NAGUISA TOKUDOME

**Influência da distribuição morfológica das areias nas propriedades reológicas
e estado endurecido de argamassa de revestimento aditivada**

São Paulo
(2020)

NAGUISA TOKUDOME

**Influência da distribuição morfológica das areias nas propriedades reológicas
e estado endurecido de argamassa de revestimento aditivada**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi

São Paulo
(2020)

NAGUISA TOKUDOME

**Influência da distribuição morfológica das areias nas propriedades reológicas
e estado endurecido de argamassa de revestimento aditivada**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Inovação na
Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi

São Paulo
(2020)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de dezembro de 2020.

Assinatura do autor: Naguisa Tokudome

Assinatura do orientador: Rafael G. P. Legg

Catálogo-na-publicação

Tokudome, Naguisa

Influência da distribuição morfológica das areias nas propriedades reológicas e estado endurecido de argamassa de revestimento aditivada / N. Tokudome -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
111 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Areia de brita 2.Argamassa de revestimento 3.Propriedade reológica 4.Morfologia 5.Incorporador de ar I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

A minha mãe Ikuko e meu pai Nobutaka por me darem o maior bem que existe, a vida.

AGRADECIMENTOS

- À minha família, meus maiores “*cheerleaders*”;
- Ao Roberto Cesar de Oliveira Romano pela contribuição intelectual e motivacional que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho;
- Ao Rafael G. Pileggi pela orientação profissional e pessoal;
- À profa. Renata Monte, sempre solícita em compartilhar conhecimento;
- Ao Mario S. Takeashi, Jessica S. Bragatti, Beatriz F. M. Martins, Estevão C. Laurito, Heitor M. Bernardo, Marcel H. Maciel, José A. F. S. de Mesquita, Danilo D. da Silva, Gabriel C. P. Brasileiro, Thiago Nobre e Julie A. Braun, pela ajuda na execução dos ensaios e discussão dos resultados;
- À Viviani Meneghin, Lineu Amaral, Renata Soares de Castro e Tiago Augusto Oliveira da empresa Votorantim pela gentileza de realizarem os ensaios complementares;
- À Alessandra Marques, Marcos Parolini e Alcides Miranda pela gentileza de disponibilizarem amostras de areia para este trabalho.
- Ao Joaquim Cláudio Macedo da ABCP por compartilhar seu conhecimento e experiência laboratorial.

O Sonho

Sonhe com aquilo que você quer ser,
porque você possui apenas uma vida
e nela só se tem uma chance
de fazer aquilo que quer.

Tenha felicidade bastante para fazê-la doce.
Dificuldades para fazê-la forte.
Tristeza para fazê-la humana.
E esperança suficiente para fazê-la feliz.

As pessoas mais felizes não têm as melhores coisas.
Elas sabem fazer o melhor das oportunidades
que aparecem em seus caminhos.

A felicidade aparece para aqueles que choram.
Para aqueles que se machucam
Para aqueles que buscam e tentam sempre.
E para aqueles que reconhecem
a importância das pessoas que passaram por suas vidas.

Clarice Lispector

RESUMO

O consumo mundial de agregados para a construção civil foi estimado em torno de 43,3 bilhões de toneladas em 2016, sendo a areia, cerca de 44% desse material. No estudo publicado pela *Persistence Market Research* no relatório “*Global Market Study on Construction Aggregates: Industry Analysis and Forecast 2016-2024*”, a projeção de crescimento é de 62,9 bilhões de toneladas até 2024. No Brasil, o consumo de agregado para a construção civil foi aproximadamente de 0,74 bilhões de toneladas em 2014. Nas composições de argamassa, o agregado chega a representar 70% do volume total. Seu preço unitário de venda costuma ser baixo, porém a sua forma e o empacotamento das partículas na composição tem impacto no custo final do produto, visto que têm influência no comportamento reológico. No caso da areia de brita, a origem da rocha e o tipo de britador interferem no formato dos grãos o que torna a matéria-prima variada de um fornecedor para outro. Em consequência, alterações reológicas são observadas nos produtos durante as etapas de mistura e aplicação, e influenciam na dosagem de água de amassamento, aditivo e cimento. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o impacto da distribuição morfológica de areias com diferentes procedências nos estados fresco e endurecido de argamassas produzidas em laboratório para simular produtos industrializados. As argamassas dosadas com agregados de maior esfericidade demonstraram os melhores desempenhos conforme esperado. Contudo, o estudo demonstrou a possível viabilidade na utilização das areias com diferentes formas sem a necessidade de tratá-las para torná-las mais arredondadas.

Palavras-Chave: Areia de brita. Argamassa de revestimento. Propriedade reológica. Morfologia. Incorporador de ar.

ABSTRACT

The worldwide aggregates consumption by construction was estimate on 43.3 billion meters tons in 2016 and around 44% of the material is natural sand. In the study published by Persistence Market Research in the report "Global Market Study on Construction Aggregates: Industry Analysis and Forecast 2016-2024", growth projection is 62.9 billion tons by 2024. In Brazil, aggregate consumption by the construction industry was approximately 0.74 billion tons in 2014. In mortar compositions, the aggregate represents 80% of the total volume. Its unit price of sale is usually low, however its morphology and composition packing causes impact in the final cost of the product because it has influence in rheological behavior. For manufactured sand, rock origin and type of crusher interferes on the shape of the grains, which makes the raw material vary from one supplier to another. Consequently, changes on rheological behavior are observed in the product during the mixing and application stages, which influences water, additive and cement consumption. This study was accomplished with the main goal to evaluate the impact of sand's morphological distribution originated from different plants, on mortars for fresh and hardened state, produced on laboratory to simulate industrialized products. Mortars dosed with higher sphericity aggregates presented better performance as expected. Nevertheless, the study demonstrated a possibility for using aggregates with different morphology without treatment to round it.

Keywords: Manufactured sand. Rendering mortar. Rheological property. Morphology. Air-entraining admixtures.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO DO TRABALHO	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	Extração areia natural	19
3.2	Produção de areia de brita	20
3.2.1	Britador primário	22
3.2.2	Britador secundário	23
3.2.3	Britador terciário	24
3.3	Argamassas	25
3.3.1	Argamassa Industrializada	25
3.3.2	Propriedade morfológica da areia nas propriedades das argamassas ..	28
3.3.3	Utilização de aditivos na composição de argamassas industrializadas ..	30
3.4	Estado fresco – momentos reológicos	33
3.4.1	Reometria rotacional	36
3.4.2	Reometria compressiva - <i>squeeze-flow</i>	37
3.5	Estado endurecido – propriedades mecânicas	39
4	MATERIAIS	40
5	MÉTODOS	42
5.1	Recebimento, preparo e armazenamento	42
5.2	Distribuição granulométrica e morfológica	44
5.3	Densidade real	46
5.4	Massa específica aparente compactada do pó	47
5.5	Área superficial específica	48
5.6	Caracterização mineralógica, química e física do cimento	50
5.7	Absorção de água das areias	51
5.8	Estado fresco	51
5.9	Estado endurecido	55
5.9.1	Módulo de elasticidade dinâmico	56
5.9.2	Resistência mecânica	56
5.9.3	Ensaio de imersão de Arquimedes	57
5.9.4	Permeabilidade ao ar	57
5.9.5	Resistência de aderência a tração	59

6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	Caracterização do Cimento Portland.....	61
6.2	Caracterização das areias.....	63
6.2.1	Distribuição granulométrica	63
6.2.2	Densidade real dos materiais sólidos	65
6.2.3	Porosidade aparente	66
6.2.4	Área superficial específica dos materiais.....	67
6.2.5	Forma dos agregados.....	68
6.2.6	Absorção de água das areias	71
6.3	Desenvolvimento da composição.....	72
6.3.1	Parâmetros de mobilidade	76
6.4	Ensaio no estado fresco	77
6.4.1	Índice de consistência no <i>flow table</i>	78
6.4.2	Densidade real da argamassa e teor de ar incorporado.....	78
6.4.3	Reometria compressiva – <i>squeeze flow</i>	79
6.4.4	Reometria rotacional.....	81
6.5	Estado endurecido	86
6.5.1	Porosidade	86
6.5.2	Resistência mecânica.....	88
6.5.3	Módulo de elasticidade (E)	89
6.5.4	Permeabilidade ao ar.....	90
6.5.5	Resistência de aderência à tração.....	92
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
8	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	96
9	REFERÊNCIAS.....	97
10	APÊNDICES.....	104
10.1	Granulometria das areias após peneiramento na #2,0 mm	104
10.2	Granulometria do filler calcário e cp ii-f-40.....	105
10.3	Parâmetros de mobilidade	106
10.4	Dosagem das argamassas	107
10.5	Resultados individuais no estado endurecido	109
10.6	Resistência de aderência à tração individual	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perspectiva do setor de agregados de 2015 – 2019	18
Figura 2. Esquema simplificado de extração de areia de cava	20
Figura 3. Esquema simplificado de britagem.....	21
Figura 4. Britadores primários. (a) Mandíbula, (b) Giratório, (c) Impacto e (d) Rolo dentado.	23
Figura 5. Esquema do movimento do britador cônico	24
Figura 6. Esquema do britador de impacto vertical (VSI)	25
Figura 7. Fluxograma do processo de fabricação de argamassa.....	26
Figura 8. Ilustração das partículas com ampliação de 50x (fração 1,00-1,18 μm). Em (a) areia natural e em (b) areia de brita.....	29
Figura 9. Alteração das características das argamassas no estado fresco. Em (a) ilustra-se a argamassa misturada sem AIA e em (b) com AIA	31
Figura 10. Argamassa no estado fresco. Em (a) ilustra-se a argamassa sem retentor de água e em (b) com retentor de água.	33
Figura 11. Etapas de aplicação da argamassa de revestimento – processo manual vs mecânico.....	34
Figura 12. Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluídos: (1) Newtoniano; (2) Bingham; (3) Pseudoplástico; (4) Pseudoplástico com tensão de escoamento; (5) Dilatante; (6) Dilatante com tensão de escoamento.	37
Figura 13. Resultado do <i>squeeze-flow</i> das argamassas em duas velocidades distintas 0,1mm/s e 3 mm/s.....	38
Figura 14. Localização geográfica dos fornecedores de agregado e cimento.	41
Figura 15. Plano experimental dos ensaios.....	42
Figura 16. Preparo dos materiais para ensaios de caracterização.....	43
Figura 17. Quarteamento para redução da massa das amostras	44
Figura 18. Peneiramento da fração fina da gráuda	44
Figura 19. Distribuição morfológica no equipamento Qicpic (Sympatec)	45
Figura 20. Ensaio de distribuição granulométrica do material fino no granulômetro à laser. (a) Homogeneização. (b) HELOS (Sympatec).....	46
Figura 21. Picnômetro de gás Hélio, Quantachrome MVP 5DC. Em (a) é apresentado o equipamento e em (b) as opções de porta-amostras.	47

Figura 22. Ensaio de densidade aparente compactada. (a) Equipamento GeoPyc 1360 (b) e detalhe do cilindro com agregado comprimido.....	48
Figura 23. Equipamento para medida da área de superfície específica (a), Belsorp Max e (b) Belprep vac-II para preparação das amostras.	48
Figura 24. Diferenças conceituais dos métodos de adsorção propostos por Langmuir (esquerda) e de BET (direita).....	49
Figura 25. Determinação da umidade da areia. (a) Estado saturado e (b) Saturado superfície seca.	51
Figura 26. Determinação do espalhamento no <i>squeeze flow</i> . (a) Molde, (b) início do ensaio e (c) após aplicação da deformação compressiva.	52
Figura 27. Determinação do índice de consistência no <i>flow table</i>	53
Figura 28. Reometria rotacional. À esquerda é ilustrada a ‘panela’ com capacidade para 5 litros e, à direita a argamassa sendo avaliada.	53
Figura 29. Programação do procedimento de mistura	54
Figura 30. Programação de rotações do teste do ciclo de cisalhamento	54
Figura 31. Formas. (a) Prismático e (b) cilíndrico.....	55
Figura 32. Determinação do módulo de elasticidade. (a) Aparelho Proceq Pundit Lab e (b) corpo de prova cilíndrico.	56
Figura 33. Determinação da resistência mecânica. (a) Tração na Flexão e (b) compressão.....	57
Figura 34. Determinação da permeabilidade ao ar. (a) Permeâmetro, (b) corpos de prova, (c) porta amostra em silicone e (d) fechamento do recipiente em acrílico.....	59
Figura 35. Determinação da resistência de aderência à tração. (a) Forma para aplicação da argamassa, (b) dispositivo de corte, (c) preparo das pastilhas e (d) substrato após ensaio.	60
Figura 36. Distribuição granulométrica do CP II-F-40	61
Figura 37. Análise termogravimétrica do cimento anidro CP II-F-40	62
Figura 38. Identificação dos agregados	64
Figura 39. Distribuição granulométrica dos materiais com remoção da porção retida na peneira 2,0 mm das areias de brita.	65
Figura 40. Densidade real dos materiais sólidos (g/cm ³)	66
Figura 41. Porosidade aparente dos agregados após remoção do material retido na #2,0 mm	67

Figura 42. Área superficial específica das matérias primas	68
Figura 43. Relação de Aspecto e Esfericidade média dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.....	68
Figura 44. Relação de Aspecto por planta dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.	70
Figura 45. Esfericidade por planta dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.	71
Figura 46. Resultado de absorção de água das areias	72
Figura 47. Composição granulométrica das argamassas	73
Figura 48. Distribuição das fases das argamassas	75
Figura 49. Abertura medida no ensaio de <i>flow table</i>	78
Figura 50. Densidade e teor de ar incorporado	79
Figura 51. Curvas de deslocamento em função da carga nas velocidades 0,1mm/s e 3mm/s.	80
Figura 52. Torque na mistura seca vs Tempo de mistura (a) e Torque médio vs Esfericidade das areias de brita (b).....	82
Figura 53. Torque vs Tempo de mistura	83
Figura 54. Torque vs Velocidade de rotação no ciclo.....	85
Figura 55. Porosidade aparente e total das argamassas	86
Figura 56. Avaliação da estabilidade do ar com 28 dias de idade.....	87
Figura 57. Compressão e Tração na Flexão vs Porosidade e MPT	89
Figura 58. Módulo de elasticidade vs Porosidade Total e MPT médio.....	90
Figura 59. Permeabilidade ao ar vs Porosidade aparente e MPT médio	92
Figura 60. Resultados da resistência de aderência.....	93
Figura 61. Parâmetros de mobilidade das composições em função da distribuição granulométrica.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Agregado vendido na região da Grande São Paulo – análise de proporcionalidade entre areia natural e agregado britado. [SINDIPEDRAS e SINDAREIAS, 2018].....	18
Tabela 2. Tipos de britadores e suas características [LUZ e LINS, 2010].....	22
Tabela 3. Identificação dos fornecedores de agregados.....	40
Tabela 4. Composição mineralógica do CP II-F-40.....	61
Tabela 5. Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP II-F-40	63
Tabela 6. Volume retido acumulado da fração grossa das areias em estudo	63
Tabela 7. Volume retido na peneira #2,0 mm.....	65
Tabela 8. Densidade (TAP) e porosidade aparente	67
Tabela 9. Formulação das argamassas com proporção sobre a massa	74
Tabela 10. Resultados de Mobilidade	76
Tabela 11. Toque máximo e Energia de mistura por agregado.....	83
Tabela 12. Comportamento reológico	85
Tabela 13. Resumo dos resultados dos ensaios.....	95
Tabela 14. Dosagem inicial das argamassas para 2.500 gramas de material seco	107
Tabela 15. Dosagem final das argamassas (kg/m ³).....	108
Tabela 16. Resultados numéricos individuais da tração na flexão, compressão, módulo de elasticidade, porosidade aparente e total.....	109
Tabela 17. Resistência de aderência à tração ABI-G-SI	110
Tabela 18. Resistência de aderência à tração ABC-G-SI	110
Tabela 19. Resistência de aderência à tração ABC-G-IT.....	110
Tabela 20. Resistência de aderência à tração ABI-C-CA.....	111
Tabela 21. Resistência de aderência à tração ABI-C-CA (AC-Q FIXO).....	111
Tabela 22. Resistência de aderência à tração Arg Ind.....	111

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, o consumo da areia britada em argamassa para construção dobrou no período de 2008 a 2009¹: enquanto no primeiro ano foi contabilizado que 0,14% da areia natural e 6,42% da areia de brita foram destinadas para a produção de argamassa para construção, em 2009 o setor consumiu 0,10% de areia e 13,36% de areia de brita.

A distribuição regional da quantidade consumida destes materiais no estado de São Paulo, seguiu a mesma tendência com crescimento do uso da areia britada em 3% e diminuição da areia natural em 1,5%.

A razão pela mudança destes números pode ter sido motivada pelo aumento das restrições para a exploração de areias naturais, principalmente próximo aos centros urbanos: a busca pelo material em regiões mais afastadas encarece o frete, fator de grande peso em materiais com baixo valor unitário. A areia de brita é resultante do processo de britagem e pode representar cerca de 50% do material britado na planta. Por este motivo, é relevante pesquisar meios para aumentar a sua aplicação em diversos produtos como a argamassa de revestimento. Produtos como argamassa de assentamento e contrapiso também são alternativas viáveis para incorporação da areia de brita por possuírem faixa granulométrica similar ao de revestimento, porém, não serão avaliadas neste trabalho.

Alguns fabricantes de argamassa industrializada já incorporaram o material na composição em substituição parcial a areia natural, mas em função de consideráveis alterações no estado fresco, o material ainda encontra algumas restrições.

Estudos comprovaram que a morfologia das areias é um fator crítico para dosagem de argamassas e concretos porque materiais formulados com areias lamelares necessitam maior quantidade de água para obter a mesma trabalhabilidade comparativamente as areias naturais, o que pode reduzir a resistência e a durabilidade do produto final [WILLS, 1967; GONÇALVES, et al 2007].

As partículas de textura áspera, angulosas e alongadas necessitam de mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumenta o custo.

¹ O relatório do DNPM de 2009 foi o último ano publicado com abertura por nicho de consumo na construção civil e por este motivo não foi obtido dados mais atualizados sobre o volume destinado para argamassa.

