



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO CORTE DE  
MÁRMORE E GRANITO (RCMG) NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS  
DE CIMENTO PORTLAND

Elenice Carmo de Abreu Apolinário

Salvador  
2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO CORTE DE  
MÁRMORE E GRANITO (RCMG) NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS  
DE CIMENTO PORTLAND**

Elenice Carmo de Abreu Apolinário

Dissertação apresentada ao  
Programa de Mestrado em Engenharia  
Ambiental Urbana da Universidade Federal  
da Bahia, como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro

Salvador  
2014

---

A643 Apolinário, Elenice Carmo de Abreu.

Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland / Elenice Carmo de Abreu Apolinário. – Salvador, 2014.

193f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Argamassa. 2. Mármore. 3. Granito. 4. Desempenho. I. Ribeiro, Daniel Vêras. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 691.2

---

## **DEDICATÓRIA**

Eu dedico esta pesquisa aos meus pais, Dilson e Luzia, como retribuição ao amor que sempre recebi durante toda esta existência e a minha avó Aracy, que, mesmo distante, está sempre presente me auxiliando.

## **VITAE DA CANDIDATA**

Arquiteta e Urbanista formada pela Universidade de Alfenas, UNIFENAS - 1999  
Especialista em Design de Produto formada pela Universidade Estadual da Bahia, UNEB - 2007.



MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

---

**ELENICE CARMO DE ABREU APOLINÁRIO**

---

APRESENTADA AO PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 17 DE MARÇO DE 2014.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro  
Orientador / MEAU - UFBA

---

Profa. Dra. Vanessa Silveira Silva  
MEAU - UFBA

---

Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli  
MEAU - UFBA / PPGCEM - UFSCar

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima  
PPGECEA – UEFS





*“As coisas mais importantes da vida são os aprendizados que levamos para a eternidade com o decorrer da experiência.”*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela possibilidade desta experiência;

À família Shamballa, pelo eterno amor incondicional;

À família Gaia, pelo apoio em todas as horas, em especial à Ramana e Philippe, pelo crescimento diário;

Aos meus pais, Dilson e Luzia, aos meus irmãos, Dilson Jr., Eliane e Gláucio, aos meus sobrinhos, Amanda, Luciana, Dilson Neto e Arthur e a minha cunhada Juliana, pelo amor, a presença, o apoio e a força, mesmo distante;

Ao meu orientador, Daniel Vêras Ribeiro, por toda disponibilidade e auxílio;

Aos professores de todas as bancas, Ricardo Carvalho, Vanessa Silva, Márcio Morelli e Paulo Lima;

Aos professores, Lúcia Carvalho e Jardel Gonçalves, por me auxiliarem durante o processo seletivo;

Aos colegas e professores do MEAU, por fazerem parte desta jornada;

À Continmassa, Márcio Tourinho, por patrocinar a argamassa industrializada;

À Recycle, Olyntho, pela disponibilidade e doação do RCMG;

À LC Lacrose Engenharia, por realizar o ensaio de RAA, em especial, Marcelo Avena pela oportunidade e Kércio Sampaio, por me ajudar todo tempo;

Ao Laboratório LAFSCer/UFSCar, pelas análises dos agregados, em especial, prof. Márcio Morelli e Walter Mariano pela execução dos ensaios;

Aos componentes do CETA, Fernanda, Tony e em especial, Paulo Sant`ana, pelo grande auxílio prestado à pesquisa e disponibilidade para tudo;

Ao laboratório Timoshenko, em especial Maia, pela disponibilidade prestada;

Ao laboratório NTPR, pelas análises de ultrassom;

À Vanessa e Gabriel por serem partes fundamentais desta pesquisa e contribuírem diretamente para que ela chegasse ao fim, muito obrigada;

Aos componentes do LEDMA e GEMAC, Felipe Cedrim, Saulo, Vitor, Thaís, Manuella, Felipe, Ivan, Thiago, Renata, Luiz, Jânimo e Uésley, que também fizeram parte desta pesquisa, me auxiliando em muitos momentos;

E aos colegas, Alessandra, Adilson, Catharine, Francisco Gabriel e Bruno, pela amizade e apoio nas horas difíceis. Muito obrigada a todos!



