0,34	0,57	0,66	0,71	0,75			
	0,09	0,16	0,24	0,26	0,30	0,34	0,50	0,59	0,63	0,67			
CALCÁRIO 1:3 30%S	0,08	0,14	0,21	0,26	0,30	0,33	0,56	0,68	0,73	0,78	0,75	0,07	9,25
	0,07	0,12	0,17	0,22	0,27	0,29	0,56	0,70	0,77	0,82			
	0,09	0,14	0,20	0,25	0,29	0,32	0,55	0,65	0,72	0,75			
	0,08	0,13	0,19	0,23	0,26	0,29	0,48	0,58	0,63	0,66			
CALCÁRIO 1:4,5 30%S	0,08	0,12	0,16	0,21	0,23	0,26	0,38	0,44	0,46	0,47	0,44	0,02	5,08
	0,07	0,11	0,15	0,19	0,21	0,24	0,35	0,41	0,43	0,43			
	0,08	0,12	0,15	0,19	0,21	0,24	0,34	0,40	0,41	0,42			
	0,07	0,10	0,14	0,18	0,20	0,23	0,35	0,41	0,44	0,45			
CALCÁRIO 1:1,5 45%S	0,07	0,11	0,15	0,19	0,21	0,24	0,33	0,40	0,41	0,42	0,45	0,01	1,17
	0,06	0,10	0,14	0,19	0,21	0,23	0,33	0,37	0,40	0,41			
	0,09	0,13	0,14	0,22	0,24	0,27	0,39	0,46	0,48	0,50			

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova (g/cm ²)													
	15 min.	45 min.	1h30 min.	3h	4h30 min	6h	24h	48h	72h	96h	Media 96h	DP	CV (%)
CALCÁRIO 1:3 45%S	0,08	0,13	0,17	0,21	0,23	0,26	0,37	0,42	0,44	0,45	0,46	0,01	2,13
	0,07	0,11	0,10	0,20	0,22	0,25	0,37	0,43	0,46	0,47			
	0,07	0,11	0,15	0,20	0,22	0,25	0,37	0,43	0,46	0,47			
CALCÁRIO 1:4,5 45%S	0,11	0,15	0,19	0,23	0,25	0,27	0,36	0,40	0,42	0,43	0,43	0,02	4,51
	0,10	0,15	0,18	0,22	0,24	0,27	0,36	0,41	0,43	0,44			
	0,09	0,13	0,17	0,21	0,23	0,25	0,36	0,41	0,43	0,45			
	0,08	0,12	0,15	0,19	0,21	0,23	0,32	0,37	0,39	0,40			

APÊNDICE 05 – Reação Álcali-agregado

Traço	Leitura	dias	Média			Expansão (%)			Expansão média (%)
			CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	
Agregado miúdo Calcário + Cimento Padrão ABCP	0	2	-5,828	-5,528	-4,677	-	-	-	0
	1	4	-5,736	-5,420	-4,535	0,037	0,043	0,057	0,046
	2	9	-5,734	-5,427	-4,570	0,038	0,040	0,043	0,040
	3	13	-5,811	-5,471	-4,638	0,007	0,023	0,016	0,015
	In	16	-5,595	-5,369	-4,492	0,093	0,063	0,074	0,077
	4	20	-5,524	-5,182	-4,355	0,122	0,138	0,129	0,130
	5	23	-5,632	-5,307	-4,433	0,079	0,088	0,097	0,088
	6	28	-5,597	-5,351	-4,452	0,092	0,071	0,090	0,084
Final	30	-5,643	-5,353	-4,483	0,074	0,070	0,078	0,074	
Agregado miúdo de Ágata+ Cimento Padrão ABCP	0	2	-3,782	-6,493	-6,385	-	-	-	0
	1	4	-3,254	-6,107	-5,864	0,211	0,154	0,209	0,183
	2	9	-3,246	-5,739	-5,646	0,214	0,302	0,296	0,258
	3	13	-3,189	-5,779	-5,578	0,237	0,286	0,323	0,261
	In	16	-2,920	-5,528	-5,292	0,345	0,386	0,437	0,365
	4	20	-2,746	-5,328	-5,061	0,415	0,466	0,530	0,440
	5	23	-2,697	-5,323	-5,133	0,434	0,468	0,501	0,451