Segundo *Mehta e Monteiro* (2008), a forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades no estado fresco do que as no estado endurecido. A avaliação da argamassa no estado fluído permite compreender o comportamento do produto em diferentes estágios da aplicação e, por isso, é importante a avaliação dos diferentes momentos reológicos. Já no estado endurecido deve-se compreender como a argamassa reage durante a solicitação de uso.

Estudos como de *Yamei et al* (2017) e *Shen et al* (2016) em concreto, determinaram por meio de processamento digital de imagens o formato dos agregados e, àquelas com menor esfericidade necessitou de ajustes nos traços para a mesma trabalhabilidade.

A forma dos agregados também interfere no processo de mistura como demonstrado por *Rebmann* (2016) e *Torres et al* (2017) no qual agregados menos esféricos solicitaram maior energia.

Sendo assim, é de relevância prática a avaliação das características das areias na qualidade final do produto argamassa.

2 OBJETIVO DO TRABALHO

Neste projeto foi avaliada a influência do formato das areias britadas nas propriedades reológicas e estado endurecido de argamassas de cimento Portland, produzidas com a utilização de aditivos incorporador de ar e retentor de água, visando simular a composição de argamassas industrializadas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

No Brasil, a utilização de areia natural em argamassa e concreto tem sido uma prática comum no mercado. Porém, a exploração deste material tem se tornado restrita por questões ambientais o que resultou na busca por materiais alternativos como a areia de brita [GONÇALVES et al, 2007].

No entanto, apesar desta busca, segundo dado fornecido pela Sindipedras e SindAreias, a quantidade de areia natural vendida na Grande São Paulo manteve uma média estável de 75% de 2007 até 2018 (Tabela 1).

A ANEPAC, em conjunto com a Sindipedras, fez um levantamento da demanda de agregados no Brasil de 2000 a 2014 com projeção até 2019 conforme a Figura 1.

Compreende-se que a descrição “Brita” na legenda representa todo material britado vendido, desde o rachão até a areia de brita. De 2007 a 2014, a areia natural representou aproximadamente 59% do consumo, sem sinal de recuo. A partir de 2015 foi prevista queda no consumo de agregados em função da crise financeira do Brasil, com recuperação a partir de 2018.

Ao traçar um paralelo do consumo da Grande São Paulo com o Brasil, nota-se na Tabela 1, que em 2018 o consumo total de agregados está abaixo do realizado em 2014, o que sugere maior potencial de consumo do material.

Para atender tal demanda de forma ambientalmente responsável, é relevante ampliar a utilização da areia de brita, visto que este produto é consequência inerente ao processo de britagem do material, sendo também um material finito na natureza, assim como a areia natural.

Tabela 1. Agregado vendido na região da Grande São Paulo – análise de proporcionalidade entre areia natural e agregado britado. [SINDIPEDRAS e SINDAREIAS, 2018]

Ano	Venda (kt)		Proporção (%)	
	Agregado britado	Areia Natural	Agregado britado	Areia Natural
2007	29.8	86.3	26%	74%
2008	35.2	102.0	26%	74%
2009	36.9	107.0	26%	74%
2010	36.6	106.1	26%	74%
2011	33.0	104.8	24%	76%
2012	35.2	110.9	24%	76%
2013	38.1	112.8	25%	75%
2014	34.9	97.8	26%	74%
2015	29.0	90.2	24%	76%
2016	25.0	70.6	26%	74%
2017	22.2	66.8	25%	75%
2018	23.3	69.3	25%	75%

Figura 1. Perspectiva do setor de agregados de 2015 – 2019

Fonte: <http://www.anepac.org.br> ANEPAC / Sindipedras/SP

3.1 EXTRAÇÃO AREIA NATURAL

De acordo com a ANEPAC, o método de lavra pode ser feito por dragagem para reservas de material localizada em leito de rio ou cava submersa, ou desmonte hidráulico para cavas secas.

A areia de quartzo utilizada na construção civil que abastece a região da Grande São Paulo, tem como uma das origens os portos da cidade de Bofete, localizado a aproximadamente 190 quilômetros de São Paulo.

No levantamento geomineiro realizado pelo IPT (2009) para o município de Bofete, foi descrito que o método predominante de lavra na região é o desmonte hidráulico com formação de cava.

A produção basicamente consiste no processo de bombeamento de polpa, peneiramento e lavagem da areia em diferentes estágios de classificação, lavagem para a remoção de material argiloso, com ou sem estágio adicional de hidrociclonagem para recuperação das frações mais finas das areias. A esquemática do processo está exemplificada na Figura 2.

Trata-se de uma areia com alto custo para seus compradores pelo seu valor de venda e pelo frete, que possui considerável impacto na composição do preço final.

A sua valorização se dá pela capacidade de redução do consumo de água em concreto e argamassa para obter a mesma fluidez, comparativamente com outra areia de diferente formato como a de brita.

Foi contextualizado em particular a extração da areia de Bofete porque a areia natural que fez parte da formulação as argamassas deste estudo, é proveniente da região citada.

Figura 2. Esquema simplificado de extração de areia de cava

(a) Cava de exploração de areia em Bofete com desmonte hidráulico.

Fonte: IPT 2009

b) Processo de lavagem da areia em tanque de decantação.

Fonte:

<http://www.anepac.org.br>

Anepac 2014

(c) Bacia de decantação / contenção de rejeitos (partículas finas de composição silto-argilosas).

Fonte:

<http://www.anepac.org.br>

Anepac 2014

3.2 PRODUÇÃO DE AREIA DE BRITA

O processo de britagem pode ser definido como o conjunto de operações com objetivo de fragmentar os blocos oriundos da mina para gerar granulometria de acordo com a aplicação desejada.

O preparo das rochas utilizadas na construção civil, consiste basicamente na detonação na mina e desmonte, com o objetivo de uniformizar o tamanho do material para passagem no britador primário. Após esse processo, parte do material mais grosso é peneirado para formar a pilha de bica corrida.

Em paralelo, outra parte é separada para a pilha pulmão rachão que abastece o britador secundário na qual o material é processado e enviado para as peneiras vibratórias que os classificam em brita e areia. O material é separado por pilha e pronto para expedição. O esquema simplificado do processo produtivo está demonstrado na Figura 3.

Há possibilidade de existir um britador terciário, geralmente usado para melhorar o formato dos agregados e torná-los arredondados.

Figura 3. Esquema simplificado de britagem

(a) Mina à céu aberto onde ocorre a detonação.

(b) Britador mandíbula. Segue para britador secundário e pilha de rachão.

(c) Britador de cone. Segue para peneiras.

Fonte:

<http://www.anepac.org.br>

Anepac 2016

Fonte:

<http://www.anepac.org.br>

Anepac 2016

(e) Carregamento para expedição.

Fonte:

<http://www.anepac.org.br>

Anepac 2016

(d) Classificação do produto por peneiramento e armazenagem em pilhas

A areia de brita chega a compor cerca de 50% do material nobre produzido, mas a proporção pode variar dependendo da origem da rocha, porém ainda é um volume alto.

Atualmente este material é incorporado na composição do concreto, e seu consumo em argamassa industrializada ainda é baixo, fato relacionado à sua forma.

De maneira genérica, comparativamente com a areia natural, a areia de brita contém partículas angulosas com superfície áspera e forma lamelar, fatores que influenciam na trabalhabilidade e acabamento do concreto no estado fresco [SUPEKAR e KUMBHAR, 2012]. Por analogia, pode-se estender o mesmo conceito para a argamassa fresca.

O processo de britagem bem como a forma de alimentação do material, também interferem no formato, textura e na distribuição de tamanho dos grãos da areia britada [BRIGGS e EVERTSSON, 1998]. Por isso, no item a seguir são descritos os tipos de britadores mais usuais no mercado e a interferência que o equipamento causa no formato do agregado.

3.2.1 Britador primário

Após o desmonte da bancada da frente da lavra, o material pode ou não passar por um rompedor hidráulico até chegar na dimensão adequada para alimentar o britador primário.

Os britadores nesta etapa podem ser de mandíbula, giratório, de impacto ou rolo dentado, sendo o primeiro o mais usual nas plantas [LUZ e LINS, 2010]. As características de cada um estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Tipos de britadores e suas características [LUZ e LINS, 2010]

Britadores	Mandíbula	Giratório	Impacto	Rolo dentado
Característica	Gera menos finos, mas produz produtos lamelares com tamanho de partícula alto	Similar ao de mandíbula, porém com tamanho de partícula reduzido na alimentação.	Limitado para materiais pouco abrasivos. Recomendado quando se deseja gerar poucos finos.	Recomendado para rochas de fácil fragmentação e gera poucos finos.

O britador do tipo mandíbula aceita grande variação de tamanho na sua alimentação e consiste numa placa fixa e outra móvel que possibilitam movimentos de aproximação e afastamento. Hora o material desce entre as mandíbulas e hora sofre impacto para fragmentação do material.

O britador do tipo giratório possui um cone central com movimento de aproximação e distanciamento em relação à carcaça. Possui grande capacidade de operação pois permite a alimentação por dois lados e produz grãos de menor diâmetro comparado ao de mandíbulas.

O mecanismo do britador de impacto consiste na rotação de algumas barras no seu interior que projeta o material contra placas fixas, onde ocorre a fragmentação por compressão.

O último britador citado consiste num rolo dentado móvel que gira em torno do seu eixo central e fragmenta por compressão e cisalhamento quando o material passa entre os dentes e a placa fixada à câmara.

A representação do funcionamento dos equipamentos é ilustrada na Figura 4.

Figura 4. Britadores primários. (a) Mandíbula, (b) Giratório, (c) Impacto e (d) Rolo dentado.

Fonte: LUZ e LINS (2010)

3.2.2 Britador secundário

Os tipos de britadores disponíveis são similares ao do britador primário, mas nessa fase, é usual a utilização do britador cônico.

De forma simplificada, seu funcionamento consiste na movimentação vertical do cone, conforme ilustrado na Figura 5, que ao mesmo tempo controla a abertura de saída e fratura o agregado conforme passa entre as paredes do cone e do manto.

Figura 5. Esquema do movimento do britador cônico

Fonte: LUZ e LINS (2010)

É de conhecimento prático que o produto resultante do britador cônico geralmente é lamelar comparativamente com o britador de impacto, descrito no item 3.2.3. A interferência causada pela forma do agregado produzido nestes dois britadores na argamassa será descrita no item 3.3.2.

Para reduzir a tendência de produzir material lamelar no britador cônico, *Svensson e Steer* (1990) determinaram que existe um ponto denominado de “afogados” na qual opera a câmara do equipamento com uma quantidade ótima de material que promove maior interação entre as partículas. O inconveniente é o aumento da produção de material fino.

3.2.3 Britador terciário

Geralmente, o britador utilizado nessa fase é o de cone ou de impacto, sendo o segundo utilizado quando se deseja reduzir a lamelaridade dos agregados, ou seja, promover o formato cúbico ou arredondado.

No britador de impacto vertical (*Vertical Shaft Impact – VSI*), ilustrado na Figura 6, ocorrem os mecanismos de impacto, abrasão e atrição. O equipamento é alimentado e no seu interior o material é projetado em alta velocidade contra as paredes revestidas com o mesmo agregado.

Figura 6. Esquema do britador de impacto vertical (VSI)

Fonte: LUZ e LINS (2010)

3.3 ARGAMASSAS

A cartilha de terminologia para concreto do ACI, define argamassa como “uma mistura de pasta de cimento e agregado miúdo”. No Brasil, a NBR 13529:2013 trata da terminologia empregada para revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânica e define a argamassa de revestimento como “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”.

Podem ser utilizadas para cobrir e nivelar uma superfície com uma ou mais camadas superposta para recebimento de acabamento decorativo ou ser o próprio acabamento. Neste trabalho, foi utilizada como referência a composição da argamassa industrializada de revestimento para comparar as propriedades reológicas e a possibilidade de replicar seu emprego em escala industrial.

3.3.1 Argamassa Industrializada

Na NBR 13529:2013, encontra-se a definição de argamassa industrializada como “argamassa proveniente do processo controlado e dosagem precisa, em instalação industrial, fornecida embalada ou a granel”.

O fluxograma simplificado de uma instalação industrial de argamassa com utilização de areia britada e natural, é demonstrado na Figura 7.

Neste processo, geralmente o fornecedor de agregado britado envia o material da maneira como é processada na planta; a secagem e classificação granulométrica é realizada nas instalações da fábrica de argamassa.

Para remover a umidade do agregado britado, o material passa pelo secador e armazenado no silo. Após essa etapa, a areia pode passar por algum tipo de britador e segue para a peneira inicial que remove os grãos graúdos com diâmetro maior que 2,0 mm.

O material passante segue para o aeroclassificador que separa o *filler* do restante do agregado e todo o material passa por um funil caindo sobre um prato giratório: o agregado maior que é também mais pesado que o *filler*, cai imediatamente abaixo do prato e o material mais fino e leve é “sugado” para outra câmara e armazenado num silo.

O material mais grosso passa por duas peneiras onde é feita a classificação da areia grossa e média, que são armazenadas em silos distintos.

Figura 7. Fluxograma do processo de fabricação de argamassa

Fonte: adaptado de FUKUI et al (2013)

O diâmetro máximo normalmente encontrado na composição granulométrica das argamassas industrializadas para revestimento, é igual ou menor a 2,0 milímetros, mas a distribuição de tamanho de partículas apresenta considerável variação, conforme demonstrado por *Cardoso* (2009).

As características da areia natural podem ser acordadas entre fabricante e fornecedor para que o material seja entregue na fábrica nas condições próprias para mistura, ou seja, seca e na faixa granulométrica desejada.

O material é armazenado no silo próprio bem como o cimento e aditivos que são usados na formulação.

De acordo com a dosagem e o tipo da argamassa, os materiais são pesados e passam por processo de mistura e homogeneização dos componentes no misturador seco.

Por último, a argamassa pronta vai para o processo de embalagem que pode ser em sacos ou direto para um silo no caso de distribuição à granel.

Dentro das possibilidades de argamassa industrializada, existem outros tipos além do revestimento de piso e parede como por exemplo a colante, assentamento de elementos de alvenaria e contrapiso.

A argamassa colante possui propriedades adesivas e emprega-se no assentamento de peças para revestimento como cerâmica, porcelanatos, pedras entre outros. *Costa* (2006) analisou 6 marcas de argamassa colante vendidas no Brasil e na caracterização granulométrica dos produtos, verificou que o diâmetro máximo do agregado correspondia a 0,6 mm.

Comercialmente, a argamassa de assentamento é indicada para assentamento de blocos de vedação e encunhamento. Existem nessa mesma linha, produtos para uso em alvenaria estrutural com resistência superiores, desenvolvidas para atender determinadas classes do bloco.

Não há uma norma brasileira específica para este tipo de argamassa, porém a britânica (BS 1200) limita o diâmetro máximo do agregado miúdo em 2,4mm com limite superior na curva granulométrica em 10% e a americana (ASTM C-144) limita em 5%. O contrapiso, a NBR 13753:1996 define como camada de argamassa sobre a qual são assentados os revestimentos cerâmicos com a argamassa colante. Nela, recomenda-se a utilização da areia média na composição, nomenclatura não usual desde a atualização da NBR 7211 em 2009. Pela classificação da norma de 1983, esta areia poderia ter diâmetro máximo com variação de 6,3 mm a 2,4 mm.

Rubin (2015) comparou o desempenho da argamassa autonivelante industrializada para contrapiso com o dosado em obra e na composição do traço, utilizou areia com diâmetro máximo de 4,8mm.

Apesar de existirem diversos tipos de argamassa industrializada que utilizam faixas com diâmetro máximo da areia similares, este trabalho se restringiu em estudar apenas os efeitos da forma da areia na argamassa de revestimento.

3.3.2 Propriedade morfológica da areia nas propriedades das argamassas

A propriedade morfológica da areia de maneira simplificada, pode ser caracterizada pela rugosidade superficial, esfericidade e relação de aspecto medida pela razão entre comprimento e largura.

Gonçalves et al (2007) utilizaram um microscópio óptico para caracterizar o formato das areias no estudo que comparou o desempenho mecânico da areia natural e de brita em argamassa.

A esfericidade relaciona a área de projeção com a área de um círculo com perímetro igual ao perímetro da projeção da partícula. Valor unitário 1, representa um círculo e quanto mais próximo de zero, mais irregular é a partícula [REBMANN, 2016].

Em sua análise, a areia natural teve resultado mais próximo de 1, seguido da areia produzida no britador de impacto e por último, a areia do britador de cone.

Em relação ao desempenho mecânico, a areia de brita apresentou maiores resistência à compressão e módulo de elasticidade que a areia natural para relação água/cimento fixa, possivelmente causado por melhor empacotamento. Entretanto, no ensaio de consistência no *flow table*, a areia natural teve as maiores aberturas.

Alguns estudos na China usaram PDI – Processamento Digital de Imagens, para comparar o formato dos dois tipos de areia citados neste trabalho com a finalidade de verificar sua influência no concreto [YAMEI et al, 2017; SHEN et al, 2016].

Na análise da esfericidade, a areia natural teve resultado mais próximo a 1 e menor relação entre comprimento e largura. Apesar da areia de brita ter consumido mais água para obter o mesmo abatimento no cone de *slump*, a resistência à compressão foi maior [YAMEI et al, 2017].

Para análise da textura superficial dos grãos, *Shen et al* (2016) utilizaram microscópio confocal a laser coaxial (*coaxial laser confocal microscope*) que gera imagens em 3D, e constataram que a superfície da areia de brita analisada era mais lisa que a areia

natural. A justificativa apresentada foi de que o processo de britagem criou faces mais lisas nos cristais, enquanto a areia natural foi desgastada pela água e outras partículas, tornando-a mais rugosa, mas ainda mais esférica que a areia de brita.

Na análise em concreto, as areias de brita tiveram resultado de resistência à compressão maior que a areia natural, porém necessitaram de teores maiores de aditivo para obter a mesma trabalhabilidade, impactado pelo material pulverulento que não foi ajustado no traço do concreto.