## RESUMO

A construção civil é o principal consumidor de recursos naturais do planeta e um dos maiores desafios contemporâneos é conciliar esta demanda com o desenvolvimento sustentável. Portanto, a utilização de materiais alternativos pode contribuir para minimizar os impactos ambientais e, ainda, melhorar a qualidade dos materiais. Neste trabalho, avaliou-se o comportamento do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), quando adicionado às argamassas comuns de cimento Portland, mistas (cimento e cal) e industrializadas, nos teores de 5% 10% e 15% em relação à massa de cimento. Como parâmetro, foi fixada a relação água/cimento em 0,59 e as argamassas foram analisadas nos estados fresco, endurecido e aplicado, assim como a durabilidade dessas. No primeiro, foram determinados: a densidade de massa, o teor de ar incorporado, a retenção de água e as propriedades reológicas foram avaliadas por meio dos ensaios de abatimento de tronco de cone (*flow table*), *squeeze-flow* e reometria. No estado endurecido, foram realizados ensaios para a determinação das propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão, à compressão axial e à tração por compressão diametral) e físicas (absorção de água por capilaridade, absorção de água, índice de vazios, massa específica e velocidade de propagação de onda ultrassônica). No estado aplicado, foram realizados ensaios aos 28 dias, de acordo com a normalização nacional, para determinação da dureza superficial por meio do esclerômetro de reflexão, além da resistência de aderência à tração e da absorção de água sob baixa pressão (pipeta de Kirsten). A durabilidade foi avaliada mediante os ensaios de expansibilidade de Le Chatelier e reatividade álcali-agregado (RAA). Os resultados obtidos indicaram que o melhor teor de adição para as argamassas simples e mistas foi de 10% de RCMG e para as argamassas industrializadas foi de 5% de RCMG, atestando que este pode ser utilizado como *filler* em matrizes cimentícias.

**Palavras-chave:** Argamassa, resíduo de corte de mármore e granito, desempenho, propriedades, durabilidade.



## INFLUENCE OF THE ADDITION OF WASTE MARBLE AND GRANITE DUST (WMGD) IN THE PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT MORTAR

### ABSTRACT

Construction is the main consumer of planet's natural resources, and one of the greatest challenges nowadays is to conciliate its demand with sustainable development. Therefore, the use of alternative materials can contribute to minimize environmental impacts and to improve the quality of the materials. In this paper, the behavior of Portland cement mortars was evaluated (simple blended, mixed blended - cement and lime – and industrialized) , when both waste marble and granite dust (WMGD) were mixed together, in amounts of 5%, 10% and 15% of cement mass. The water/cement ratio was set at 0.59 and the mortars were analyzed at fresh, hardened and applied states, and their durability was also analysed. At first the mass density, air content and water retention were determined. Then the rheological behavior was evaluated by the flow table, squeeze-flow and the rheometry. In the hardened state, tests were performed to determine the mechanical properties (flexural strength, compressive strength and diametric compression strength) and physical properties (water absorption, void ratio, density and velocity of ultrasonic wave). In applied state, tests were realized in 28 days, in accordance with Brazilian national standards, to determine superficial hardness through sclerometer, beyond tensile bond strength and water absorption under low pressure (pipette Kirsten). The durability was assessed by Le Chatelier expansion and alkali-aggregate reactivity (AAR). The results indicated that the best content added for simple and mixed mortars was 10% WMGD and for industrialized mortars was 5% WMGD, stating that it can be used as filler in cement matrices.

**Keywords:** Mortar, waste marble and granite dust, performance, properties, durability.





## SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	33
1.1 Objetivos.....	35
1.1.1 Objetivo geral.....	35
1.1.2 Objetivos específicos.....	35
1.1.3 Hipóteses.....	36
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	37
2.1 A indústria de mármore e granitos .....	37
2.2 Argamassas de cimento Portland .....	42
2.2.1 Argamassas para assentamento de alvenaria.....	43
2.2.2 Argamassa de revestimento .....	44
2.2.3 Componentes das argamassas .....	45
2.2.3.1 Cimento Portland .....	45
2.2.3.2 Cal.....	48
2.2.3.3 Areia.....	50
2.2.3.4 Água.....	51
2.2.3.5 Aditivos químicos .....	51
2.2.3.6 Adições minerais.....	52
2.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco.....	54
2.2.4.1 Reologia.....	54
2.2.4.2 Retenção de água.....	62
2.2.4.3 Conteúdo de ar incorporado .....	63
2.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido.....	64
2.2.5.1 Resistência mecânica .....	64