	6	28	-2,656	-5,274	-5,065	0,451	0,488	0,528	0,469
Final	30	-2,641	-5,192	-5,014	0,457	0,520	0,549	0,489	
Agregado miúdo de Ágata + Cimento Padrão +15% PRA	0	2	-4,748	-6,512	-3,028	-	-	-	0
	1	4	-4,660	-6,395	-2,933	0,035	0,047	0,038	0,040
	2	9	-4,677	-6,410	-2,952	0,028	0,041	0,030	0,033
	3	13	-4,626	-6,447	-2,975	0,049	0,026	0,021	0,032
	In	16	-4,525	-6,270	-2,780	0,089	0,097	0,099	0,095
	4	20	-4,387	-6,147	-2,669	0,144	0,146	0,144	0,145
	5	23	-4,406	-6,202	-2,725	0,137	0,124	0,121	0,127
	6	28	-4,356	-6,154	-2,648	0,157	0,143	0,152	0,150
Final	30	-4,307	-6,087	-2,656	0,176	0,170	0,149	0,165	
Agregado miúdo de Ágata + Cimento Padrão +30% PRA	0	2	-6,623	-4,953	-7,934	-	-	-	0
	1	4	-6,542	-4,978	-7,904	0,033	-0,010	0,012	0,011
	2	9	-6,555	-4,992	-7,898	0,027	-0,016	0,014	0,009
	3	13	-6,579	-4,936	-7,858	0,018	0,007	0,030	0,018
	In	16	-6,516	-4,859	-7,780	0,043	0,037	0,061	0,047
	4	20	-6,412	-4,787	-7,705	0,085	0,066	0,092	0,081
	5	23	-6,513	-4,909	-7,744	0,044	0,017	0,076	0,046
	6	28	-6,548	-4,909	-7,829	0,030	0,018	0,042	0,030
Final	30	-6,512	-4,894	-7,811	0,045	0,023	0,049	0,039	
Agregado miúdo de Ágata + Cimento Padrão +45% PRA	0	2	-6,422	-6,217	-4,064	-	-	-	0
	1	4	-6,393	-6,145	-4,017	0,012	0,029	0,019	0,020
	2	9	-6,398	-6,171	-4,014	0,010	0,018	0,020	0,014
	3	13	-6,352	-6,121	-3,944	0,028	0,038	0,048	0,033
	In	16	-6,270	-6,034	-3,886	0,061	0,073	0,071	0,067
	4	20	-6,196	-5,983	-3,806	0,091	0,094	0,103	0,092
	5	23	-6,279	-6,093	-3,937	0,057	0,049	0,051	0,053
	6	28	-6,316	-6,084	-3,951	0,043	0,053	0,045	0,048
Final	30	-6,328	-6,101	-3,962	0,038	0,046	0,041	0,042	
Agregado miúdo de Calcário + Cimento Padrão +45% PRA	0	2	-5,734	-3,227	-3,029	-	-	-	0
	1	4	-5,671	-3,000	-2,955	0,025	0,091	0,030	0,048
	2	9	-5,602	-3,106	-2,965	0,053	0,048	0,026	0,042
	3	13	-5,605	-3,059	-2,926	0,051	0,067	0,041	0,053
	In	16	-5,525	-2,989	-2,827	0,084	0,095	0,081	0,087
	4	20	-5,478	-2,908	-2,766	0,102	0,127	0,105	0,112
	5	23	-5,542	-3,130	-2,872	0,077	0,039	0,063	0,059
	6	28	-5,608	-3,035	-2,852	0,050	0,077	0,071	0,066
Final	30	-5,608	-3,041	-2,900	0,050	0,074	0,052	0,059	

Traço	Leitura	dias	Média			Expansão (%)			Expansão média (%)
			CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	
Agregado miúdo de Calcário + Cimento P. Branco	0	2	-5,720	-5,537	-4,822	-	-	-	0
	1	4	-5,281	-5,061	-4,338	0,176	0,191	0,194	0,187
	2	9	-5,213	-5,005	-4,272	0,203	0,213	0,220	0,212