Torres et al (2017) estudaram a influência do formato e empacotamento das areias na argamassa e constataram que agregados mais lamelares e com maior porosidade de empacotamento apresentaram pontos de coesão máxima, o que resultou em maior dificuldade de homogeneização da mistura. Para obter a mesma trabalhabilidade da argamassa com areia de maior esfericidade, foi necessário adicionar mais água na composição. No ensaio de reometria compressiva, amostras com maior porosidade de empacotamento afetaram o espalhamento da argamassa independente da sua forma, contudo, composições com agregados lamelares obtiveram menores deslocamento.

Rebmann (2016) obteve imagens em microscópio óptico digital de grãos de areia utilizadas em seu estudo. Os grãos de areia natural – Figura 8 (a) possui grãos angulosos, porém aproximadamente equiaxiais, enquanto a areia de brita são mais alongadas – Figura 8 (b).

O autor verificou no ensaio de reometria rotacional, a variação das energias de mistura em areias com formas diferentes na argamassa. Constatou que a composição com areias de menor esfericidade solicitou maior energia na ordem de 37% para mistura seca e 34% para mistura úmida, comparativamente às areias mais esféricas.

Figura 8. Ilustração das partículas com ampliação de 50x (fração 1,00-1,18 μm). Em (a) areia natural e em (b) areia de brita

Fonte: REBMANN (2016)

De forma genérica, os estudos comprovam que a areia natural é mais esférica em relação à areia de brita e a fluidez da argamassa ou concreto é afetada pela forma dos grãos. A areia de brita apresentou menos fluidez no ensaio de consistência para relação água/cimento fixa e necessitou de ajuste de água ou de aditivo para obter o mesmo abatimento no concreto.

O aumento da demanda de água na argamassa ou concreto é um artifício usado para afastar os grãos da areia de brita para reduzir o coeficiente de atrito entre elas e permitir maior fluidez no estado fresco. Porém, esse aumento não traz benefícios em relação ao produto endurecido.

A alternativa amplamente utilizada por fabricantes de argamassa industrial é a adição de aditivos que alteram as propriedades reológicas da massa com objetivo de melhorar a fluidez tanto na aplicação do produto no substrato como no bombeamento do material, e consequentemente aumentar a produtividade na obra.

3.3.3 Utilização de aditivos na composição de argamassas industrializadas

3.3.3.1 Aditivo incorporadores de ar (AIA)

A adição de incorporadores de ar em concreto e argamassa, melhora a trabalhabilidade, particularmente as que contém menos cimento e água, e/ou agregados de textura áspera na composição.

Em dosagem excessiva pode causar retardo de pega porque tornam as partículas de cimento hidrofóbicas, além da mistura sofrer perda de resistência à compressão [MEHTA e MONTEIRO, 2008].

O efeito hidrofóbico pode ocorrer porque a estrutura química do aditivo é constituída por uma cadeia hidrocarbônica apolar com um grupo polar aniônico na extremidade que se liga à partícula do cimento e afasta a água do grão, aumentando o tempo para hidratação [MEHTA e MONTEIRO, 2008].

Em argamassa de revestimento, o aditivo melhora a coesão, reduz a tendência à exsudação, melhora a plasticidade e possibilita reduzir a quantidade de água necessária para o amassamento, o que, possivelmente, diminui a retração plástica e por secagem [ALVES, 2002].

O efeito da melhora da coesão na argamassa fresca pode ser observado na Figura 9, onde em (a) é apresentada uma foto de argamassa sem adição de AIA e em (b) outra foto da mesma argamassa, aditivada com incorporador de ar. As argamassas foram

misturadas com a mesma quantidade de água, mesmo tempo e equipamento [ROMANO, 2013].

Figura 9. Alteração das características das argamassas no estado fresco. Em (a) ilustra-se a argamassa misturada sem AIA e em (b) com AIA

(a)

(b)

Fonte: ROMANO (2013)

Cardoso (2009) demonstrou em seu trabalho com argamassas industriais que quanto maior o teor de ar presente na mistura, menores os esforços para deformação da argamassa no ensaio do *squeeze-flow*, ou seja, maiores deslocamentos máximos atingidos. Como conclusão indicou que o aditivo facilita o fluxo da pasta e o escorregamento dos agregados, ou seja, reduz a força de atrito entre os grãos.

Na pesquisa sobre o efeito do formato das partículas de areia de brita e natural no concreto, Yamei *et al* (2017) mediram maior teor de ar incorporado na mistura com areia natural. O efeito foi atribuído ao formato lamelar com quantidade maior de arestas da areia de brita que aumentam a curvatura das bolhas de ar na superfície, o que leva a concentração de tensões e perda de estabilidade que resulta na ruptura das bolhas.

Resultado divergente foi apontado no comparativo entre as argamassas industriais realizado por Cardoso (2009), no qual foi verificado que o teor de ar incorporado nas massas frescas das composições que continham agregados britados, era maior quando comparado à composição somente com areia natural.

Independente desta falta de convergência dos trabalhos, a necessidade da incorporação de aditivo que garanta quantidade de bolhas necessária para melhorar a coesão e reduzir as forças de atrito entre os grãos de areia é de grande importância.

3.3.3.2 Retentores de água

Os aditivos retentores de água utilizados nas composições de argamassas industrializadas, no geral são à base de éteres de celulose. A celulose, por si só, não é solúvel em água, o que dificulta a sua mistura nas composições. Por isso, a modificação das moléculas torna o aditivo adequado para aplicação nas composições com a função de modificar as propriedades reológicas da massa e são conhecidos como promotores de viscosidade.

A melhora na fluidez da argamassa modificada com este polímero está associada à ação conjunta com a presença de ar incorporado, facilitando o deslizamento entre as partículas, e o escoamento dos materiais durante a aplicação [OHAMA, 1998; CHANDRA e OHAMA, 1994].

Outros benefícios deste aditivo é aumentar a capacidade de retenção da água, e a coesão, e reduzir a segregação e exsudação [BETIOLI, 2007].

O produto aumenta a viscosidade da água e a forma de ação pode ser classificada em três categorias [KHAYAT, 1998].

- Adsorção: as moléculas poliméricas aderem na molécula da água, adsorvendo e fixando parte da água do sistema e expandindo;
- Associação: pode formar forças de atração entres essas moléculas poliméricas, o que dificulta a movimentação da água, formando um gel;
- Entrelaçamento: as cadeias poliméricas com alto peso molecular podem se entrelaçar sob baixa tensão de cisalhamento.

A capacidade de retenção da água é benéfica e evita a rápida perda de umidade durante e após a aplicação, seja para o substrato onde foi aplicada ou para o ambiente pela ação do vento ou baixa umidade relativa do ar. Como resultado da perda de água, pode ser gerada uma matriz com alto de índice de vazios e baixa resistência à compressão [CASALI, 2008].

É possível observar a efetividade da ação do aditivo na Figura 10 (b), pela ausência da mancha deixada no papel.

Figura 10. Argamassa no estado fresco. Em (a) ilustra-se a argamassa sem retentor de água e em (b) com retentor de água.

3.4 ESTADO FRESCO – MOMENTOS REOLÓGICOS

A palavra reologia tem origem grega e significa de forma simplificada, o estudo do comportamento dos materiais no estado fluido. Uma definição técnica é a de *Banfill* (1994) que corresponde a ciência em que são estudados o escoamento e as deformações dos materiais por meio da relação entre tensão de cisalhamento e deformação em determinado tempo.

O propósito em estudar o comportamento da argamassa no estado fluído, é avaliar os materiais e simular o que ocorre na obra em diferentes estágios, desde a mistura, transporte, aplicação e regularização.

Independente do grau tecnológico empregado em todo o processo, a sequência de produção e aplicação das argamassas de revestimento pode ser categorizada em momentos muito específicos, com características e demandas próprias.

A Figura 11 ilustra as sucessivas etapas da aplicação de argamassas de revestimentos: as imagens acima retratam uma sequência tradicional com mecanização somente na etapa de mistura, enquanto na parte inferior referem-se a um processo com maior grau de mecanização nas etapas de mistura, aplicação e acabamento.

Figura 11. Etapas de aplicação da argamassa de revestimento – processo manual vs mecânico.

Fontes: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/> Comunidade da Construção;
<https://www.youtube.com/watch?v=Q-jnRTbvhkE> Projet Reboco Projetado.

Assim, a escolha dos métodos de avaliação reológica de argamassas de revestimento deve ser realizada atentando-se para cada etapa da aplicação, ou seja, em cada estágio do processo de produção da argamassa um momento reológico deve ser avaliado.

A aplicação de ensaios de reometria rotacional permite obter dados como a energia de mistura que está ligada ao tempo necessário para homogeneização: maior energia pode indicar que a argamassa será sensível à etapa de mistura, ou seja, a utilização de diferentes equipamentos ou a variação muito crítica do tempo de mistura podem resultar em consideráveis alterações reológicas, principalmente em função da sensibilidade à incorporação de ar [ROMANO, 2013].

Durante o ciclo de cisalhamento é determinado o perfil reológico da argamassa após a mistura com a água, intimamente ligado ao comportamento durante o bombeamento, seja ela no transporte ou na aplicação mecânica. Idealmente o material deve fluir rapidamente ao aplicar uma energia e não enrijecer totalmente após cessada a energia para não interromper ou dificultar o bombeamento.

A tensão de cisalhamento medida no ciclo, indica a tendência do fluido ao escoamento após aplicação, informação relevante durante a regularização da massa no substrato, no qual é desejável que o produto permaneça estático.

O ensaio de reometria compressiva complementa o perfil reológico na etapa de aplicação, no qual mede o deslocamento da massa a determinada energia. Isso interfere na velocidade de execução do trabalho quando realizado manualmente, ou seja, produtos com menores deslocamentos no ensaio exigem maior esforço do aplicador para espalhar e nivelar a massa.

O comportamento descrito nos parágrafos anteriores, sofre interferência de variáveis como as características físicas dos agregados como a morfologia, distribuição granulométrica, tamanho, densidade, área específica, interação entre elas como forças de atração e repulsão [PILEGGI, 2001].

Dentre as características físicas, a morfologia interfere no coeficiente de atrito e no empacotamento das partículas. Por meio de análise da fração de poros do sistema quando as partículas estão na condição máxima de empacotamento, área específica e densidade, são calculados dois parâmetros de mobilidade que estimam a distância entre as partículas grossas (MPT – *Maximum Paste Thickness*) e finas (IPS – *Inter Particle Spacing Distance*), conforme ilustrado nas equações 1 e 2 a seguir.

A fração de poros, ou porosidade de empacotamento, adotado neste trabalho foi calculada pelo modelo de *Westman & Hugill* e os dois parâmetros de mobilidade pelo modelo proposto em *Oliveira et al* (2000).

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \quad \text{eq. 1}$$

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} \times \left[\frac{1}{V_{Sg}} - \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} \right) \right] \quad \text{eq. 2}$$

Os parâmetros de cálculo são os mesmos sendo as siglas acompanhadas com a letra “g” referenciadas para o material graúdo (maiores que 100 µm). V_s é a fração volumétrica dos sólidos. No cálculo do MPT, a variável V_{Sg} é obtida a partir da soma do volume do ar incorporado em cada argamassa e do volume de água de amassamento (diferente do caso do IPS, em que é utilizada somente a quantidade de água de mistura).

Quanto menores os valores, indica que as partículas estão próximas e maior a atuação das forças de superfície, que interfere diretamente o comportamento reológico [OLIVEIRA et al, 2000].

Quando há grande volume de vazios entre as partículas, é necessário alto teor de fluido para permitir a movimentação através do aumento do IPS e MPT, pois é necessário maior teor para preencher os vazios [PILEGGI et al, 2001]. Estudos conduzidos por *Romano* (2013), *Damineli* (2013) e *Rebmann* (2016), utilizaram os parâmetros de mobilidade para analisar as composições. Cada autor variou a proporção dos materiais, porém a origem dos materiais se manteve a mesma, diferente da proposta deste trabalho.

Sobre o comportamento da argamassa, *Cardoso* (2009) determinou que esta deve apresentar idealmente comportamento pseudoplástico para facilitar o espalhamento, o nivelamento e o acabamento, porém com elevada viscosidade ou considerável tensão de escoamento para manter-se estável após a etapa de acabamento.

Uma característica que favorece a pseudoplasticidade em baixas taxas de cisalhamento é a elevada área superficial das partículas na qual as suspensões tornam-se mais suscetíveis aos fenômenos de superfície, que podem gerar uma aglomeração das partículas que se rompem com o cisalhamento, diminuindo a viscosidade no momento da mistura [OLIVEIRA et al, 2000].

3.4.1 Reometria rotacional

A argamassa, sendo um sistema heterogêneo com grande extensão granulométrica necessita de uma adequada mistura e proporcionamento da água para transformá-la em um sistema homogêneo durante o fluxo.

Porém, as partículas finas tendem à aglomeração devido às forças de van der *Walls* e capilares na presença de água [PILEGGI, 2001; PILEGGI et al, 2001], que dificultam a homogeneização.

O ensaio de reometria rotacional simula o comportamento do material durante a mistura e aplicação e, basicamente, consiste em aplicar uma tensão ou deformação e medir a resistência do material a este esforço aplicado [BETIOLI, 2007].

O reômetro quantifica a energia de mistura necessária para iniciar o movimento de um fluxo em repouso e avalia o comportamento reológico em condições variáveis de cisalhamento e turbulência do sistema, situações encontradas na mistura da

argamassa e transporte por meio de bombeamento para argamassa [CARDOSO, 2009].

A curva 4 da Figura 12 (b) apresenta perfil adequado para o bombeamento porque sua viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento.

Figura 12. Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluidos: (1) Newtoniano; (2) Bingham; (3) Pseudoplástico; (4) Pseudoplástico com tensão de escoamento; (5) Dilatante; (6) Dilatante com tensão de escoamento.

Fonte: WATANABE, ISHIKAWA e WAKAMATSU *apud* PILEGGI (2001)

3.4.2 Reometria compressiva - *squeeze-flow*

Este ensaio, especificado pela NBR 15839:2010, consiste em comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas e medir o deslocamento da argamassa a uma determinada carga com velocidade constante.

Inicialmente a amostra é inserida em um molde cilíndrico de $101 \pm 0,5$ mm de diâmetro interno e $10 \pm 0,1$ mm de altura, apoiada sobre a placa inferior. Antes da aplicação da carga, a argamassa possui o mesmo diâmetro da placa superior e com o decorrer do ensaio, a parte superior aplica uma punção sobre a massa sendo que a área de solicitação da carga permanece constante, porém o material se espalha na placa inferior.

Ambas as placas utilizadas no ensaio são metálicas com baixa rugosidade para não interferirem no deslizamento da massa, e não absorventes, para não afetarem na perda de água para o substrato.

Na prática, o método simula a aplicação da argamassa sobre a base: quanto maior o deslocamento com o menor esforço/carga, melhor o rendimento do trabalho no canteiro.

Cardoso (2009) comparou o resultado do ensaio *squeeze-flow* - Figura 13, com a percepção dos pedreiros que aplicaram a argamassa de revestimento em pórtilcos, e as argamassas que tiveram bom deslocamento com baixa carga, foram bem avaliadas em relação à aplicação, espalhamento e aperto.

Figura 13. Resultado do *squeeze-flow* das argamassas em duas velocidades distintas 0,1mm/s e 3 mm/s

Fonte: CARDOSO (2009)

Um dos fatores que reflete no resultado deste ensaio, é o teor de ar incorporado na massa, na qual sua presença faz com o que o enrijecimento por deformação seja quase inexistente, reduzindo a carga necessária para deformação [CARDOSO, 2009]. Essa informação é relevante e justifica o uso de aditivo incorporador de ar na composição da argamassa para reduzir o efeito causado pelo formato das areias.

3.5 ESTADO ENDURECIDO – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Porosidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, permeabilidade ao ar e resistência à aderência são propriedades mecânicas que fornecem dados sobre o potencial das argamassas em atender os requisitos de desempenho ao qual são solicitadas na prática.

Dentre os ensaios citados, a norma que especifica argamassa para revestimento, NBR 13749:2013, estabelece requisito apenas no que se refere à aderência da argamassa ao substrato. Entende-se dessa forma que a avaliação considera o sistema aplicado, não somente as propriedades da argamassa de forma isolada.

Apesar de não serem indicados na norma os requisitos para a porosidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade e permeabilidade ao ar, estas características influenciam na durabilidade e podem ser usados como indicativos de desempenho para o controle de produção industrial.

A porosidade é relevante porque é nos vazios onde ocorre a concentração de tensões sob uma carga aplicada, sem apresentar resistência. Isso pode favorecer o surgimento de microfissuras e prejudicar o desempenho mecânico.

A resistência mecânica indica o potencial da argamassa resistir à aplicação de tensões, mas não significa que uma argamassa pode ser considerada boa ou ruim em função somente da avaliação desta propriedade. Os valores são utilizados como referência e seriam válidos somente em condições livres de variáveis como a porosidade e rugosidade do substrato e energia de aplicação da argamassa.

O módulo de elasticidade avalia a capacidade de deformação e está relacionado com o potencial de absorver as cargas, como por exemplo a expansão e contração gerada pela variação climática, sem fissurar. O que se espera é que o revestimento suporte tensões de deformações intrínsecas e deformações da base de pequena amplitude [SABBATINI, et al, 1999].

4 MATERIAIS

Os materiais estudados neste trabalho foram fornecidos por produtores da região da Grande São Paulo e algumas matérias primas são utilizadas por fabricantes de argamassa industrializada.

- Cimento Portland do tipo CP II-F-40 (Votorantim), com fábrica localizada em Sorocaba/SP e comercializado à granel. Este produto atende à norma NBR 16697:2018, revisada em julho de 2018 que teve como uma das características o aumento do limite superior para adição de material carbonático de 10% para 25%.
- Incorporador de ar: Agnique – Moléculas a base de lauril sulfato de sódio
- Retentor de água: Moléculas à base de Hidroxi etil metil celulose.
- *Filler*: Produto fino, de origem calcária, passante na peneira #200 (0,075 mm), preparado e utilizado por fabricante de argamassa industrializada na região de Cajamar.
- Areia Natural: Areia fina de quartzo da região de Bofete/SP, utilizada por fabricante de argamassa industrializada na região de Cajamar/SP.
- Areia de Brita: Foram selecionadas 4 areias de plantas distinta para avaliação da empregabilidade na argamassa de revestimento industrializada, sendo duas delas já fornecidas para fabricantes do produto em questão. Detalhes do britador, cidade de origem e denominação dos agregados utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Identificação dos fornecedores de agregados

Tipo de agregado	Britador	Origem da Rocha	Cidade	Denominação
Britado	Cone	Granito	Santa Isabel	ABC-G-SI
Britado	Impacto	Granito	Santa Isabel	ABI-G-SI
Cava	-	Quartzo	Bofete	AC-Q
Britado	Cone	Granito	Itapequerica da Serra	ABC-G-IT
Britado	Impacto	Calcário	Cajamar	ABI-C-CA

A partir desta etapa do texto, todas as vezes que for referenciada a areia de brita de produzida no britador tipo cone, de origem granítica da planta localizada em Santa Isabel, será denominada como ABC-G-SI. Isso vale para as demais areias que serão citadas conforme as denominações dadas na Tabela 3.