2.2.5.2	Retração .....	65
2.2.5.3	Permeabilidade.....	65
2.2.6	Propriedades das argamassas no estado aplicado.....	66
2.2.6.1	Aderência .....	67
2.2.6.2	Elasticidade .....	68
2.3	Uso do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG).....	69
2.3.1	Uso do RCMG como adição em matrizes cimentícias .....	69
2.3.1.1	Uso do RCMG como substituição ao aglomerante em matrizes cimentícias.....	71
2.3.1.2	Uso do RCMG como substituição à areia em matrizes cimentícias.....	72
2.3.2	Considerações .....	73
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS .....	75
3.1	Materiais.....	75
3.1.1	Cimento Portland .....	75
3.1.2	Areia.....	75
3.1.3	Água de amassamento .....	76
3.1.4	Resíduo de corte de Mármore e Granito (RCMG).....	76
3.1.5	Argamassa industrializada .....	79
3.1.6	Cal.....	79
3.1.7	Aditivo .....	79
3.2	Métodos .....	79
3.2.1	Caracterização das matérias primas.....	81
3.2.1.1	Massa específica e densidade real .....	81
3.2.1.2	Massa unitária .....	81
3.2.1.3	Distribuição do tamanho de partículas .....	82

3.2.1.4	Área superficial específica .....	83
3.2.1.5	Materiais pulverulentos .....	83
3.2.1.6	Composição química.....	84
3.2.1.7	Identificação de fases .....	84
3.2.2	Desenvolvimento e formulação das argamassas .....	85
3.2.2.1	Argamassa simples.....	85
3.2.2.2	Argamassa mista .....	87
3.2.2.3	Argamassa industrializada .....	88
3.2.3	Caracterização das argamassas no estado fresco .....	89
3.2.3.1	Índice de consistência – flow table.....	90
3.2.3.2	Avaliação reológica por meio do squeeze-flow .....	91
3.2.3.3	Avaliação reológica por meio do reômetro.....	93
3.2.3.4	Retenção de água.....	97
3.2.3.5	Densidade de massa .....	99
3.2.4	Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	100
3.2.4.1	Resistência mecânica .....	100
3.2.4.2	Velocidade de propagação de onda ultrassônica e Módulo de elasticidade .....	103
3.2.4.3	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	105
3.2.5	Análise de durabilidade .....	106
3.2.5.1	Absorção de água por capilaridade.....	106
3.2.5.2	Reatividade álcali-agregado (RAA).....	108
3.2.5.3	Expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier.....	111
3.2.6	Caracterização das argamassas no estado aplicado .....	112
3.2.6.1	Dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão .....	112

3.2.6.2	Resistência de aderência à tração .....	114
3.2.6.3	Absorção de água sob baixa pressão. ....	116
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	119
4.1	Caracterização das matérias primas .....	119
4.2	Caracterização das argamassas simples (AS).....	123
4.2.1	Caracterização das argamassas simples (AS) no estado fresco .... .....	123
4.2.1.1	Índice de retenção de água das argamassas simples (AS)...	124
4.2.1.2	Teor de ar incorporado e densidade de massa das argamassas simples (AS). ....	124
4.2.1.3	Determinação das propriedades reológicas das argamassas simples (AS) .....	126
4.2.2	Caracterização das argamassas simples (AS) no estado endurecido.....	131
4.2.2.1	Caracterização Mecânica das argamassas simples (AS).....	131
4.2.2.2	Caracterização física das argamassas simples (AS).....	134
a)	Índice de vazios, porosidade e densidade aparentes das argamassas simples (AS) .....	134
b)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas simples (AS).....	136
c)	Absorção de água por capilaridade das argamassas simples (AS) .....	138
4.2.3	Caracterização das argamassas simples (AS) no estado aplicado. .....	140
4.2.3.1	Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão das argamassas simples (AS) .....	140
4.2.3.2	Resistência de aderência à tração das argamassas simples (AS) .....	141