	3	13	-5,291	-4,976	-4,248	0,171	0,224	0,230	0,209
	In	16	-5,169	-4,988	-4,260	0,220	0,220	0,225	0,222
	4	20	-5,273	-5,085	-4,410	0,179	0,181	0,165	0,175
	5	23	-5,247	-5,110	-4,396	0,189	0,171	0,170	0,177
	6	28	-5,066	-4,879	-4,161	0,261	0,263	0,264	0,263
	Final	30	-5,086	-4,901	-4,183	0,254	0,255	0,256	0,255
Agregado miúdo de Ágata + Cimento P. Branco	0	2	4,586	0,293	6,954	-	-	-	-
	1	4	-4,435	0,095	-6,774	0,081	0,146	0,050	0,092
	2	9	-4,232	0,460	-6,650	0,200	0,140	0,202	0,181
	3	13	-3,934	0,445	-6,269	0,246	0,166	0,181	0,198
	In	16	-3,821	0,511	-6,321	0,382	0,300	0,317	0,333
	4	20	-3,480	0,846	-5,981	0,415	0,341	0,346	0,367
	5	23	-3,397	0,948	-5,910	0,477	0,389	0,396	0,421
	6	28	-3,243	1,068	-5,785	0,783	0,465	0,475	0,575
	Final	30	-2,477	1,258	-5,586	0,825	0,519	0,498	0,614
Agregado miúdo de Ágata + Cimento P. Branco + 15% PRA	0	2	3,504	5,388	3,299	-	-	-	0
	1	4	3,989	5,946	3,748	0,194	0,223	0,180	0,199
	2	9	3,992	5,766	3,751	0,195	0,151	0,181	0,176
	3	13	4,011	5,882	3,774	0,203	0,197	0,190	0,197
	In	16	4,018	5,829	3,758	0,206	0,176	0,184	0,189
	4	20	3,992	5,825	3,728	0,195	0,175	0,171	0,180
	5	23	4,167	5,968	3,881	0,265	0,232	0,233	0,232
	6	28	4,084	5,922	3,847	0,232	0,213	0,219	0,221
	Final	30	4,118	5,984	3,865	0,246	0,238	0,226	0,242
Agregado miúdo de Ágata + Cimento P. Branco + 30% PRA	0	2	-6,854	-4,873	-1,523	-	-	-	0
	1	4	-6,740	-4,736	-1,383	0,045	0,055	0,056	0,052
	2	9	-6,667	-4,681	-1,312	0,075	0,077	0,084	0,079
	3	13	-6,668	-4,667	-1,300	0,074	0,082	0,089	0,082
	In	16	-6,753	-4,734	-1,387	0,040	0,056	0,055	0,050
	4	20	-6,671	-4,657	-1,285	0,073	0,087	0,095	0,085
	5	23	-6,564	-4,494	-1,194	0,116	0,152	0,132	0,133
	6	28	-6,552	-4,585	-1,177	0,121	0,115	0,138	0,125
	Final	30	-6,539	-4,558	-1,159	0,126	0,126	0,146	0,133
Agregado miúdo de Ágata + Cimento P. Branco + 45% PRA	0	2	-5,135	-5,859	-5,492	-	-	-	0
	1	4	-4,963	-5,673	-5,338	0,069	0,074	0,062	0,068
	2	9	-4,944	-5,620	-5,404	0,076	0,096	0,035	0,069
	3	13	-4,952	-5,640	-5,351	0,073	0,088	0,056	0,072
	In	16	-4,974	-5,670	-5,428	0,064	0,076	0,026	0,070
	4	20	-4,906	-5,594	-5,351	0,092	0,106	0,056	0,085
	5	23	-4,734	-5,461	-5,264	0,160	0,159	0,091	0,137
	6	28	-4,859	-5,574	-5,337	0,110	0,114	0,062	0,096
	Final	30	-4,836	-5,540	-5,318	0,120	0,128	0,070	0,106

Traço	Leitura	dias	Média			Expansão (%)			Expansão média (%)
			CP3	CP1	CP3	CP1	CP3	CP1	