5 MÉTODOS

O plano experimental para execução dos ensaios de caracterização dos materiais, e ensaios no estado fresco e endurecido, se deram nas etapas demonstradas na Figura 15. As descrições detalhadas dos ensaios encontram-se nas subseções a seguir.

Figura 15. Plano experimental dos ensaios.

5.1 RECEBIMENTO, PREPARO E ARMAZENAMENTO

Nesta etapa foi realizada a identificação, análise física, química, superficial e morfológica dos materiais a serem utilizados neste projeto.

As amostras de areia foram secas em estufa em temperatura de 100 °C por 24 horas, em seguida quarteadas utilizando-se quarteador rotativo de correia do fabricante Brastorno com capacidade de 300 quilos - Figura 16 (b).

O material foi inserido no funil posicionado sobre uma correia que o transporta e deposita em caixas acrílicas em formato de “pizza” que giram em torno do eixo central. O quarteamento foi realizado também para as amostras de cimento e filler calcário.

Após esse processo, todas as amostras foram embaladas em sacos com aproximadamente 20 quilos e identificadas para estocagem.

Figura 16. Preparo dos materiais para ensaios de caracterização

(a) Estufa

(b) Quarteador rotativo de correia
Brastorno

Para a realização dos ensaios de distribuição granulométrica, densidade real, massa específica aparente e área superficial específica, os materiais foram novamente quarteados para a redução em alíquotas adequadas para cada teste. Para tanto, foram utilizados os equipamentos ilustrados na Figura 17. Em (a) apresenta-se um separador mecânico para agregado miúdo com doze calhas de abertura iguais, conforme descrito na norma NM 27:2001. Cada material foi quarteado até obter a massa aproximada de 2 quilos por amostra e estocado.

No caso da necessidade de redução em menor quantidade utilizou-se o Amostrador PT 100 da marca Retsch ilustrado em (b). No amostrador, o material é inserido no funil sobre uma calha vibratória que o transporta até um compartimento com 8 saídas que rotaciona em torno de um eixo. Em cada saída são posicionados recipientes para a coleta do material, com capacidade de aproximadamente 400 gramas, dependendo do produto.

Figura 17. Quarteamento para redução da massa das amostras

(a)

(b)

5.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E MORFOLÓGICA

Após redução da massa do material, os agregados foram peneirados para obtenção de três diferentes frações para separação das partículas mais finas das graúdas - Figura 18.

As granulometrias das areias foram separadas em:

- Retida na peneira 1,18 mm;
- Passante na peneira 1,18 mm e retida na peneira 106 μm ;
- Passante na peneira 106 μm .

Figura 18. Peneiramento da fração fina da graúda

As frações com dimensões maiores que 106 μm foram analisadas no equipamento Qicpic do fabricante Sympatec (Figura 19). Cada fração possuía aproximadamente 240 gramas e quanto maior o tamanho do grão, maior a massa necessária para ter quantidade significativa de partículas.

O material foi colocado dentro de um funil suspenso sobre uma calha com vibração controlada que aos poucos alimenta o equipamento. Este, realiza a análise de imagem dinâmica dos grãos e tem como princípio capturar com uma câmera fotográfica, a imagem projetada das partículas que passam diante de uma luz.

A alimentação do agregado no equipamento deve ter uma velocidade relativamente baixa para evitar a sobreposição dos grãos e um software trata a imagem obtida para calcular os parâmetros da distribuição morfológica – esfericidade, relação de aspecto, e distribuição granulométrica.

Este equipamento foi configurado para calcular a relação de aspecto como a razão entre largura e comprimento e por este motivo os resultados apresentados no 6.2.1 foram menores que 1. Porém, o parâmetro para análise se mantém no qual valores próximos a 1, representam formatos mais arredondados.

Neste trabalho, os dois os parâmetros citados no parágrafo anterior, foram as características consideradas para analisar o formato das areias.

Figura 19. Distribuição morfológica no equipamento Qicpic (Sympatec)

A fração passante na peneira 106 μm das areias, o cimento CP II-F-40 e o filler calcário foram ensaiadas em um granulômetro a laser, HELOS do fabricante Sympatec – Figura 20 (b). Este instrumento analisa a distribuição granulométrica de pós com diâmetro entre a 0,1 μm a 875 μm .

Cerca de 0,20 g do pó foi adicionado em uma coqueteleira em inox com água deionizada, e a suspensão foi homogeneizada por um minuto – Figura 20 (a). Esta suspensão foi adicionada na porta amostra do granulômetro, já contendo água deionizada e com o auxílio de ultrassom as partículas foram desaglomeradas durante o ensaio.

Uma fonte de luz emite o laser sobre as partículas em suspensão, que tem a imagem ampliada ao passar por uma lente para então ser projetada num anteparo. Para cada amostra, foram utilizadas duas lentes nas análises com ranges diferentes R1 (0,18 μm a 35 μm) e R4 (1,8 μm a 315 μm).

Diferente do QicPic, o equipamento HELOS analisa apenas a distribuição granulométrica.

Figura 20. Ensaio de distribuição granulométrica do material fino no granulômetro à laser. (a) Homogeneização. (b) HELOS (Sympatec).

(a)

(b)

5.3 DENSIDADE REAL

As densidades reais dos materiais sólidos foram determinadas por picnometria de adsorção de gás He em um equipamento Multipycnometer, da marca Quantachrome MVP 5DC, a partir de uma média de 5 determinações de cada matéria-prima.

A técnica permite a determinação do volume verdadeiro do sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido.

Na Figura 21 são apresentados o equipamento e o porta-amostra utilizados no trabalho.

Figura 21. Picnômetro de gás Hélio, Quantachrome MVP 5DC. Em (a) é apresentado o equipamento e em (b) as opções de porta-amstras.

Fonte: ROMANO (2013)

O equipamento apresenta duas câmaras de volumes conhecidos: a câmara onde se coloca a amostra e a de expansão (referência), ligadas por uma válvula de expansão. A amostra é primeiramente pesada antes de ser colocada na câmara, inicialmente, sem comunicação com a de referência. O gás He é injetado na câmara de referência, e então anotado o valor de pressão atingido (p_1) e, em seguida, o gás é transferido para a câmara onde se encontra a amostra, e a nova pressão (p_2) é anotada. Como a massa é conhecida e o volume ocupado é calculado, a densidade real é obtida a partir da relação massa/volume em uma média de 5 medições.

5.4 MASSA ESPECÍFICA APARENTE COMPACTADA DO PÓ

As massas específicas aparentes compactadas (T.A.P. – *Transverse Axial Pressure*) dos agregados foram determinadas por picnometria em um equipamento modelo GeoPyc 1360, na qual é calculada por compactação e compressão do material. O equipamento consiste em um recipiente cilíndrico que é rotacionado e vibrado simultaneamente e a compactação se dá com auxílio de um pistão que desloca o material suavemente e reduz o volume útil do cilindro até pressionar a superfície livre do sistema com pressão pré-estabelecida em função do diâmetro interno do cilindro. A primeira etapa do ensaio inicia-se com o cilindro vazio e na segunda etapa, o material em estudo é inserido no recipiente com consolidação do resultado após execução de 13 ciclos realizado automaticamente.

O volume aparente é medido através da diferença entre o deslocamento volumétrico do cilindro vazio e cheio. Por fim, a densidade aparente é a relação entre a massa do material inserido no recipiente e o volume aparente.

Para os agregados deste estudo, utilizou-se o cilindro com diâmetro interno de 38,1 mm e força de 90N, com 3 repetições de ensaio por material.

Figura 22. Ensaio de densidade aparente compactada. (a) Equipamento GeoPyc 1360 (b) e detalhe do cilindro com agregado comprimido

(a)

(b)

5.5 ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

As medidas de área superficial específica, baseadas na adsorção física e dessorção de gás na superfície da amostra sólida (fisissorção), foi realizada conforme o método de BET (desenvolvido por *Braunauer, Emmet e Teller*), em um equipamento Belsorp Max (Figura 23), com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de 10^{-2} psi por 24 horas em um equipamento Belprep vac-II.

Figura 23. Equipamento para medida da área de superfície específica (a), Belsorp Max e (b) Belprep vac-II para preparação das amostras.

(a)

(b)

Fonte: ROMANO (2013)

O equipamento permite a determinação da área específica de pós secos, da distribuição do tamanho e do volume de micro e mesoporos e a obtenção das isotermas de adsorção/dessorção.

Na Figura 24 é ilustrada a diferença entre os métodos de adsorção propostos por *Langmuir* e de *BET*.

Figura 24. Diferenças conceituais dos métodos de adsorção propostos por Langmuir (esquerda) e de BET (direita)

Fonte: ROMANO (2013)

A adsorção é um fenômeno de concentração de uma substância (adsorbato ou soluto) sobre a superfície de um sólido, ou líquido (adsorvente) e ocorre devido à presença de forças intermoleculares desbalanceadas nas moléculas que se encontram na interface, as quais são responsáveis pela atração de moléculas de outras substâncias, equilibrando as forças atrativas e diminuindo a energia superficial.

A adsorção de multicamadas é obtida a partir do aumento gradativo da pressão de nitrogênio à amostra que permanece na temperatura criogênica. A primeira camada de N_2 adsorvida ocorre à baixíssima pressão, o que torna inviável e imprecisa sua mensuração. No entanto, de acordo com a hipótese adotada por *Brunauer, Emmett e Teller*, a adsorção da segunda camada do gás somente ocorre após o completo e ordenado preenchimento da superfície da partícula na primeira camada, visando preencher todos os poros, a assim ocorre sucessivamente nas camadas seguintes.

5.6 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E FÍSICA DO CIMENTO

A determinação das características mineralógicas do cimento foi realizada por Difração de raios X em um equipamento X Bruker AXS, Modelo D8 Advanced.

Para o ensaio, o cimento foi prensado em formato de pastilha seguido de exposição aos Raios X. O equipamento capta o ângulo de refração e identifica cada composto. Trata-se de uma técnica não destrutiva com análise qualitativa que avalia a distribuição das fases cristalinas e não a sua concentração. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico e o equipamento determina picos e intensidades.

A análise termogravimétrica (TGA) do cimento foi realizada em um equipamento Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplado a uma termobalança - STA409EP. Trata-se de uma técnica destrutiva para monitorar a variação da massa em função da temperatura em ambiente com atmosfera e temperatura controlada. O ensaio foi realizado em amostra de 10 gramas, com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto até a temperatura de 1000 °C, com atmosfera de nitrogênio (60 ml por minuto).

As propriedades químicas e físicas do cimento foram determinadas de acordo com as normas vigentes, ensaiadas pelo fabricante.

- Resíduo insolúvel: para o CP II-F-40 a norma referente é a NM 15:2012 e o ensaio consiste em atacar o cimento com ácido clorídrico a quente para determinar se há contaminações das adições.
- Perda ao fogo: ensaio normatizado pela NM 18:2012, consiste na perda de massa do cimento a 950 °C e indica o teor de *filler* calcário e de umidade.
- SO₃: preconizado pela NM 16:2012, o material é analisado por fluorescência de raios-X (Espectrômetro de fluorescência de raios X – Axios FAST) e indica o teor de trióxido de enxofre proveniente do sulfato de cálcio e do clínquer.
- Finura # 75 µm: a finura é medida conforme a NBR 12826:2013 e o ensaio é realizado em peneirador à vácuo aerodinâmico e auxilia no controle na verificação do controle de moagem na fábrica.
- Blaine: procedimento normatizado pela NBR 16372:2015, realizado em permeabilímetro de *Blaine*, determina a área da superfície específica e podem indicar variações nos tempos de pega e resistências à compressão.
- Água de consistência: a norma referente é a NM 43:2002 e determina a quantidade de água necessária para o ensaio de início e fim de pega.

- Início e fim de pega: medido segundo a NM 65:2002 no aparelho de Vicat, controla o tempo que a pasta de cimento começa e termina de enrijecer a partir da adição da água.
- Resistência à compressão: ensaio normatizado pela NBR 7215:1996, determina a carga máxima suportada por um corpo de prova cilíndrico (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) em argamassa com areia padrão, em diferentes idades (3, 7 e 28 dias para o CP II-F-40). O ensaio realizado na amostra utilizada nesta dissertação foi executado antes da publicação da norma atualizada em 2019.

5.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS AREIAS

A determinação da absorção de água das areias foi realizada conforme a NM 30:2001. O agregado foi saturado, depois seco naturalmente até chegar no estado saturado superfície seca. Este ponto é determinado quando parte do cone se desmancha e outra parte mantém o formato conforme ilustrado na Figura 25 (b). Neste momento é retirada uma amostra e seca em estufa para determinação da umidade. Dessa forma elimina-se a água adsorvida e obtém-se somente a quantidade de água absorvida nos poros dos grãos.

Figura 25. Determinação da umidade da areia. (a) Estado saturado e (b) Saturado superfície seca.

5.8 ESTADO FRESCO

As argamassas foram preparadas para os ensaios no estado fresco seguindo o item 5.2.1 da NBR 16541:2016. Cada areia de brita selecionada para este estudo compôs uma argamassa e o desenvolvimento dos traços estão descritos detalhadamente no item 6.3.

As argamassas foram pesadas com 2,5 kg de material seco e a massa anidra colocada na cuba de aço do misturador de bancada planetário do fabricante Hobart. A quantidade de água correspondente a cada traço foi dividida em duas partes, uma contendo 75% da massa total e outra com 25%.

Com a cuba acoplada no misturador e motor ligado, foi adicionada 75% da água em 10 segundos na velocidade baixa e a mistura lenta sucedeu até completar 30 segundos, contados a partir do primeiro contato da água com a argamassa.

Depois, alterou-se a velocidade para alta e a mistura continuou por mais 60 segundos. Passado este período, o misturador permaneceu desligado por 90 segundos, tempo utilizado para a raspagem da massa das laterais da cuba e da pá misturadora.

O misturador foi religado na velocidade baixa e o restante da água (25%) foi adicionado no intervalo de 10 segundos e novamente a mistura sucedeu até completar 60 segundos.

A densidade e o teor de ar incorporado foram determinados segundo a norma NBR 13278:2005. O espalhamento das argamassas foi determinado pelo ensaio *squeeze flow* seguindo a norma NBR 15839:2010, em uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 5569, com controle de deslocamento do atuador de 0,1 mm/s e 3mm/s. A Figura 26 ilustra o aparato utilizado no ensaio (a), a amostra no início (b) e após a aplicação da deformação compressiva (c).

Figura 26. Determinação do espalhamento no *squeeze flow*. (a) Molde, (b) início do ensaio e (c) após aplicação da deformação compressiva.

Outra forma de avaliação do espalhamento é a partir do ensaio *Flow Table*, realizado seguindo a NBR 13276:2016, conforme ilustrações apresentadas na Figura 27.

Figura 27. Determinação do índice de consistência no *flow table*.

A reometria de mistura e o perfil de cisalhamento das argamassas foram monitorados em um equipamento Pheso, Calmetrix.

Os insumos foram pesados de acordo com as proporções detalhadas na Tabela 9 de forma a obter 6,5 quilos de material seco, pré-homogeneizados em saco plástico e inseridos na “panela” conforme demonstrado na Figura 28.

Figura 28. Reometria rotacional. À esquerda é ilustrada a ‘panela’ com capacidade para 5 litros e, à direita a argamassa sendo avaliada.

O procedimento de mistura teve o primeiro ciclo com duração aproximada de 110 segundos que consistiu no posicionamento do elevador e homogeneização da argamassa seca com rotação planetária constante de 20 rpm. O segundo ciclo iniciou-se com a adição da água (vazão de 100 g/s) e durou aproximadamente 160 segundos com rotação constante de 200 rpm para mistura completa da argamassa (Figura 29).

Figura 29. Programação do procedimento de mistura

Após a mistura, deu-se início ao ciclo de cisalhamento que avaliou o comportamento reológico em solicitação de cisalhamento variada. Os produtos foram submetidos a diferentes velocidades de rotação, primeiro de aceleração e depois de desaceleração. Foram aplicados 2 ciclos completos com patamares de 6,4 / 12,7 / 25,7 / 38,5 / 64,2 / 126,5 / 190,7 e 253 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação (Figura 30).

Figura 30. Programação de rotações do teste do ciclo de cisalhamento

5.9 ESTADO ENDURECIDO

Corpos de prova prismáticos foram moldados para os ensaios de módulo de elasticidade, resistência mecânica e porosidade (Imersão de Arquimedes). Estes foram preparados conforme a norma NBR 13279:2013 em formas com 40x40x160 mm – Figura 31 (a), e adensados em duas camadas seguidos de 30 quedas (mesa de adensamento) por camada.

Para o ensaio de permeabilidade, foram moldados corpos de prova com formato cilíndrico em formas de PVC com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura Figura 31 (b). Como não há procedimento normatizado para o ensaio, a argamassa foi colocada em única camada na forma, espalhada com o auxílio de uma espátula, adensada por meio de 5 quedas consecutivas com altura aproximada de 2 cm e rasada com espátula metálica.

Após cada procedimento, os corpos de prova prismático e cilíndrico foram curados em câmara seca com temperatura 23 ± 2 °C e umidade $60 \pm 5\%$ controladas. Após 48 horas os corpos de prova foram desformados e permaneceram na câmara até o dia da ruptura.

Figura 31. Formas. (a) Prismático e (b) cilíndrico.

(a)

(b)

Para a determinação da resistência de aderência à tração, a argamassa foi aplicada sobre o substrato padrão de concreto, de acordo com a NBR 13258:2019 e curado em ambiente fechado, livre de intempéries.