4.2.3.3	Absorção de água sob baixa pressão (RILEM) nas argamassas simples (AS) .....	144
4.2.4	Considerações sobre as argamassas simples (AS) .....	144
4.3	Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI).... .....	146
4.3.1	Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado fresco .....	146
4.3.1.1	Índice de retenção de água das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) .....	147
4.3.1.2	Teor de ar incorporado e densidade de massa das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) .....	148
4.3.1.3	Determinação das propriedades reológicas das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) .....	149
4.3.2	Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado endurecido .....	156
4.3.2.1	Caracterização Mecânica das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI).....	156
4.3.2.2	Caracterização Física das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI).....	159
	a) Índice de vazios, porosidade e densidade aparentes das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) .....	159
	b) Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI). .....	161
	c) Absorção de água por capilaridade das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) .....	163
4.3.3	Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado aplicado .....	164

4.3.3.1	Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) .....	165
4.3.3.2	Resistência de aderência à tração das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) .....	166
4.3.3.3	Absorção de água sob baixa pressão (RILEM) nas argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) .....	168
4.4	Avaliação da Durabilidade das Argamassas .....	169
4.4.1	Expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier (NBR 11582:2012) .....	169
4.4.2	Avaliação das Reações Álcalis-Agregado (RAA) .....	171
4.5	Considerações finais .....	172
5	CONCLUSÕES .....	175
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	177
7	REFERÊNCIAS .....	179

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Fluxograma das etapas de geração do RCMG.....	39
Figura 2: Fotos referentes às etapas geração do RCMG; A) Extração das rochas na pedreira, B) Corte dos blocos de rocha na serraria, C) Acabamento final na marmoraria, D) Depósito de lama gerado nas pedreiras depositado a céu aberto.....	39
Figura 3: Tipos de teares utilizados no corte de mármore e granitos, A) Tear de fios diamantados, B) Corte da rocha com tear de fios diamantados, C) Tear composto por multilâminas de aço, D) Vista aproximada das multilâminas de aço. ....	40
Figura 4: Etapas do tratamento de efluentes, A) Decantação dos efluentes com a separação do resíduo, B) Secagem do resíduo fino de rochas. ....	41
Figura 5: Tipos de revestimento, A) Revestimento com várias camadas (chapisco, emboço e reboco), B) Revestimento com camada única, C) Revestimento decorativo monocamada (RDM). ....	44
Figura 6: Esquema do MgO hidratado gerando expansão de volume e resultando em fissuras nas argamassas.....	47
Figura 7: Partícula sólida esférica introduzida em um líquido viscoso .....	55
Figura 8: Curva de fluxo de alguns tipos de fluidos dependentes da taxa de cisalhamento.....	56
Figura 9: Comportamento dos fluidos conforme o modelo de Bingham; A) Curva de fluxo B) Curva de viscosidade.....	58
Figura 10: Molhagem do sólido por um líquido e as tensões atuantes .....	62
Figura 11: Etapas do processo de chegada de chapas brutas na marmoraria, A) Chegada das chapas, B) Depósito das chapas brutas. ....	77
Figura 12: Processo de cortes lineares em serras de diamante, A) Máquina de corte serrando a chapa bruta, B) Detalhe da serra com disco de diamante. ....	77