Agregado miúdo de Calcário + Cimento P. Branco + 45% PRA	0	2	-4,799	-5,134	-4,294	-	-	-	0
	1	4	-4,635	-4,995	-4,132	0,066	0,055	0,065	0,062
	2	9	-4,627	-4,967	-4,078	0,069	0,067	0,086	0,074
	3	13	-4,584	-4,930	-4,089	0,086	0,081	0,082	0,083
	In	16	-4,608	-4,973	-4,085	0,076	0,064	0,083	0,075
	4	20	-4,569	-4,912	-4,021	0,092	0,089	0,109	0,097
	5	23	-4,396	-4,758	-3,897	0,161	0,150	0,159	0,157
	6	28	-4,503	-4,868	-3,969	0,119	0,106	0,130	0,118
Final	30	-4,454	-4,846	-3,976	0,138	0,115	0,127	0,127	
Areia do IPT + Cimento Padrão	0	2	-4,771	-4,208	-6,701	-	-	-	0
	1	4	-4,737	-4,187	-6,661	0,014	0,008	0,016	0,013
	2	9	-4,621	-4,134	-6,684	0,060	0,029	0,007	0,032
	3	13	-4,559	-3,991	-6,561	0,085	0,087	0,056	0,076
	In	16	-4,457	-3,937	-6,461	0,126	0,108	0,096	0,110
	4	20	-4,502	-4,019	-6,539	0,108	0,075	0,065	0,083
	5	23	-4,468	-3,970	-6,432	0,121	0,095	0,108	0,108
	6	28	-4,335	-3,851	-6,294	0,174	0,143	0,163	0,160
Final	30	-4,273	-3,735	-6,197	0,199	0,189	0,202	0,197	
Areia do IPT + Cimento P. Branco	0	2	-4,762	-5,990	-6,741	-	-	-	0
	1	4	-4,684	-5,892	-6,659	0,031	0,039	0,033	0,034
	2	9	-4,573	-5,796	-6,606	0,075	0,078	0,054	0,069
	3	13	-4,512	-5,744	-6,520	0,100	0,098	0,088	0,096
	In	16	-4,426	-5,655	-6,468	0,134	0,134	0,109	0,126
	4	20	-4,523	-5,762	-6,584	0,095	0,091	0,063	0,083
	5	23	-4,448	-5,676	-6,440	0,125	0,126	0,120	0,124
	6	28	-4,299	-5,540	-6,293	0,185	0,180	0,179	0,181
Final	30	-4,248	-5,470	-6,238	0,206	0,208	0,201	0,205	
Areia do IPT + Cimento Padrão + 30% PRA	0	2	-4,204	-4,898	-5,609	-	-	-	0
	1	4	-4,162	-4,881	-5,590	0,017	0,007	0,008	0,010
	2	9	-4,152	-4,864	-5,578	0,021	0,013	0,013	0,016
	3	13	-4,120	-4,777	-5,488	0,034	0,048	0,049	0,043
	In	16	-4,136	-4,826	-5,548	0,027	0,029	0,024	0,027
	4	20	-4,110	-4,843	-5,539	0,038	0,022	0,028	0,029
	5	23	-4,111	-4,804	-5,501	0,037	0,037	0,043	0,039
	6	28	-4,088	-4,803	-5,530	0,046	0,038	0,032	0,039
Final	30	-4,094	-4,816	-5,538	0,044	0,033	0,028	0,035	
Areia do IPT + Cimento P. Branco + 30% PRA	0	2	-5,545	-6,595	-4,135	-	-	-	0
	1	4	-5,543	-6,573	-4,117	0,001	0,009	0,007	0,005
	2	9	-5,497	-6,557	-4,113	0,019	0,015	0,009	0,014
	3	13	-5,398	-6,483	-4,021	0,059	0,045	0,045	0,050
	In	16	-5,528	-6,553	-4,123	0,007	0,017	0,005	0,009
	4	20	-5,456	-6,520	-4,062	0,036	0,030	0,029	0,031
	5	23	-5,452	-6,497	-4,059	0,037	0,039	0,030	0,035
	6	28	-5,523	-6,517	-4,056	0,009	0,031	0,032	0,024
Final	30	-5,502	-6,509	-4,086	0,017	0,034	0,020	0,024	