5.9.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio foi realizado seguindo a norma técnica NBR 15630:2008 com o aparelho Proceq Pundit Lab, com transdutores cilíndricos com diâmetro de 20 mm e frequência de 200 kHz conforme demonstrado na Figura 32 (a).

Após aplicar uma camada de gel nos transdutores, estes são posicionados em cada face do corpo de prova cilíndrico conforme

Figura 32 (b). Um pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica é emitido pelo gerador e transformado em onda de choque numa faixa entre 54 kHz e 1 MHz e quantifica-se o tempo decorrido para a passagem do sinal no corpo de prova.

Figura 32. Determinação do módulo de elasticidade. (a) Aparelho Proceq Pundit Lab e (b) corpo de prova cilíndrico.

(a)

(b)

5.9.2 Resistência mecânica

Ensaio executado com base na NBR 13279:2013 com rupturas realizadas com 28 dias de idade. Primeiramente foi determinada a resistência à tração na flexão em 3 pontos, em 3 corpos de prova por composição. O corpo de prova foi apoiado sobre dois roletes com distância de 100 ± 5 mm entre si e recebeu a carga de 50 ± 10 N/s por um terceiro rolete centralizado na parte superior até sua ruptura, conforme ilustrado na Figura 33 (a). A face rasada durante a moldagem não deve estar em contato com nenhum dos roletes.

Com a ruptura, o corpo de prova se parte ao meio e o ensaio de compressão axial é realizado em cada metade obtida. O dispositivo para este ensaio é composto por pratos com 40x40 mm de dimensão na parte superior e inferior e é aplica carga de

500 ± 50 N/s até a ruptura, conforme ilustrado na Figura 33 (b). Igualmente ao ensaio anterior, a face rasada na moldagem não deve estar em contato com os pratos.

Figura 33. Determinação da resistência mecânica. (a) Tração na Flexão e (b) compressão.

5.9.3 Ensaio de imersão de Arquimedes

Após a realização dos ensaios de resistência mecânica, parte dos corpos de prova avaliados foram reservados para a determinação da porosidade. Inicialmente foram anotadas as massas secas (m_s). Em seguida foram imersos em água por 24 horas e submetidos inicialmente a vácuo por aproximadamente 2 horas para forçar a entrada da água nos poros menores. Após esse período, as amostras foram pesadas imersas (m_i) e úmidas (m_u) para cálculo da porosidade aparente (PA) conforme eq. 3. A porosidade total (PT), cuja fórmula é descrita na eq. 4, foi obtida a partir da densidade relativa (ρ_{REL}), resultante da divisão entre a densidade aparente e a densidade da composição dos pós que compõem a argamassa.

$$PA (\%) = \frac{m_u - m_i}{m_u - m_s} \times 100\% \quad \text{eq. 3}$$

$$PT (\%) = (1 - \rho_{REL}) \times 100\% \quad \text{eq. 4}$$

5.9.4 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar das argamassas foi determinada em um equipamento desenvolvido por *Innocentini et al.* (2009), ilustrado na Figura 34, e ajustada pela

equação de *Forchheimer* (eq.3) que representa uma relação parabólica entre a variação de pressão (ΔP), e a velocidade de percolação do ar (v_s) no meio poroso.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad \text{eq. 5}$$

L é a altura do corpo de prova cilíndrico, μ e ρ são a viscosidade e a densidade do fluido respectivamente.

A diferença de pressão do fluído, neste caso o ar, foi calculada a partir da equação 4:

$$\Delta P = \frac{P_e^2 - P_s^2}{2P} \quad \text{eq. 6}$$

na qual P_e e P_s são, respectivamente a pressão absoluta do fluido na entrada e na saída da membrana.

A permeabilidade das pastas foi expressa em k_1 (m^2) – constante de permeabilidade *Darciana*, associada à perda de energia viscosa durante o escoamento em baixa velocidade.

Outra constante é o k_2 (m) – permeabilidade *não-Darciana*, associada a perda de energia viscosa em alta velocidade intensificada pela turbulência do escoamento tortuoso no meio poroso.

O corpo de prova foi inserido no porta-amostra de silicone para vedação lateral, que foi encapsulado em recipiente acrílico branco e fechado com o intuito de forçar a passagem do ar somente pelo interior do copo de prova. Antes do início das leituras, o ar foi percolado pela amostra por 5 minutos sob baixa pressão (dependente da permeabilidade de cada amostra).

Figura 34. Determinação da permeabilidade ao ar. (a) Permeâmetro, (b) corpos de prova, (c) porta amostra em silicone e (d) fechamento do recipiente em acrílico.

5.9.5 Resistência de aderência a tração

O ensaio foi realizado em laboratório, com argamassas preparadas conforme a NBR 16541:2016, lançadas sob placas de concreto a partir de 15 cm de altura aproximadamente, com o auxílio de uma colher de pedreiro. Para facilitar o nivelamento da massa com 2 cm de altura, foi utilizado um gabarito (Figura 35 a). Após serem rasadas com auxílio de régua metálica, as placas foram curadas por 28 dias. Após esse período, as argamassas foram serradas com serra-copo de 50 mm de diâmetro. O pó remanescente na argamassa foi retirado com o auxílio de ar comprimido.

A NBR 13258-2:2019 determina que sejam ensaiados 12 corpos de prova por argamassa, porém, neste estudo o ensaio foi realizado com 8 corpos de prova.

As pastilhas foram coladas na superfície da argamassa com resina epóxi e aguardou-se 1 dia para a secagem completa. O procedimento utilizado é ilustrado na Figura 35.

Os ensaios foram realizados utilizando um dinamômetro digital, Imada, modelo ATX-500 DPU e célula de carga de 5 kN, Dynatest, com precisão de 10N.

Figura 35. Determinação da resistência de aderência à tração. (a) Forma para aplicação da argamassa, (b) dispositivo de corte, (c) preparo das pastilhas e (d) substrato após ensaio.

(a)

(b)

(c)

(d)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland CP II-F-40, do fabricante Votorantim, foi selecionado para este estudo por ser comumente utilizado por fabricantes de argamassa industrial. O material apresentou distribuição granulométrica conforme demonstrada na Figura 36 e composição mineralógica da Tabela 4, indicando as características comuns para o tipo de cimento composto.

Figura 36. Distribuição granulométrica do CP II-F-40

Tabela 4. Composição mineralógica do CP II-F-40

Fases	Fórmula Química	(%)
C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	57,3
C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	6,34
C ₃ A Cúbico	Ca ₃ Al ₂ O ₆	5,23
C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	7,31
Periclásio	MgO	4,52
CaO Livre	CaO	0,09
Portlandita	Ca(OH) ₂	1,76
Gipsita	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	2,51
Bassanita	CaSO ₄ (H ₂ O) _{0,5}	0,51
Anidrita	CaSO ₄	0,14
Calcita	CaCO ₃	12,3
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	0,57
Quartzo	SiO ₂	0,62
Aphthitalita	3Al ₂ O ₃ - 2SiO ₂	0,83

A Figura 37 mostra a derivada da perda de massa em função da temperatura e nota-se que a perda de água iniciou aproximadamente aos 116 °C e entre 150 e 770 °C, ocorreu uma série de reações relacionados a saída de água quimicamente ligada. A decomposição térmica obtida até 350 °C indica a perda de umidade referente às moléculas de sulfato, silicato, aluminato e compostos de magnésio. No entanto, como se trata de faixa de decomposição de diversas fases, não foi avaliada individualmente. A região referente à portlandita indicou a presença de 1,96% de Ca(OH)_2 , enquanto a decomposição referente ao CO_2 indicou a presença de 10,1% de carbonato de cálcio na composição do cimento.

Figura 37. Análise termogravimétrica do cimento anidro CP II-F-40

A Tabela 5 ilustra as propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento e os resultados indicam que todos os limites estabelecidos pela NBR 16697, atualizado em 2018 foram atendidos.

Tabela 5. Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP II-F-40

Análise	Ensaio	Resultado	Limite NBR 16697:2018
Química	Resíduo insolúvel (%)	0,95	≤ 7,5
	Perda ao fogo (%)	6,63	≤ 12,5
	SO ₃ (%)	3,61	≤ 4,5
Física e Mecânica	Resíduo na peneira 75µm (%)	0,03	≤ 10
	Blaine (cm ² /g)	4577	-
	Água de consistência (%)	29,1	-
	Início de Pega (min)	227	≥ 60
	Fim de Pega (min)	291	≤ 600 (facultativo)
	Resist. à Comp. (MPa) – 3 dias	38,6	≥ 15
	Resist. à Comp. (MPa) – 7 dias	43,3	≥ 25
	Resist. à Comp. (MPa) – 28 dias	49,8	≥ 40

6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS

6.2.1 Distribuição granulométrica

Após uma primeira análise granulométrica das areias de brita, notou-se a presença significativa de material com diâmetro inadequado para a realização desta pesquisa, muito superior ao diâmetro máximo encontrado nas argamassas industrializadas de revestimento (2,0 mm) conforme descrito no item 3.3.1.

Para ilustrar essa observação, o volume do material retirado de cada areia é apresentado na Tabela 6 e exemplificado o antes e depois na Figura 38. A última linha da Figura 38, correspondente à “Imagens QicPic após corte #2,0mm”, contém imagens de alguns grãos com sobreposição que ocorreu somente no início do ensaio.

Tabela 6. Volume retido acumulado da fração grossa das areias em estudo

Peneira	Volume retido acumulado inicial (%)			
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA Grossa
# 3,0 mm	22,6	28,8	35,5	12,6
# 4,4 mm	10,5	18,0	24,0	0,0

Figura 38. Identificação dos agregados

	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA Média	ABI-C-CA Grossa	AC-Q
Característica inicial
Após corte #2,00mm
Imagem QiciPic após corte #2,00mm

A distribuição granulométrica resultante após a separação das partículas mais grossas é apresentada na Figura 39.

Figura 39. Distribuição granulométrica dos materiais com remoção da porção retida na peneira 2,0 mm das areias de brita.

Tabela 7. Volume retido na peneira #2,0 mm

Peneira	Volume retido (%)		
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT
# 2,0 mm	24%	27%	35%
Fundo	76%	73%	65%

Acima de 20% do material comercializado como areia de brita dos três fornecedores deste estudo, precisaria ser removido para adequação do produto para argamassa industrializada. O produto ABC-G-IT sofreu maior corte de volume comparativamente com os demais (35%).

6.2.2 Densidade real dos materiais sólidos

As densidades dos materiais são apresentadas na Figura 40. Três areias de brita possuem origem granítica com variação da densidade entre 2,77 e 2,68 g/cm³, uma areia de brita com mesma origem do *filler* calcário e uma areia natural.

Diferente do que se espera de um agregado de origem calcária, as areias utilizadas neste estudo apresentaram densidades equivalentes ou superiores às amostras de origem granítica.

A densidade tem sua importância na caracterização dos materiais porque tem influência no módulo de elasticidade das argamassas no estado endurecido.

Figura 40. Densidade real dos materiais sólidos (g/cm³)

6.2.3 Porosidade aparente

A porosidade aparente (η) foi calculada pela eq. 7 onde ρ_b é a densidade aparente compactada (TAP) obtida no equipamento GeoPyc 1360 com resultado exposto na Tabela 8 e ρ_s é a densidade real da partícula determinada no Multipycnometer com resultado demonstrado na Figura 40.

$$\eta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \text{eq. 7}$$

Trata-se da porosidade aparente do agregado puro, medida de forma isolada sem considerar a composição da argamassa. As areias de maior relação de aspecto e esfericidade apresentaram resultados de maior compactação, o que indica a influência dessas características no ensaio.

Comparativamente, os agregados de origem granítica que possuem curvas granulométricas similares, a areia ABC-G-IT com menor porosidade aparente indica menor grau de empacotamento e demonstra menor esfericidade do grupo.

Tabela 8. Densidade (TAP) e porosidade aparente

Denominação	M.E. (g/cm ³)	TAP (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)
ABC-G-IT	2,68	1,72	35,9
ABC-G-SI	2,73	1,73	36,7
ABI-G-SI	2,77	1,75	36,9
ABI-C-CA Média	2,78	1,70	39,1
ABI-C-CA Grossa	2,78	1,638	41,4
AC-Q	2,67	1,60	40,3

Figura 41. Porosidade aparente dos agregados após remoção do material retido na #2,0 mm

6.2.4 Área superficial específica dos materiais

Este resultado é determinado pela forma, tamanho e textura dos insumos utilizados no estudo. Quanto maior o valor absoluto, maior a área e essa característica influencia no teor de água necessário que recobre a superfície das partículas para então aumentar a distância entre elas e facilitar a fluidez.

Como consequência, a dosagem da água interfere na quantidade de ar incorporado na argamassa. *Romano* (2005) variou a quantidade de água em relação ao incorporador de ar e notou que para menores teores de água de amassamento, o teor do aditivo incorporador de ar foi irrelevante. Já com maior quantidade de água, notou-se a variação da incorporação de ar e concluiu que a geração das bolhas depende da presença de água livre na suspensão.

Os resultados da área específica obtidos neste trabalho são apresentados na Figura 42.

Figura 42. Área superficial específica das matérias primas

6.2.5 Forma dos agregados

Os valores apresentados na Figura 43 referem-se à esfericidade e relação de aspecto médios dos agregados com partículas entre as peneiras 2,0 mm e 106 μ m, medidos no Qicpic.

Figura 43. Relação de Aspecto e Esfericidade média dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.

As areias de brita de origem granítica, com ou sem passagem no britador de impacto, apresentaram resultados similares na análise da esfericidade.

Como esperado, a areia de quartzo conhecida comercialmente pela sua esfericidade, bem como as areias de origem calcária – tratadas no britador de impacto, apresentaram esfericidade média maior que os demais agregados.

Porém, apesar da baixa variação entre os números, a relação de aspecto conseguiu diferenciar as areias de brita sem passagem no britador de impacto das demais, nos quais resultaram nos menores valores.

Os valores médios, apesar de trazerem um bom indicativo das características morfológicas das areias, não demonstram com clareza o impacto da distribuição granulométrica na forma das areias.

Nas Figura 44 e Figura 45 são ilustradas as distribuições morfológicas das areias – relação de aspecto e esfericidade em função da distribuição de tamanho de partículas. De maneira geral, os valores da relação de aspecto ao longo da distribuição granulométrica, variaram pouco em relação à média, representada na figura com uma linha tracejada em vermelho.

Diferentemente, os desvios dos resultados da esfericidade em relação à média foram mais expressivos ao longo da distribuição granulométrica, com exceção das areias de origem calcária. Isso evidencia a dispersão da esfericidade dos grãos, principalmente das areias de brita de origem granítica.

Figura 44. Relação de Aspecto por planta dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.

Figura 45. Esfericidade por planta dos agregados com remoção do material retido na #2,0 mm.

6.2.6 Absorção de água das areias

A capacidade de absorção de água das areias determina-se pela condição Saturado Superfície Seca (SSS) que é quando todos os poros permeáveis estão saturados sem um filme de água na superfície do grão.

Os resultados obtidos para os materiais avaliados neste trabalho são apresentados na Figura 46.

As areias apresentaram resultados diferenciados por serem extraídas em diferentes minas, ou seja, possuem formação e composição mineralógica diferenciada.

A alta absorção pode ser um indicativo da porosidade da rocha que influencia o desempenho mecânico, porém, a absorção pode estar ligada também a pequenas fraturas que podem surgir nos grãos durante o processo de britagem.

As areias de origem calcária se mostraram sensíveis ao ensaio de absorção por estarem separadas por fração grossa e média e baixo teor de finos. A condição SSS é determinada quando o tronco de cone se desmancha parcialmente (Figura 25) e sem a presença de material fino nestas areias, há dificuldade de determinação do ponto entre desmoronamento total e parcial do cone.

Figura 46. Resultado de absorção de água das areias

6.3 DESENVOLVIMENTO DA COMPOSIÇÃO

Para a formulação das argamassas, os agregados de origem granítica coletados em três plantas (ABI-G-SI, ABC-G-SI, ABC-G-IT), foram peneirados para remoção das partículas maiores que 2,0 mm conforme descrito no item 6.2.1.

Para se obter uma referência da distribuição granulométrica, foi adquirida em loja de revenda de materiais para construção, uma argamassa industrializada para revestimento e buscou-se proporcionar as areias de forma a manter o perfil de curva. Como não foi determinada a quantidade de ligante na composição da argamassa industrializada, a dosagem do cimento foi mantida constante em todas as composições formuladas com variação da adição do *filler* calcário, com o intuito de aproximar as argamassas dosadas em laboratório com a de mercado usada inicialmente como referência (Figura 47).

Apesar da tentativa, será possível notar a partir das avaliações no estado endurecido que as formulações resultaram em traços mais ricos em cimento e material fino.

As areias ABI-G-SI, ABC-G-SI e ABC-G-IT continham grande quantidade de material pulverulento na composição granulométrica e para ajustar à curva de referência, houve redução do *filler* calcário nos traços.

Os agregados com origem calcária (ABI-C-CA) foram fornecidos com duas granulometrias distintas, nomeadas de Média e Grossa, com baixo teor de pulverulento, o que resultou em maior dosagem do *filler* com porcentagem fixada igual ao do cimento.

Somente para a areia de origem calcária, foram elaboradas duas dosagens, uma delas com aproximação da curva granulométrica à argamassa industrializada que resultou em maior quantidade da areia de quartzo (AC-Q) na formulação comparativamente as demais.

O segundo traço foi elaborado com o teor da areia natural similar às demais areias e a proporção foi compensada entre as areias Média e Grossa. Como a areia de quartzo é mais esférica esta característica poderia influenciar nas propriedades reológicas da argamassa.

Figura 47. Composição granulométrica das argamassas

A quantidade de água foi aferida até obter a abertura fixada no *flow table* em 255 ± 10 mm e o teor do aditivo incorporador de ar foi ajustado para respeitar o critério estabelecido em 20% após a mistura. O aditivo retentor de água (celulósico) foi mantido constante em todas as argamassas.