Figura 13: Processo de acabamento final na marmoraria, A) Acabamento lateral por meio de discos, B) Acabamento de cantos arredondados por meio do rebolo.....	78
Figura 14: Fluxograma do projeto experimental. ....	80
Figura 15: Etapas do ensaio de <i>flow table</i> , A) Mesa de espalhamento com a forma tronco-cônica e o soquete, B) Argamassa após a retirada do molde, C) Argamassa espalhada após o término dos impactos. ....	90
Figura 16: Gráfico típico de carga em função do deslocamento em um ensaio de <i>squeeze-flow</i> realizado com velocidade controlada. ....	91
Figura 17: Ensaio de <i>squeeze-flow</i> antes e após a compressão.....	92
Figura 18: Sequência do ensaio de <i>squeeze-flow</i> , A) Base para a argamassa com a punção, B) Forma preenchida com argamassa, C) Argamassa após a retirada da forma, D) Base com argamassa e a punção na posição de início de ensaio, E) Argamassa após a compressão.....	93
Figura 19: A) Componentes do reômetro ; B) Vista superior do reômetro com argamassa; C) Detalhe da garra utilizada para rotacionar a argamassa.....	94
Figura 20: Rotina da frequência em função do tempo utilizada no reômetro. ..	95
Figura 21: Modelo de Bingham na determinação de parâmetros proporcionais à tensão de escoamento ( $g$ ) e da viscosidade plástica ( $h$ ); A) Gráfico de torque em função da velocidade indicando a aceleração e a desaceleração do reômetro B) Gráfico de torque em função da velocidade mostrando a reta de tendência durante o período de desaceleração (retorno) do reômetro.....	96
Figura 22: Aparato para ensaio de retenção de água composto por funil de <i>Büncher</i> , frasco <i>Kitasato</i> e bomba à vácuo.....	97
Figura 23: Etapas de ensaio de retenção de água, A) Funil de Büchner com papel filtro levemente umedecido após a pesagem inicial, B) Funil com argamassa sendo adensado, C) Funil com argamassa sendo rasado com espátula, D) Funil sendo pesado com argamassa antes da sucção de água, E) Funil com argamassa conectado ao frasco <i>Kitasato</i> por meio de uma mangueira e interligado a bomba à vácuo (lado esquerdo).....	98



- Figura 24: Etapas do ensaio de densidade no estado fresco, A) Recipiente vazio, B) Recipiente com argamassa durante o adensamento, C) Recipiente com argamassa após o adensamento. .... 99
- Figura 25: Sequência de rompimento do corpo de prova prismático, A) Corpo de prova na posição de rompimento, B) Corpo de prova sendo rompido no centro, C) Metade do corpo de prova na posição de compressão axial, D) Corpos de prova após a compressão axial. .... 101
- Figura 26: Ensaio de resistência a compressão diametral, A) Corpo de prova cilíndrico antes do ensaio, B) Corpo de prova rompido após o ensaio. .. 102
- Figura 27: Ensaio realizado pelo aparelho de medição de pulso ultrassônico com corpo de prova cilíndrico. .... 103
- Figura 28: Determinação de massa de um corpo de prova submerso em água. .... 105
- Figura 29: Ensaio de absorção por capilaridade, A) Quatro corpos de prova cilíndricos em contato com a água pela base inferior durante o ensaio, B) Vista aproximada da base inferior dos corpos de prova em contato com a água. .... 107
- Figura 30: Modelo da curva de absorção capilar de água em função da raiz quadrada do tempo, segundo a NBR 9779 para a determinação do coeficiente de absorção capilar ( $T_g \phi$ ). .... 108
- Figura 31: Sequência do ensaio de RAA, A) Formas prismáticas preenchidas com argamassa, B) Corpos de prova desmoldados após 24 horas de cura, C) Vista externa do banho de água destilada, D) Vista interna do banho em solução de hidróxido de sódio. .... 109
- Figura 32: Medidor dos corpos de prova. A) Medidor sendo calibrado, B) Corpo de prova prismático sendo aferida sua medida. .... 110
- Figura 33: Agulha de Le Chatelier. .... 111
- Figura 34: Sequência do ensaio de expansibilidade por meio das agulhas de Le Chatelier, A) Agulha untada com óleo, B) Preenchimento das agulhas com pasta de cimento, C) Fechamento do corpo de prova com vidro, D) Corpo de prova preparado para cura imersa com um peso na superfície superior, E) Medição de expansibilidade antes da cura, F) Corpos de prova

submersos em água fria, G) Corpos de prova preparados para o ensaio a quente. ....	112
Figura 35: Processo de ensaio por meio do esclerômetro de reflexão, A) Painel com as demarcações da área de ensaio, B) Esclerômetro sendo utilizado no painel durante o ensaio. ....	113
Figura 36: Sequência de ensaio de arrancamento de corpos de prova do painel, A) Pastilhas de metal coladas no painel, B) Posição de ajuste do dinamômetro às pastilhas de metal para início do ensaio, C) Fim do ensaio com a amostra do painel após o arrancamento, D) Painel após o arrancamento de todos os corpos de prova. ....	114
Figura 37: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco.....	115
Figura 38: Ensaio de absorção de água sob baixa pressão, A) Esquema de absorção do tubo de Karsten acoplado no painel, B) Tubo de Karsten no momento do ensaio.....	117
Figura 39: Distribuição granulométrica do RCMG, cimento, areia, cal e argamassa industrializada.....	120
Figura 40: Difratoograma de raios X do RCMG.....	122
Figura 41: Índice de retenção de água das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.....	124
Figura 42: Teor de ar incorporado das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.....	125
Figura 43: Densidade de massa das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.....	126
Figura 44: Índice de consistência das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.....	127
Figura 45: Análise reológica das argamassas simples (AS) pelo método <i>squeeze-flow</i> , em função do teor de RCMG adicionado. ....	127
Figura 46: Reologia das argamassas simples (AS) por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.....	129