Na Tabela 9, encontram-se as proporções dos materiais que compõem as argamassas e as quantidades expressas correspondem a porcentagem sobre a massa total da argamassa no estado seco. As dosagens dos materiais, em kg/m³, estão demonstrados na Tabela 15 no item 10.4 do Apêndice.

Para elaboração da Figura 48, foi incluída a quantidade de água e volume de ar incorporado em cada argamassa para auxiliar a visualização das fases. O material identificado como Filler granítico corresponde ao material passante na peneira 106 µm.

Tabela 9. Formulação das argamassas com proporção sobre a massa

MATERIAL	IDENTIFICAÇÃO				
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA	ABI-C-CA (AC-Q FIXO)
CP II-F-40 (%)	18	18	18	18	18
COMPONENTES SECOS	Filler calcário (%)	7	7	7	18
	Filler granítico (%)	13	12	11	-
	Areia de quartzo (AC-Q) (%)	28	28	28	34
	Areia de brita (%)	34	35	36	-
	ABI-C-CA Média (%)	-	-	-	25
	ABI-C-CA Grossa (%)	-	-	-	5
TOTAL		100	100	100	100
ADITIVOS	Celulósico* (%)	0,02	0,02	0,02	0,02
	Incorporador de ar* (%)	0,025	0,031	0,025	0,044
	Água* (%)	16,6	16,6	16,0	15,3

* Porcentagem sobre a massa seca total.

Figura 48. Distribuição das fases das argamassas

Nos traços desenvolvidos, as quantidades de aditivo incorporador de ar variaram e tiveram menores dosagens nos traços que com menores adições de *filler* calcário. O material entrou em menor proporção porque as areias de brita de origem granítica, continham alto volume de material fino e compensou parcialmente o *filler*.

Romano (2013) ilustrou em sua pesquisa a comparação entre gotas da solução de água deionizada e água saturada de íons (Ca^{2+}) depositadas sobre uma placa lisa não absorvente. O ângulo formado entre a placa e a tangente da superfície do líquido foi medido e a gota na água deionizada apresentou menor valor, o que aumentou a capacidade de molhamento dos pós e melhorou o efeito dos aditivos.

Apesar desta confirmação, possivelmente, em presença de partículas de cimento, cal ou *filler*, haverá competição entre a adsorção das moléculas do aditivo na superfície dessas partículas e a formação de precipitados com os íons Ca^{2+} , afetando a quantidade de aditivo livre na solução e, conseqüentemente a geração de ar [ROMANO, 2013].

O *filler* que compõe as argamassas tem origem calcária com íons de carga superficial positiva. A rocha granítica pode ser composta predominantemente por quartzo que é formado por sílica e possui íons de carga superficial negativa.

A partir do mesmo raciocínio da alteração na adsorção das moléculas do aditivo incorporador de ar na presença de *filler*, e conseqüentemente na geração de bolhas de ar, as diferentes composições mineralógicas do material fino poderia explicar a diferença de dosagem do aditivo.

6.3.1 Parâmetros de mobilidade

Com os traços definidos, calculou-se a área superficial específica (ASE) ponderada dos pós secos, a área superficial volumétrica (VSA – produto entre a densidade real dos pós e a ASE) e, a porosidade de empacotamento (P_{of}) pelo modelo de *Westman & Hugill*.

Com base nestes valores, e considerando a quantidade de água utilizada em cada composição, estimou-se os parâmetros de mobilidade médio das partículas: MPT e IPS, conforme equações apresentadas em eq. 1 e eq. 2 no item 3.4. Os resultados estão expressos na Tabela 10 e não foram calculados para a argamassa industrializada por não ter a proporção exata das matérias primas.

Ao analisar o resultado do MPT médio em conjunto com a distribuição granulométrica do cimento, os valores da Tabela 10 aparentemente são inconsistentes pois, os espaços entre os agregados não comportariam o aglomerante com diâmetro máximo aproximado de 120 μm (Figura 36). Porém, trata-se de valores médios calculados a partir do VSA e P_{of} das composições que utilizam valores ponderados das areias.

No item 10.3 do Apêndice, foram demonstrados os resultados do IPS e MPT das composições em função da distribuição granulométrica e é possível observar que os valores dos parâmetros acompanham as variações dos tamanhos das partículas.

Tabela 10. Resultados de Mobilidade

Propriedades	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA	ABI-C-CA (AC-Q FIXO)
AE (m^2/g)	0,33	0,34	0,35	0,43	0,41
VSA (m^2/cm^3)	0,93	0,97	0,99	1,21	1,15
Porosidade de empacotamento (%)	19,1	19,5	18,9	20,5	18,1
P_{of} finos (%)	10,8	11,2	11,0	11,6	11,6
P_{of} grossos (%)	26,2	26,2	25,7	27,0	25,5
Água da composição (%)	16,6	16,6	16,0	15,3	15,3
Densidade Aparente (g/cm^3)	1,71	1,69	1,68	1,78	1,73
Ar incorporado (%)	19,5	20,6	19,2	19,5	20,3
IPS _{médio} (μm)	0,74	0,68	0,66	0,56	0,56
MPT _{médio} (μm)*	3,40	3,36	3,21	2,22	2,62

*valor calculado considerando o teor de ar incorporado

Os valores de ASE, VSA e P_{of} independem da quantidade de água na composição. A porosidade de empacotamento é regida pela distribuição granulométrica considerando as partículas como esferas perfeitas e segundo *Oliveira et al* (2000), na teoria, espera-se que o sistema flua quando a quantidade de água for suficiente para exceder a porosidade e recobrir a superfície das partículas. Antes disso, o sistema não deveria fluir porque as partículas se encontram em contato umas com as outras, acentuando as forças de atrito entre os grãos.

Ao comparar os resultados da P_{of} das argamassas compostas com agregado de calcário com a mesma forma, ABI-C-CA e ABI-C-CA (AC-Q FIXO), notou-se considerável variação entre os valores. A razão foi a substituição parcial da areia de quartzo pelas areias de brita média e grossa, que resultou em menor porosidade na composição ABI-C-CA (AC-Q FIXO). Isso favoreceu o aumento do MPT médio e o efeito foi a melhora da fluidez, como será discutido posteriormente.

As composições com areia de brita de origem granítica tiveram a mesma adição de *filler* calcário conforme demonstrada na Tabela 9. A argamassa ABC-G-IT apresentou P_{of} - finos um pouco maior que ABI-G-SI, porém foi necessária menor quantidade de água para obter espalhamento semelhante no *flow table*, o que alterou V_s e resultou em menor IPS.

O parâmetro MPT médio é a distância entre as partículas maiores que 100 μ m (agregados), calculado considerando o ar incorporado e a água contida em cada mistura. Esses dois parâmetros foram considerados porque em uma argamassa, os agregados não são separados somente por um líquido e, sim por uma pasta cimentícia que contém as bolhas de ar [ROMANO, 2013].

Espera-se que quanto maior o valor do MPT, maior seja a fluidez em formulações com o mesmo material. Na comparação entre as duas argamassas com areia de brita calcária, essa expectativa foi atendida conforme demonstrada na Figura 51 do item 6.4.3.

Nas comparações entre composições com materiais de diferentes origens, MPT médio não se mostrou eficaz para ser correlacionado com a fluidez, como foi o caso das areias de origem granítica comparadas com as de calcário.

6.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para avaliação do estado fresco e moldagem no estado endurecido, foi utilizada a mistura definida na NBR 16541:2016.

6.4.1 Índice de consistência no *flow table*

A primeira análise de consistência da argamassa foi determinada no ensaio de *flow table* para se estabelecer a dosagem de água dos traços, por ser um parâmetro comumente utilizados do meio profissional. Os teores de água utilizados em cada argamassa foram obtidos para atender o parâmetro de abertura adotado de 255 ± 10 mm, referência semelhante ao recomendado na NBR 13276 publicado em 2005 (260 ± 5 mm) e que foi excluída na nova versão de 2016.

6.4.2 Densidade real da argamassa e teor de ar incorporado

É sabido que a presença de bolhas de ar pode minimizar as forças de atrito entre os grãos de areia nas composições de argamassas de revestimento e, como o foco do trabalho é de avaliar o impacto da distribuição morfológica das areias nas características das argamassas, optou-se por manter constante o teor de ar incorporado.

O teor adotado, em torno de 20%, foi escolhido em função de uma prática comum para argamassas industrializadas, pelo menos em teoria, de manter o volume de ar próximo de 20% para o desenvolvimento dos produtos. No entanto, sabe-se que é grande a sensibilidade das argamassas à etapa de mistura, seja em função do tempo ou do tipo de equipamento empregado. Um exemplo disso é que a argamassa industrializada (Arg Ind) quando misturada conforme a NBR 16541:2016, o teor ar

incorporado atingiu 26%. Para aproximar o valor das argamassas formuladas, reduziu-se o tempo final de mistura descrito na letra (g) do item 5.2.1 da norma referida, de 60 segundos para 30 segundos. Esta prática resultou na queda do ar incorporado para 19,6% conforme ilustrado na Figura 50. O tempo de mistura foi reduzido conforme experimento realizado por *Romano* (2013) no qual demonstrou que a incorporação de ar é sensível ao tempo de mistura.

Figura 50. Densidade e teor de ar incorporado

6.4.3 Reometria compressiva – *squeeze flow*

Apesar da norma permitir a realização do ensaio sobre diferentes tipos de substrato, neste trabalho a avaliação foi feita sobre uma base metálica lisa que, de forma comparativa, pode indicar a sensibilidade do aplicador durante o processo de espalhamento do produto sobre a alvenaria.

Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 51 e a argamassa industrializada foi ensaiada a título de conhecimento, porém não foi possível analisar as causas do seu comportamento por ser desconhecida a composição.

O traço composto com o agregado ABC-G-IT teve o menor deslocamento de todas as amostras em baixa velocidade. Em alta velocidade, necessitou de maior carga para o mesmo deslocamento das demais, resultado incoerente quando analisado em conjunto com os resultados de esfericidade e relação de aspecto (Figura 43), comparativamente as demais areias de origem granítica.

Outra informação importante é o perfil observado para as argamassas ABC-G-IT e ABI-G-SI, e em menor intensidade na ABC-G-SI, na qual indicou que o fluxo não é homogêneo, como se espera durante a aplicação da argamassa. Durante o deslocamento da punção, apesar do controle preciso da máquina, o fluxo da argamassa ocorre em pequenos estágios onde há intermitência entre espalhamento e relaxação, ou seja, quando há fluxo a carga aumenta e quando há relaxação a carga diminui automaticamente, resultando em um perfil de curva similar à um 'eletrocardiograma'. Esse perfil é nítido no ensaio em menor taxa de deslocamento visto que se trata de uma condição de imposição mais crítica ao material.

Os resultados das areias de origem calcária, demonstram que a forma dos grãos influenciam no espalhamento, pois as argamassas compostas com as areias mais esféricas – ABI-C-CA e ABI-C-CA (AC-Q FIXO), auxiliaram no efeito de rolamento.

Figura 51. Curvas de deslocamento em função da carga nas velocidades 0,1mm/s e 3mm/s.

O ensaio com maior velocidade de deslocamento possui menos impacto na

argamassa porque dificilmente induz a segregação durante o fluxo, porém foi possível observar o comportamento distinto da composição ABC-G-IT.

Em suma, mesmo com a produção das argamassas com aditivo incorporador de ar para simular uma condição de argamassa industrializada, foi possível observar que a forma da areia impacta consideravelmente no espalhamento do produto.

6.4.4 Reometria rotacional

6.4.4.1 Mistura

A avaliação reológica da mistura é uma etapa bastante importante no processo de desenvolvimento de argamassas, pois pode indicar de forma indireta a sensibilidade do produto ao processamento.

A relevância de medir a energia de mistura se faz necessário para determinar a influência da forma do agregado nesta etapa de preparo da argamassa para sua utilização. Na obra, o ideal é trabalhar com uma argamassa de fácil mistura e que não exija grandes esforços, pois interfere no rendimento do servente e/ou do equipamento. Apesar de ser uma etapa anterior à aplicação, simulada a partir da avaliação dos resultados obtidos no ensaio *squeeze flow*, a discussão dos resultados está sendo apresentado nesta sequência, pois para a avaliação do espalhamento há especificação normativa, mas para o caso de reometria rotacional, o procedimento não está normalizado. Assim, uma nova batelada de argamassa foi preparada especificamente para estes testes.

A Figura 52 (a) mostra o torque necessário para a mistura do material seco e na Figura 52 (b) ao lado, foi demonstrado a correlação entre o torque médio da mistura seca com a relação de aspecto da areia de brita. A estratégia adotada visou demonstrar que antes da adição da água (ou seja, sem fluido ou ar incorporado) o impacto da forma das areias pode ser observado de maneira mais crítica, e simulou de uma visão bastante simples, um ensaio de tribologia. Como esperado, nota-se que as areias com menor relação de aspecto demandam maior energia no processo seco.

Este comportamento se manteve similar mesmo após a adição da água, e incorporação de ar que resultou no afastamento dos grãos.

Na Figura 53 é apresentada a relação entre o torque de mistura e o tempo de cisalhamento. O pico de torque indica o ponto máximo de coesão e as argamassas compostas com os agregados ABC-G-SI e ABC-G-IT, que possuem esfericidades

similares, porém, não foram tratadas no britador de impacto, exigiram os maiores torques. Considerando que fatores como teor de finos, água e aditivo foram ajustados para que as argamassas tivessem comportamentos similares no estado fresco, entende-se que a alteração da forma das areias resultou em maior dificuldade para o processamento.

As composições ABC-G-SI e ABI-G-SI demonstraram paridade nos resultados dos demais ensaios como esfericidade e *squeeze flow*, porém neste caso mostraram comportamentos distintos.

Dentre os ensaios realizados neste trabalho, este foi o único no qual as areias que passaram pelo britador de impacto tiveram comportamento semelhantes e solicitaram os menores torques.

A Tabela 11 traduz de forma numérica os resultados do gráfico apresentado na Figura 53, demonstrando o torque máximo e a energia de mistura por agregado. Nota-se que as areias com maior relação de aspecto demandaram menores torques – Figura 52 (b).

O traço ABI-C-CA (AC-Q FIXO), apesar de exibir maior deslocamento no *squeeze flow* em baixa velocidade, solicitou maior energia de mistura comparado a ABI-C-CA, possivelmente causado pelo melhor grau de empacotamento das partículas.

Figura 52. Torque na mistura seca vs Tempo de mistura (a) e Torque médio vs Esfericidade das areias de brita (b)

Figura 53. Torque vs Tempo de mistura

Tabela 11. Toques máximo e final de mistura, e Energia de mistura por agregado

Identificação	T Max (N.m)	t _i (s)	t _f (s)	T Final (N.m)	EM (N.m.s)
ABI-G-SI	2,2	149	265	1,2	245
ABC-G-SI	2,6	146	267	1,5	291
ABC-G-IT	2,6	153	267	1,6	294
ABI-C-CA	2,3	156	267	1,4	255
ABI-C-CA (AC-Q FIXO)	2,3	165	266	1,3	272
Arg Ind	2,2	144	245	1,3	227

Ti – tempo de virada

Tmax – ponto de virada

T final – torque final de mistura

EM – energia necessária para a mistura.

6.4.4.2 Ciclo de cisalhamento

Após a mistura, o ciclo de cisalhamento foi iniciado com a aplicação de variação da condição de cisalhamento, com o intuito de simular o comportamento da argamassa durante um possível bombeamento. Os resultados são apresentados na Figura 48.

O comportamento reológico foi determinado a partir do cálculo da área de histerese (AH), e a partir do modelo de *Bingham* (eq. 8), foram obtidos o torque de escoamento (τ_L) e a viscosidade plástica (μ_p).

$$\tau = \tau_L + \mu_p \quad \text{eq. 8}$$

Sendo “ τ ” o torque. Os resultados estão expostos na Tabela 12.

O torque de escoamento é a tensão mínima de cisalhamento necessária para iniciar o fluxo de uma suspensão em repouso.

A viscosidade plástica é uma medida de resistência interna do fluído ao escoamento, ou seja, mede a fricção resultante do choque das partículas entre si que aumenta de acordo com a concentração dos sólidos no fluído [AMORIM et al, 2002].

Deve ser salientado que a determinação dos parâmetros reológicos a partir da aplicação do modelo de *Bingham* foi realizada no período de desaceleração, visto que se tratava de um estágio no qual a argamassa já havia sido submetida à maior imposição do cisalhamento.

Ambos os parâmetros reológicos são importantes para a avaliação das argamassas, pois o produto, após a aplicação em superfícies verticais deve permanecer aderido sem ‘escorregar’ até que a adesão química seja atingida.

O resultado da área de histerese foi utilizado como indicativo do perfil de tixotropia das argamassas no qual o valor positivo sinaliza comportamento tixotrópico e negativo, reopético.

A tixotropia é a tendência do sistema em manter suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou. No momento da aceleração do cisalhamento, ocorre a desaglomeração das partículas e na desaceleração, pode-se observar a reaglomeração e rearranjo na argamassa.

Quando é gerada uma grande área no gráfico, aponta a tendência de o material ter baixa velocidade de reaglomeração no cisalhamento de desaceleração, como foi o caso da ABI-G-SI em relação as demais.

Os resultados do ciclo de cisalhamento corroboram com os demais ensaios realizados neste trabalho. ABC-G-IT obteve o maior torque de escoamento e está em linha com os resultados de energia de mistura e *squeeze flow*. Apesar disso, a viscosidade plástica foi relativamente baixa em relação as demais argamassas. Isso pode ser um indicativo que após o início do fluxo, a disposição do empacotamento ou a forma das areias reduziu a fricção entre as partículas.

ABI-C-CA (AC-Q-FIXO) foi a única argamassa que indicou perfil de reopexia, com área de histerese negativa, ou seja, durante a aplicação do cisalhamento com aumento da velocidade (período de aceleração), a taxa de rompimento dos aglomerados foi um pouco mais lenta que a taxa de reaglomeração das partículas obtida durante o período de desaceleração. Porém, é possível que tenha ocorrido

desvio na leitura de alguns pontos na desaceleração, que podem estar dentro da faixa de erro do próprio ensaio.