Figura 47: Comportamento reológico das argamassas simples (AS) mediante os valores de (g), proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo.....	130
Figura 48: Comportamento reológico das argamassas simples (AS) mediante os valores de (h), proporcionais à viscosidade, em função do tempo.....	130
Figura 49: Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas simples, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	132
Figura 50: Resultados de resistência à compressão axial das argamassas simples, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	133
Figura 51: Resistência à tração por compressão diametral das argamassas simples (AS), nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	134
Figura 52: Porosidade aparente das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	135
Figura 53: Densidade aparente das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.....	136
Figura 54: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	137
Figura 55: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	138
Figura 56: Coeficiente de absorção capilar das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	139
Figura 57: Índice esclerométrico médio, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	140
Figura 58: Resistência de aderência à tração, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.....	141
Figura 59: Incidência das formas de ruptura observadas após o ensaio de resistência de aderência à tração em função dos teores de RCMG adicionados das argamassas simples .....	143

Figura 60: Coeficiente de absorção, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado. ....	144
Figura 61: Índice de retenção de água das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado.....	147
Figura 62: Teor de ar incorporado das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.....	148
Figura 63: Densidade de massa das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado.....	148
Figura 64: Índice de consistência das argamassas simples (AS), argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas em função do teor de RCMG adicionado.....	149
Figura 65: Análise reológica das argamassas mistas (AM) pelo método <i>squeeze-flow</i> , em função do teor de RCMG adicionado. ....	150
Figura 66: Análise reológica das argamassas industrializadas (AI) pelo método do <i>squeeze-flow</i> em função do RCMG adicionado. ....	151
Figura 67: Reologia das argamassas mistas (AM) avaliadas por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.....	152
Figura 68: Reologia das argamassas industrializadas (AI) por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.....	153
Figura 69: Comportamento reológico das argamassas mistas (AM) mediante os valores de (g), proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo. ....	153
Figura 70: Comportamento reológico das argamassas industrializadas (AI) mediante os valores de (g), proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo.....	154
Figura 71: Comportamento reológico das argamassas mistas (AM) mediante os valores de (h), proporcionais à viscosidade, em função do tempo. ....	155
Figura 72: Comportamento reológico das argamassas industrializadas (AI) mediante os valores de (h), proporcionais à viscosidade, em função do tempo. ....	155
Figura 73: Argamassas após o ensaio de reologia, A) Argamassa simples; B) Argamassa mista; C) Argamassa industrializada. ....	156

Figura 74: Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	157
Figura 75: Resultados de resistência à compressão axial, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	158
Figura 76: Resultados de resistência à compressão diametral, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.....	159
Figura 77: Porosidade aparente das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.....	160
Figura 78: Densidade aparente das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado. ....	160
Figura 79: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.....	162
Figura 80: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado. ....	163
Figura 81: Coeficiente de absorção capilar das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado. ....	164
Figura 82: Índice esclerométrico médio, aos 28 dias, da argamassa mista (AM) e argamassa industrializada (AI), em função do teor de RCMG adicionado. ....	165
Figura 83: Resistência de aderência à tração, aos 28 dias, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), em função do RCMG adicionado....	166
Figura 84: Incidência das formas de ruptura observadas após o ensaio de resistência de aderência à tração, em função dos teores de RCMG adicionados às argamassas mistas (A) e industrializadas (B). ....	168

Figura 85: Coeficiente de absorção, aos 28 dias, da argamassa mista (AM) e argamassa industrializada (AI), em função do teor de RCMG adicionado. ....	169
Figura 86: Resultados de expansibilidade a frio e a quente, em função do teor de RCMG adicionado. ....	170
Figura 87: Variação dimensional do RCMG ao longo do tempo em solução agressiva de NaOH. ....	171