Tabela 12. Comportamento reológico

Identificação	Torque de Escoamento (N.m)	Viscosidade Plástica (N.m/rpm)	AH
ABI-G-SI	1,17	0,0008	42,913
ABC-G-SI	1,20	0,0012	7,526
ABC-G-IT	1,32	0,0009	11,031
ABI-C-CA	1,12	0,0013	6,912
ABI-C-CA (AC-Q FIXO)	1,18	0,0013	-1,039
Arg Ind	1,18	0,0013	11,079

Figura 54. Torque vs Velocidade de rotação no ciclo

6.5 ESTADO ENDURECIDO

6.5.1 Porosidade

As porosidades, aparente (PA) e total (PT) das argamassas, foram obtidas pelo método de imersão de Arquimedes conforme descrito no item 5.9.3 e os resultados estão expressos na Figura 55. Porosidade aparente indica os poros abertos e conectados que podem conduzir material entre o exterior e interior, e prejudicam tanto a resistência mecânica quanto a durabilidade do material, pois torna-se um ponto de entrada para agentes agressivos.

A porosidade total considera os poros abertos, conectados entre si, e os fechados, deixados pela água e bolhas de ar incorporadas naturalmente pelo processo de mistura e pelo uso do aditivo.

Figura 55. Porosidade aparente e total das argamassas

Se as bolhas de ar são estáveis, podem resultar em poros menores na microestrutura das argamassas, mas se forem instáveis, possivelmente colapsarão antes do endurecimento, o que pode reduzir a porosidade total potencial, mas pode também resultar em poros com maiores diâmetros [ROMANO, 2013].

Uma forma de se avaliar a estabilidade das bolhas de ar incorporadas no estado fresco é a partir da correlação entre o volume de poros total e a soma entre o teor de ar incorporado e a água utilizada na mistura. Quanto menor a perda de bolhas de ar, a tendência é que os pontos apresentados na Figura 56 se aproximem da linha tracejada

e à medida que os pontos se afastam para baixo da reta, há indicativo de maior a perda do ar.

Dentre as argamassas avaliadas, a composição ABI-C-CA que resultou na maior dosagem de areia de quartzo, foi a que perdeu maior quantidade de ar no processo de endurecimento.

Uma hipótese é que neste caso, a quantidade de material miúdo teve maior influência na manutenção das bolhas do que a forma das areias.

Para a formulação da argamassa ABI-C-CA utilizou-se os mesmos materiais da ABI-C-CA (AC-Q FIXO), porém em proporções diferentes, o que resultou em porosidades distintas. Ao analisar o MPT médio dos dois traços, ABI-C-CA (AC-Q FIXO) teve maior distanciamento entre o material graúdo, o que pode ter aumentado o tempo de manutenção das bolhas durante a fase de endurecimento.

Na Figura 47, é possível observar que ABC-G-IT possui menor concentração de grãos com dimensão de 100 a 300 μm – faixa da areia de quartzo, comparativamente as demais argamassas com areia de brita de origem granítica.

Este pode ser mais um indício da relevância da composição granulométrica sobre a forma das partículas. Os resultados numéricos individuais encontram-se na Tabela 16, item 10.5 do Apêndice.

Como a argamassa industrializada não apresentava uma composição de cimento conhecida, e esta variável pode influenciar diretamente as propriedades das argamassas no estado endurecido, os resultados obtidos não estão sendo utilizados na composição linha de tendência.

Figura 56. Avaliação da estabilidade do ar com 28 dias de idade

6.5.2 Resistência mecânica

Nos resultados de resistência à tração na flexão e na compressão, foram observados baixa correlação com a porosidade total que está associada com o volume de água e ar incorporado. O conjunto de resultados mostrou que apesar da variação da porosidade total, não houve significativa queda de resistência.

O consumo de água variou em até 16 litros por metro cúbico entre as composições, conforme detalhamento na Tabela 15, item 10.4 do Apêndice, e seguiu a tendência de maiores resultados para menores dosagens de água, mas com pequena variação entre os valores. Apenas ABC-G-SI se destacou com menor resistência à tração na flexão, apesar de não ser a argamassa com maior demanda de água do grupo.

Isso leva a considerar que o desempenho mecânico está ligado ao consumo de água, porém, está predominantemente relacionado com a forma e empacotamento dos agregados ou da origem mineralógica das rochas.

A resistência à tração na flexão não teve correlação com o MPT médio, ao contrário da resistência à compressão, no qual o maior distanciamento entre o material graúdo resultou na queda da resistência.

As composições ABC-G-IT e ABI-C-CA (AC-Q-FIXO) foram as que tiveram melhores desempenhos dentre as argamassas.

Novamente a correlação parece estar ligada à composição granulométrica nos quais argamassas com menores teores de areia de quartzo apresentaram melhores desempenhos mecânicos.

O traço ABI-C-CA (AC-Q-FIXO) comparado ao ABI-C-CA, teve a quantidade de areia de quartzo (AC-Q) reduzida em 6% em massa, que é a areia mais esférica dentre os agregados, e substituída por areias mais graúdas com menor esfericidade. A redução da área específica não impactou a demanda da água, porém impactou positivamente nas resistências mecânicas.

A argamassa industrializada não foi considerada na composição da linha de tendência dos resultados da Figura 57 por ser desconhecida a composição real do produto.

Figura 57. Compressão e Tração na Flexão vs Porosidade (esquerda) e MPT (direita)

6.5.3 Módulo de elasticidade (E)

As argamassas quando aplicadas, sofrem deformações por retração ou térmica que costumam causar fissuração. Entre as características do agregado que afetam o módulo de elasticidade, a porosidade parece ser a mais importante. A porosidade determina sua rigidez que controla a capacidade do agregado em restringir a deformação [MEHTA e MONTEIRO, 2008].

No caso dos revestimentos de argamassa, é desejável que o módulo de elasticidade seja baixo, para reduzir ou evitar a geração de fissuras, fatores que possam comprometer a estanqueidade ou a aderência ao substrato [CARDOSO, 2009].

O resultado deste ensaio é impactado diretamente pelas características do agregado, seja pela forma ou densidade da areia.

Neste estudo, as argamassas com areia de origem calcária apresentaram maiores módulos comparadas as areias de granito e a correlação com a porosidade total foi novamente baixa, similar à comparação com a resistência mecânica.

O maior módulo é coerente visto que a densidade real da areia de brita calcária foi maior que a de origem granítica (Figura 40), somado à sua esfericidade, pode ter gerado melhor empacotamento da formulação.

Visto que não houve grandes variações entre a absorção de água dos materiais conforme expresso na Figura 46, a porosidade da areia não pareceu influenciar o resultado.

Neste comparativo, os agregados de origem granítica atenderam melhor a condição desejada para a argamassa com menor módulo de elasticidade, sem causar queda nas resistências mecânicas. Os resultados numéricos individuais encontram-se na Tabela 16 do Apêndice 10.5.

Assim como a resistência à compressão, este ensaio apresentou boa correlação com o MPT médio, no qual maior distanciamento das partículas resultou em menores módulos de elasticidade.

A argamassa industrializada não foi considerada na composição da linha de tendência dos resultados da Figura 58 por ser desconhecida a composição real do produto.

Figura 58. Módulo de elasticidade vs Porosidade Total (esquerda) e MPT médio (direita)

6.5.4 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar determina o fluxo contínuo de gases na argamassa e a troca de gases na interface do sistema com a atmosfera. Ou seja, influencia a durabilidade pois demonstra o mecanismo de transporte no interior da argamassa, responsável pela sua deterioração.

Neste ensaio foram obtidas duas constantes (k_1 e k_2) e foram correlacionadas com a porosidade aparente das argamassas.

A constante k_1 é associada à perda de energia viscosa durante o escoamento em baixa velocidade e k_2 associada à perda de energia em alta velocidade, intensificada pela turbulência de escoamento e tortuosidade do meio poroso [INNOCENTINI et al, 2002].

Na situação em baixa velocidade, a correlação com a porosidade aparente foi baixa e as composições ABC-G-SI e ABI-G-SI se comportaram de forma similar. Já em alta velocidade, ocorreu maior relação com a porosidade aparente (Figura 59), porém ABC-G-SI se mostrou mais permeável que as demais. Apesar da baixa diferença da relação de aspecto e esfericidade entre as areias de granito, este agregado foi o teve os menores valores de constantes de permeabilidade.

Uma hipótese para o aumento da permeabilidade em alta velocidade estaria associada à forma menos favorável, que além dos vazios do empacotamento, criou espaçamento interfacial entre a matriz e a areia de brita.

A argamassa industrial não foi considerada na formação da linha de tendência por ser desconhecida a composição. Seu comportamento foi inverso ao ABC-G-SI, no qual em alta velocidade (k_2), mostrou não ser influenciado pelo meio poroso.

Da mesma forma que a resistência à compressão e módulo de elasticidade, este ensaio apresentou boa correlação com o MPT médio quando analisado em conjunto com k_2 , no qual maior distanciamento das partículas resultou em maior permeabilidade.

Figura 59. Permeabilidade ao ar vs Porosidade aparente (esquerda) e MPT médio (direita). Acima são ilustrados os resultados de k_1 e abaixo, k_2 .

6.5.5 Resistência de aderência à tração

O ensaio foi preparado e realizado conforme descrito no item 5.9.5. Os substratos foram utilizados secos e limpos para remover o pó da superfície a ser aplicada a argamassa e reduzir possíveis interferência na aderência.

É válido mencionar que o desvio padrão dos resultados entre as argamassas pode ter sido ocasionado por interferência do aplicador e/ou tensões geradas pelo dispositivo de corte (serra copo) durante o preparo do ensaio.

Apesar dessas variáveis, ficou claro o potencial de resistência de aderência conforme demonstrado na Figura 60. As linhas tracejadas nas figuras representam os limites estabelecidos pela NBR 13749:2013 para argamassa de revestimento para parede interna e externa com acabamento em pintura ou base para reboco.

Todas as argamassas formuladas neste trabalho atingiram a resistência mínima para aplicação em parede interna, porém as argamassas compostas com areia de brita de origem calcária obtiveram os melhores desempenhos no ensaio. Os resultados das 8

pastilhas por substrato, bem como a forma de ruptura – que ocorreu predominantemente entre o substrato e a argamassa, estão detalhados no item 10.6 do Apêndice.

As diferenças entre as composições com areia calcária não foram fortemente evidenciadas nos ensaios de resistência tração na flexão ou compressão, mas estas se destacaram na aderência.

Este resultado condiz com o ensaio do *squeeze flow* no qual as duas argamassas tiveram maior espalhamento em baixa velocidade, resultado da forma mais esférica do material. Isso pode ter melhorado a aderência no substrato e na compactação durante a aplicação.

O traço ABC-G-IT teve fluidez inferior às demais argamassas, porém com resultado satisfatório na aderência. Provavelmente este resultado foi regido pelo melhor empacotamento da composição em concordância com os resultados obtidos nos ensaios descritos anteriormente.

Esperava-se que os resultados de arrancamento dos traços ABC-G-SI e ABI-G-SI fossem similares visto que houve paridade entre as argamassas nos ensaios realizados neste trabalho. Para entendimento mais adequado dos valores obtidos, seria necessária a repetição do ensaio para avaliação.

Figura 60. Resultados da resistência de aderência

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos ensaios realizados neste trabalho, a forma das areias de brita afetaram a formulação das argamassas em relação ao consumo de água e nas propriedades no estado fresco.

Na prática, as areias de brita de menor relação de aspecto solicitaram maior demanda de água, maior energia para realizar a mistura e para aplicar o revestimento na parede. Não foi evidenciada forte correlação da forma das areias no bombeamento pois o comportamento no ciclo de cisalhamento foi similar de forma genérica.

No ensaio de espalhamento pelo método de *squeeze flow*, as composições com areias de origem granítica não apresentaram fluxo homogêneo, comparada as areias calcárias. Pode-se deduzir que a diferença de esfericidade entre 0,79 e 0,84 foi representativo neste ensaio.

Dentre as areias de origem granítica, foi baixa a diferenciação em relação à esfericidade e relação de aspecto, porém o espalhamento no *squeeze flow* e reometria rotacional, mostraram que a forma do agregado ABC-G-IT influenciou nos resultados. A composição ABI-G-SI não apresentou a maior esfericidade, mas solicitou menor energia de mistura e menor velocidade de reaglomeração no cisalhamento de desaceleração, dentre todas as areias estudadas.

No estado endurecido, apenas os ensaios de permeabilidade ao ar e resistência de aderência indicaram sofrer interferência da forma das areias. Nos demais ensaios como porosidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade, apontam que outros fatores interferiram nos resultados.

A porosidade não se mostrou sensível à forma das areias e com base nos resultados, inferiu-se que houve influência da composição granulométrica na manutenção das bolhas de ar durante o endurecimento da argamassa.

Na resistência mecânica, apesar da variação da demanda de água, os resultados indicam que possivelmente o empacotamento também influenciou os valores obtidos. O módulo de elasticidade teve correlação direta com a densidade real das areias de brita que constituíam em maior quantidade nos traços.

O ensaio de permeabilidade, quando associada a perda de energia viscosa em alta velocidade (k_2), a forma do ABC-G-SI com a menor relação de aspecto, demonstrou causar maior turbulência no escoamento do ar, possivelmente causado pelo espaçamento interfacial entre a matriz e a areia de brita.

Todas as argamassas formuladas neste trabalho, atenderam o requisito da resistência à aderência para ambiente interno da NBR 13749:2013. Contudo, as areias de origem calcária obtiveram maiores valores. Possivelmente relacionado à baixa demanda de água somada ao maior espalhamento no ensaio *squeeze flow* que melhorou a aderência e compactação durante a aplicação.

Isso não desqualifica as demais areias que também tiveram resultados satisfatórios, mas apresenta desvantagem no custo da formulação da argamassa por demandar maior consumo de cimento para obter a mesma resistência comparada à areia de maior relação de aspecto.

Dessa forma fica a critério da indústria avaliar as vantagens financeiras que envolvem o tratamento da areia de brita para torná-la mais esférica, comparativamente aos ajustes no traço para reduzir a interferência da forma no comportamento reológico da argamassa bem como no resultado de aderência.

Na Tabela 13 são apresentados resumidamente, em quais ensaios a forma dos agregados teve maior impacto nos resultados.

Tabela 13. Resumo dos resultados dos ensaios

	Propriedades	Forma	Observação
Estado Fresco	Consumo de água	✓	Areias de maior relação de aspecto consumiram menos água.
	Reometria compressiva	✓	Areias de maior relação de aspecto tiveram maior espalhamento no <i>squeeze flow</i> a 0,1 mm/s.
	Reometria rotacional Mistura seca	✓	Areias de menor relação de aspecto resultaram em maior torque para mistura.
	Reometria rotacional Mistura úmida	✓	Areias de menor relação de aspecto resultaram em maior torque para mistura.
	Reometria rotacional Ciclo de cisalhamento	✗	Apenas ABC-G-IT solicitou maior torque para iniciar o fluxo e maior torque de escoamento. As demais composições tiveram resultados similares.
Estado Endurecido	Porosidade total	✗	Areias de maior relação de aspecto resultaram em menor PT porém, sem grandes diferenciações de valores.
	Tração na flexão	✗	Não houve grande diferenciação entre os resultados.
	Compressão	✗	Não houve grande diferenciação entre os resultados.
	Módulo de elasticidade	✗	Influenciado pela densidade da rocha
	Permeabilidade k1	✗	Não houve grande diferenciação entre os resultados.
	Permeabilidade k2	✓	Em alta velocidade, houve maior perturbação do meio em composições com menor relação de aspecto.
	Resistência de aderência à tração	✓	Areias de maior relação de aspecto resultaram em maiores resistência e aderência.

8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Durante a dosagem, notou-se que as composições com *filler* de origem granítica, tiveram menores adições do aditivo incorporador de ar. Com base na associação entre o aditivo com as cargas dos íons das diferentes composições mineralógicas do material fino, poderia ser explicada a variação que ocorreu na dosagem.

O próximo passo para validação do uso das areias de menor esfericidade sugerido neste trabalho, seria o estudo em campo com aplicação das argamassas por pedreiro, com o objetivo de coletar informações de interesse prático do usuário final.

A utilização das areias de brita sem tratamento no britador de impacto, resultaria na simplificação do processo produtivo da fábrica de argamassa ou do fornecedor de agregado, pois eliminaria a etapa de arredondamento das partículas.

O resultado seria a eliminação do investimento inicial com britadores, com ajustes apenas nas peneiras para adequar o diâmetro máximo da areia. Neste estudo, mais de 20% da fração mais grossa foi removida para adequação da areia de brita. Este material mais graúdo, compreendido na faixa entre 4,8 mm e 2,0 mm de diâmetro, poderia ser estudado por exemplo, na comercialização para a indústria de artefatos como bloco e piso de concreto.

O aeroclassificador para separação do *filler* e o silo de armazenamento do material ainda se fazem necessários caso a areia de brita não tenha a quantidade de finos suficiente na composição granulométrica para compor o traço.

Outra questão não abordada neste trabalho é o desvio padrão dos produtos produzidos nas pedreiras. A viabilidade do emprego das areias sem a separação por peneiras (média, grossa e *filler*) depende diretamente da entrega do produto sem grandes variações granulométricas para minimizar o impacto nas dosagens das argamassas em escala industrial a fim de manter as propriedades reológicas do material constante.

9 REFERÊNCIAS

ACI CT 13, **ACI Concrete Terminology**. Disponível em: <https://www.concrete.org/portals/0/files/pdf/ACI_Concrete_Terminology.pdf>.

Acesso em: 10 de outubro de 2018.

AMORIM, L.V.; GOMES, C.M.; SILVA, F.L.H.; FERREIRA, H.C. **Comportamento reológico de dispersões de argilas bentoníticas: efeito do tipo de ferramenta, velocidade e tempo de agitação**. *Cerâmica*, 48 (308), p. 75-85, 2002.

ANEPAC, **Areia**. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita/item/136-areia>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2018.

ANEPAC. **Brita**. Disponível em: < <http://www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita/item/137-brita>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2019.

ANEPAC. Mercado. **Perspectivas para o Setor de Agregados**. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2019.

ANUÁRIO mineral brasileiro 2009. *DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral*, Brasília, v.35, 2009. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2009>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

ANUÁRIO mineral brasileiro 2010. *DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral*, Brasília, v.35, 2010. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2010>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

ALVES, N. J. D; **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2002, 175p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 13753: Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 15630: Argamassa de assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método Squeeze-flow.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR NM 15: Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 16: Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidro sulfúrico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

_____. **NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

_____. **NBR NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação de tempo de pega.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BANFILL, P.F.G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials, v.8, n.1, p.43-50. 1994.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007, 188p.

BRIGGS, C; EVERTSSON, C.M; **Shape potential of rock**. Miner Eng. 11 (2), p. 125 – 132, 1998.

CARDOSO, F.A. **Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009, 158p.

CASALI, J. M. **Estudo da Interação Entre a Argamassa de Assentamento e o Bloco de Concreto Para Alvenaria Estrutural: transporte de água e aderência**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008, 348p.

CHANDRA, S.; OHAMA, Y. **Polymers in concrete**. Boca Raton: CRC Press, 1994. 204p.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 127p.

Dados Cartográficos Google. (2020). **Google Maps. Google**. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1fBsmYUwJgvxAT1sEXOkQYmDw1iyteKU&ll=-23.443654944386736%2C-47.75229493749998&z=9>. Acesso em: 03 de agosto de 2020.

DAMINELI, B.L.; **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: Controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, 237p.

FUKUI, E; TANABE, A; SILVA, I.J; PILEGGI, R.G; JOHN, V.M; **CO₂ liberado na produção de argamassas**. In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. ISSN 2238-0191. 2013. Disponível em:

<<https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/568-co2-liberado-na-producao-de-argamassas>>. Acesso em: 23 de outubro de 2018.

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

INNOCENTINI, M. D. M., ROMANO. R. C. O., SCHREURS, H., RODRIGUES, V. P., COURRY, J. R., PILEGGI, R. G. **Otimização da permeabilidade de filtros de aerossóis para altas temperaturas preparados a partir da técnica de adição de espuma aquosa em suspensão cerâmica**. Cerâmica 55, p. 67-77, 2009.

INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A.R.F.; SALVINI, V.R.; PANDOLFELLI, V.C. **Previsão da permeabilidade a partir de propriedades físicas de concretos refratários**. Cerâmica 48, nº 305, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132002000100003&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

IPT; **Relatório Técnico 17501-301 – Ordenamento Territorial Geomineiro do Município de Bofete**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2009, 99p.

KHAYAT, Kamal H. **Viscosity-Enhancing Admixtures for Cement-Based Materials - An Overview**. Cement and Concrete Composites, v.20, p.171-188, 1998.

KIGANDA, A. **Global Construction Aggregates Market to Value US\$ 350.2Bn in 2016**. Disponível em: <<https://constructionreviewonline.com/2016/08/global-construction-aggregates-market-value-us-350-2bn-2016/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Comunicação Técnica (Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia). Rio de Janeiro, cap.4, p.161-180, 2010.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, 3ª Edição. São Paulo, p. 292-299, 2008.

OHAMA, Y. **Polymer-based admixture**. Cement and Concrete Composites. V20, p. 189-212, 1998. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946597000656>>. Acesso em: 23 de outubro de 2018.

OLIVEIRA, R. I; STUDART, A.R; PILEGGI, R.G; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas. Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Ed. Fazendo Arte Editorial, 2000. 195p.

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. Tese (Doutorado) - Programa e Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2001, 204p.

PILEGGI, R.G; STUDART, A.R; GALLO, J; PANDOLFELLI, V.C. **How mixing affects the rheology of refractory castables, Parts I and II**. American Ceramic Society Bulletin v. 80 (6), p. 27-31, (7) p. 38-42, 2001.

REBMANN, M.S.; **Robustez de concreto com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica morfológica dos agregados**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016, 252p.

ROMANO, R.C.O; **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, 227p.

ROMANO, R. C. O. **Produção e caracterização de materiais porosos obtidos pelo método de incorporação de espumas**. Dissertação. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005, 171p.

RUBIN, A. P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise de desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015, 153p.

SABBATINI, F.H.; SELMO, S.M.S.; SILVA, M.M.A. **Conceitos básicos sobre a execução de revestimentos argamassados**. Apostilha interna: Universidade de São Paulo, p. 31, 1999.

SHEN, W; YANG, Z; CAO, L; CAO, L; LIU Y; YANG, H; LU, Z; BAI, J; **Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete**. Construction and Building Materials, 114, p. 595-601, 2016.

SUPEKAR, V.R; KUMBHAR, P. D; **Properties of concrete by replacement of natural sand with artificial sand**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Fayoum City, v. 1, Nº 7, 2012.

SVENSSON, A.; STEER, J.F. **New cone crusher technology and developments in comminution circuits**. Minerals Engineering. v.3, p. 83-103, 1990.

TORRES, D. R; ROMANO, R.C.O; PILEGGI, R.G. **Influência da distribuição morfológica dos agregados nas propriedades reológicas de argamassas de revestimento**. In: XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. 2017. Disponível em: <<https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/604-argamassas-de-revestimento-distribuicao-morfologica-dos-agregados-propriedades-reologicas>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2019.

WILLS, M.H. **How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength**. J. Mater. 2 (4), p. 101-111, 1967.

YAMEI, H; LIHUA, W; **Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete**. Procedia Engineering 210, p. 87-92, 2017.

10 APÊNDICES

10.1 GRANULOMETRIA DAS AREIAS APÓS PENEIRAMENTO NA #2,0 MM

Tamanho da Partícula (µm)	VOLUME RETIDO (%)					
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	AC-Q	ABI-C-CA (M)	ABI-C-CA (G)
0,38	0,01	0,01	0,01	-	-	-
0,46	0,02	0,02	0,02	-	-	-
0,54	0,04	0,03	0,03	-	-	-
0,64	0,06	0,05	0,05	-	-	-
0,77	0,09	0,07	0,08	-	-	-
0,91	0,13	0,09	0,11	-	-	-
1,08	0,17	0,12	0,15	-	-	-
1,29	0,21	0,15	0,18	-	-	-
1,53	0,23	0,17	0,20	-	-	-
1,82	0,25	0,18	0,22	-	-	-
2,17	0,26	0,20	0,22	-	-	-
2,58	0,28	0,22	0,24	-	-	-
3,07	0,30	0,24	0,25	-	-	-
3,65	0,32	0,26	0,27	-	-	-
4,34	0,34	0,28	0,29	-	-	-
5,16	0,37	0,31	0,32	-	-	-
6,13	0,41	0,35	0,35	-	-	-
7,29	0,45	0,40	0,39	-	-	-
8,67	0,51	0,46	0,44	-	-	-
10,3	0,59	0,54	0,50	-	-	-
12,3	0,67	0,62	0,58	-	-	-
14,6	0,74	0,68	0,64	-	-	-
17,3	0,85	0,77	0,73	-	0,01	-
20,6	1,01	0,91	0,86	-	0,01	-
24,6	1,14	1,03	0,98	-	0,02	-
29,2	1,28	1,17	1,10	-	0,03	-
34,7	1,43	1,32	1,23	-	0,05	0,01
41,2	1,61	1,49	1,39	0,01	0,08	0,01
48,8	1,68	1,54	1,45	0,01	0,12	0,02
57,8	1,97	1,78	1,70	0,03	0,19	0,04
68,7	2,20	1,94	1,89	0,07	0,25	0,04
82,2	2,50	2,14	2,14	0,22	0,35	0,05
97,7	2,26	1,89	1,93	0,55	0,42	0,05
115	2,08	1,77	1,77	1,49	0,54	0,04
137	2,04	1,92	1,66	5,37	0,84	0,03
164	2,22	2,52	1,85	16,8	1,15	0,02
195	2,35	2,72	2,05	24,7	1,32	0,01
230	2,77	2,99	2,41	23,4	1,63	0,01
274	3,57	3,60	3,12	15,4	2,21	0,01
326	3,67	3,56	3,28	5,88	2,57	0,01
388	4,19	3,96	3,84	2,72	3,30	0,01
461	3,95	3,74	3,67	1,49	3,69	0,01
548	4,53	4,36	4,29	0,84	5,24	0,02
653	4,21	4,06	4,16	0,32	5,74	0,03
777	4,60	4,66	4,78	0,28	7,77	0,05
922	4,73	4,76	5,07	0,15	8,15	0,08
1086	5,21	5,25	5,67	0,17	9,76	0,20
1285	5,73	5,98	6,51	0,08	12,0	0,67
1543	6,16	6,26	6,85	0,03	15,6	4,76
1844	4,61	5,07	5,08	-	11,3	16,6
2173	4,61	4,99	5,24	-	4,85	32,6
2571	3,16	4,03	4,56	-	0,72	32,0
3063	1,04	1,92	2,35	-	-	10,9
3661	0,21	0,38	0,70	-	-	1,70
4359	0,01	0,05	0,17	-	-	-
TOTAL	100	100	100	100	100	100

10.2 GRANULOMETRIA DO FILLER CALCÁRIO E CP II-F-40

Tamanho da Partícula (μm)	VOLUME RETIDO (%)	
	Filler	CP II-F-40
0,23	0,03	0,05
0,27	0,09	0,14
0,32	0,18	0,24
0,38	0,28	0,35
0,46	0,43	0,51
0,54	0,61	0,67
0,64	0,79	0,84
0,77	0,98	1,01
0,91	1,17	1,17
1,08	1,34	1,31
1,29	1,45	1,40
1,53	1,58	1,54
1,82	1,77	1,73
2,17	2,02	1,96
2,58	2,35	2,24
3,07	2,70	2,54
3,65	3,10	2,89
4,34	3,54	3,28
5,16	3,98	3,72
6,13	4,25	4,21
7,29	4,57	4,77
8,67	4,82	5,37
10,3	4,93	5,91
12,3	4,94	6,50
14,6	4,85	6,92
17,3	4,69	7,04
20,6	4,52	6,71
24,6	4,30	5,93
29,2	4,07	4,82
34,7	3,80	3,55
41,2	3,37	2,50
48,8	3,33	1,95
57,8	3,16	1,48
68,7	3,09	1,21
82,2	2,55	0,91
97,7	2,29	0,77
115	2,01	0,69
137	1,26	0,54
164	0,65	0,35
195	0,15	0,19
230	0,00	0,09
TOTAL	100	100

10.3 PARÂMETROS DE MOBILIDADE

Figura 61. Parâmetros de mobilidade das composições em função da distribuição granulométrica

10.4 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

A dosagem iniciou com a pesagem de 2500 gramas de material seco, a partir das proporções encontradas na aproximação da curva da argamassa experimental com a argamassa de referência, conforme ilustrado na Figura 47. A quantidade de água e aditivo incorporador de ar (AIA) e celulósico foram fixos e calculados com base na massa total de materiais secos.

O traço ajustado da composição ABI-C-CA serviu como referência inicial para criação da dosagem ABI-C-CA (AC-Q FIXO) e por este motivo não há dados da abertura da argamassa com 15% de água.

Tabela 14. Dosagem inicial das argamassas para 2.500 gramas de material seco

MATERIAL (g)	COMPOSIÇÕES				
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA	Arg Ind
Cimento	450	450	450	450	
Filler	175	175	175	450	
Areia de quartzo (AC-Q)	700	700	700	850	
Areia de brita	1.175	1.175	1.175	-	
ABI-C-CA Média	-	-	-	625	
ABI-C-CA Grossa	-	-	-	125	
AIA (0,025%)*	0,625	0,625	0,625	0,625	
Celulósico (0,02%)*	0,500	0,500	0,500	0,500	
TOTAL	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
Água inicial* - 15% sobre a massa seca (g)	375	375	375	375	375
Densidade teórica (g/cm³)	2,27	2,26	2,24	2,27	2,31
Densidade real (g/cm³)	1,76	1,88	1,81	1,97	1,71
Teor de ar incorporado inicial (%)	22,4	16,7	19,4	13,0	26,2
Abertura 1	220	205	200	240	265
Abertura 2	205	220	210	250	270
Abertura 3	210	210	225	230	260
Abertura Média (mm)	212	212	212	240	265

*As quantidades foram calculadas sobre o valor da massa seca total

Tabela 15. Dosagem final das argamassas (kg/m³)

MATERIAL	COMPOSIÇÕES				
	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA	ABI-C-CA (AC-Q FIXO)
CP II-F-40	277	272	278	284	281
<i>Filler</i> calcário	108	106	108	284	281
<i>Filler</i> granítico*	205	186	176	-	-
Areia de Quartzo (AC-Q)	431	423	432	536	438
Areia de Brita	518	523	549	-	-
ABI-C-CA (Média)	-	-	-	394	453
ABI-C-CA (Grossa)	-	-	-	79	109
Água	255	251	247	241	239
Incorporador de ar**	0,38	0,38	0,68	0,69	0,69
Celulósico**	0,31	0,30	0,31	0,32	0,31
Ar (%)	20	21	19	20	20

* *Filler* granítico considerado como material passante na peneira de abertura 106 µm

** Aditivo dosado sobre a massa seca total dos materiais

10.5 RESULTADOS INDIVIDUAIS NO ESTADO ENDURECIDO

Tabela 16. Resultados numéricos individuais da tração na flexão, compressão, módulo de elasticidade, porosidade aparente e total.

Ensaio	ABI-G-SI	ABC-G-SI	ABC-G-IT	ABI-C-CA	ABI-C-CA (AC-Q FIXO)	Arg Ind
Tração na Flexão	4,45	2,80	4,62	4,01	4,80	2,96
	3,91	3,67	4,80	4,60	4,91	2,95
	4,24	3,54	4,65	4,36	4,69	3,28
Média (MPa)	4,20	3,33	4,69	4,32	4,80	3,07
Sd	0,27	0,47	0,10	0,30	0,11	0,19
Resistência à Compressão (MPa)	11,25	12,05	9,62*	12,74	12,98	6,91
	9,72*	11,98	13,02	13,17	13,98	6,73
	12,50	12,12	13,15	17,02	14,80	6,76
	12,54	12,42	13,36	16,46	12,63	6,07
	12,68	11,72	12,78	11,24	14,21	7,47
	11,78	11,70	13,46	12,66	12,89	7,00
Média (MPa)	11,75	12,00	12,56	13,88	13,58	6,82
Sd	1,13	0,27	1,46	2,32	0,87	0,45
Módulo de elasticidade (GPa)	13,09	13,71	15,11	17,99	17,30	10,69
	13,69	13,74	14,17	18,11	18,08	10,20
	13,87	13,75	14,22	17,81	17,33	10,56
Média (GPa)	13,55	13,73	14,50	17,97	17,57	10,48
Sd	0,41	0,02	0,53	0,15	0,44	0,26
Porosidade Aparente (%)	25,60	25,15	24,60	22,10	22,57	19,42
	24,56	25,27	23,26	21,70	21,72	23,43
	25,39	24,77	23,26	22,30	23,43	19,22
Média	25,18	25,06	23,94	22,03	22,57	19,30
Sd	0,005	0,003	0,007	0,003	0,009	0,001
Porosidade Total (%)	38,48	39,78	39,39	36,48	37,47	40,04
	38,91	38,97	38,99	35,41	39,76	37,78
	39,24	39,07	39,38	37,15	37,78	40,27
Média	38,88	39,27	39,25	36,35	38,34	39,62
sd	0,38	0,44	0,23	0,88	1,24	0,93

*Valores que destoaram consideravelmente da maioria dos resultados do grupo à que pertence.

10.6 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO INDIVIDUAL

Tabela 17. Resistência de aderência à tração ABI-G-SI

ABI-G-SI	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	250	1963,5	0,16	Sub/Arg
2	590		0,30	Argamassa
3	530		0,27	Sub/Arg
4	320		0,16	Sub/Arg
5	430		0,22	Sub/Arg
6	190		0,10	Sub/Arg
7	420		0,21	Sub/Arg
8	390		0,20	Sub/Arg
Média	390		0,20	
Desvio Padrão	135		0,03	

Tabela 18. Resistência de aderência à tração ABC-G-SI

ABC-G-SI	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	600	1963,5	0,31	Argamassa
2	570		0,29	Sub/Arg
3	440		0,22	Sub/Arg
4	490		0,25	Sub/Arg
5	1120		0,57	Sub/Arg
6	660		0,34	Sub/Arg
7	820		0,42	Sub/Arg
8	790		0,40	Sub/Arg
Média	686		0,35	
Desvio Padrão	220		0,11	

Tabela 19. Resistência de aderência à tração ABC-G-IT

ABC-G-IT	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	860	1963,5	0,44	Sub/Arg
2	980		0,50	Sub/Arg
3	920		0,47	Sub/Arg
4*	2100		1,07	Sub/Arg
5	930		0,47	Sub/Arg
6	970		0,49	Sub/Arg
7	1110		0,57	Sub/Arg
8	1030		0,52	Sub/Arg
Média	971		0,49	
Desvio Padrão	406		0,04	

4* valor removido da média por se destoar isoladamente dos demais resultados.

Tabela 20. Resistência de aderência à tração ABI-C-CA

ABI-C-CA	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	1350	1963,5	0,69	Sub/Arg
2	1270		0,65	Sub/Arg
3	1250		0,64	Argamassa
4	1280		0,65	Sub/Arg
5	1220		0,62	Argamassa
6	1670		0,85	Argamassa
7	1780		0,91	Argamassa
8	1670		0,85	Argamassa
Média	1436		0,73	
Desvio Padrão	229		0,12	

Tabela 21. Resistência de aderência à tração ABI-C-CA (AC-Q FIXO)

ABI-C-CA (AC-Q FIXO)	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	1140	1963,5	0,58	Argamassa
2	1290		0,66	Argamassa
3	1040		0,53	Argamassa
4	1430		0,73	Argamassa
5	1130		0,58	Sub/Arg
6	1340		0,68	Argamassa
7	1390		0,71	Argamassa
8	1120		0,57	Sub/Arg
Média	1235		0,63	
Desvio Padrão	145,11		0,07	

Tabela 22. Resistência de aderência à tração Arg Ind

Arg Ind	Carga de Ruptura (N)	Área (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	180	1963,5	0,09	Sub/Arg
2	350		0,18	Argamassa
3	320		0,16	Sub/Arg
4	150		0,08	Argamassa
5	280		0,14	Argamassa
6	570		0,29	Argamassa
7	410		0,21	Argamassa
8	340		0,17	Argamassa
Média	325		0,17	
Desvio Padrão	132		0,07	