**ÍNDICE DE TABELAS**

	Pág.
Tabela 1: Compostos químicos encontrados nos resíduos de mármore e granitos.....	42
Tabela 2: Consumo de materiais em Kg/m <sup>3</sup> da argamassa simples.....	86
Tabela 3: Consumo de materiais em Kg/m <sup>3</sup> da argamassa mista.....	87
Tabela 4: Consumo de materiais em Kg/m <sup>3</sup> da argamassa industrializada.....	89
Tabela 5: Caracterização física da areia, cimento, cal, argamassa industrializada e RCMG.....	119
Tabela 6: Composição química do cimento CP II Z 32 RS.....	120
Tabela 7: Composição química do RCMG obtida por FRX.....	121
Tabela 8: Resumo dos melhores resultados encontrados em cada tipo de argamassa e (AS, AM, AI), respectivamente, simples, mista e industrializada.....	173





## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual é imprescindível que a indústria da construção civil se preocupe com o mercado e com as premissas do desenvolvimento sustentável, visando alternativas de reaproveitamento de resíduos sólidos, reinserindo-os na cadeia produtiva. Vários estudos têm sido realizados neste sentido, com o intuito de reduzir os problemas relacionados ao manejo, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos. O desenvolvimento de novas tecnologias para absorver os rejeitos minimiza o consumo de recursos naturais, de energia, custos e fortalece a competitividade do fabricante no mercado (RODRIGUES *et al.*, 2011).

O desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento dos rejeitos de forma ambientalmente eficiente e segura é um desafio, visto que esse volume apreciável acaba gerando diversas dificuldades relacionadas ao seu armazenamento, manejo, transporte e destinação final, além de ônus para o produtor e problemas ambientais de difícil solução. Nesse contexto, a reinserção do resíduo de corte de rochas ornamentais na cadeia produtiva constitui-se em uma alternativa para amenizar um sério problema ambiental, podendo também representar uma fonte de matéria-prima alternativa.

Essa quantidade significativa de resíduo muitas vezes é depositada a céu aberto, causando sérios danos a todo o meio ambiente, enquanto poderia ser aproveitada economicamente, gerando lucros e contribuindo para a redução do uso de recursos naturais.

Nas áreas urbanas é onde se concentram os maiores aglomerados populacionais e, por conseguinte, as maiores extrações de recursos naturais, sendo a construção civil um dos setores que mais impacta o ambiente, responsável por consumir 75% desses recursos no planeta (FECOMÉRCIO, 2012). Cerca de 210 milhões de toneladas de agregados naturais são empregados anualmente na produção de concretos e argamassas, no Brasil (JOHN, 2000). Essa enorme demanda tem esgotado as reservas de matérias primas próximas aos grandes centros urbanos, gerando maior consumo de

energia, poluição e ônus para os produtores, no transporte desses materiais a longas distâncias.

A fim de atender à crescente demanda populacional e minimizar os impactos ambientais, o governo brasileiro interviu tomando algumas medidas, como o Plano Nacional de Agregados Minerais para Construção Civil (PNACC, 2008), visando garantir o suprimento adequado de insumos minerais vitais ao crescimento econômico e à melhoria da qualidade de vida da população brasileira.

A indústria de rochas ornamentais é responsável por movimentar expressivos volumes no mercado nacional e internacional. Durante o processo de beneficiamento das rochas, quando essas são cortadas em chapas de 20 mm de espessura, são gerados aproximadamente 20% a 30% de resíduos em forma de lama (GONÇALVES, 2000; ALYAMAÇ, 2009, HAGGAR, 2009, BINICI *et al.*, 2007). Em 2007, o resíduo gerado foi estimado em 60 milhões de metros quadrados por ano (CHIODI FILHO, 2008), ficando muitas vezes sem tratamento adequado, disponível a céu aberto, ou lançado em rios e córregos. Em 2008, a produção mundial de rochas totalizou cerca de 105 milhões de toneladas e, no Brasil, foram produzidas 7,8 milhões de toneladas. Deste montante, cinco milhões foram distribuídas entre mármore, travertinos, granitos e similares, o equivalente a 63% da produção total brasileira, gerando aproximadamente 1,25 milhões de toneladas de rejeitos oriundos desse processamento, ou seja, 25% de resíduo de corte de mármore e granito (ABIROCHAS, 2013).

Os estados do Espírito Santo e Minas Gerais são os maiores produtores e exportadores brasileiros, seguidos pela Bahia e Ceará. Em 2008, o Brasil foi o 5º maior produtor mundial, responsável por 7,4% da produção e o 7º maior exportador em todo o mundo, além de abrigar o maior polo de beneficiamento de rochas ornamentais e de revestimento da América Latina (ABIROCHAS, 2013). De acordo com dados de 2006, há 12 mil empresas integradas à cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais no Brasil, responsáveis por 145 mil empregos diretos e 420 mil indiretos (CHIODI FILHO, 2008).

O consumo de rochas ornamentais vem crescendo aceleradamente, e conseqüentemente, elevando-se a quantidade de resíduo gerada. No ano 2000, o RCMG gerado foi estimado em 165 mil toneladas (GONÇALVES, 2000) e em 2008 passou para um milhão e 250 mil toneladas, gerando um aumento de 95% ao ano (CHIODI FILHO, 2008). Este volume expressivo de resíduos demonstra a importância de aproveitá-lo, principalmente na construção civil, pois apresenta grande abrangência, consome grandes quantidades de insumos naturais e, além disso, o RCMG possui elevada finura, sendo bastante compatível com as matrizes cimentícias, podendo ser utilizado como *filler* em argamassas e concretos (GONÇALVES, 2000; MENEZES *et al.*, 2008; ARUNTAŞ *et al.*; CORINALDESI *et al.*, 2010; TOPÇU *et al.*, 2009). Portanto, sua utilização em argamassas minimiza o uso de recursos naturais, contribui para suprir as necessidades habitacionais, reduzir custos, respeitar a geodiversidade e, conseqüentemente, a biodiversidade.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Este trabalho teve o intuito de avaliar o desempenho da adição do RCMG em argamassas comuns, compostas por cimento Portland, mistas (cimento e cal) e industrializadas, nos estados fresco, endurecido e aplicado.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

De forma específica, para atingir o objetivo geral foi necessário:

- Caracterizar o RCMG de forma química, física e mineralógica;
- Identificar o teor ótimo de incorporação do resíduo às argamassas;

- Analisar o comportamento nos estados fluido, endurecido e aplicado;
- Avaliar a durabilidade das argamassas.

### 1.1.3 Hipóteses

As hipóteses a serem testadas no trabalho são:

- Argamassas confeccionadas com RCMG possuem resistência mecânica superior às argamassas convencionais, uma vez que, devido à sua elevada finura, o resíduo atua como *filler*;
- Existe um teor ótimo de RCMG a ser adicionado às argamassas para que melhore suas propriedades mecânicas e a sua durabilidade;
- O alto teor de MgO e CaO, além do SiO<sub>2</sub>, associados à finura do material podem gerar problemas de durabilidade com expansão acima da permitida;
- A reologia das argamassas é alterada devido à adição do RCMG.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Para uma melhor compreensão do trabalho serão abordados aspectos importantes referentes à pesquisa, como o estudo das argamassas, seus componentes, suas propriedades e patologias, além das formas de produção do RCMG, suas características e trabalhos realizados com o mesmo, assim como os resultados e conclusões relevantes de forma a contribuir com a pesquisa.

### 2.1 A indústria de mármore e granitos

Os mármore e granitos usados como esculturas, tampos de mesas, bancadas de pias, pisos, soleiras, entre outras, são apenas algumas formas de utilização dessas rochas na construção civil. As rochas são definidas como quaisquer agregados naturais sólidos, compostos de um ou mais minerais. A maioria das rochas pode ser classificada em três grandes grupos: magmáticas ou ígneas; metamórficas e sedimentares (MACHADO *et al.*, 2013).

As rochas magmáticas ou ígneas são resultantes da consolidação do magma na crosta terrestre, podendo ser intrusiva ou extrusiva. As rochas magmáticas intrusivas ocorrem quando a consolidação se faz lentamente na subsuperfície terrestre, tendo tempo suficiente para os minerais crescerem e serem facilmente visíveis, como é o caso do granito, composto por quartzo, feldspatos, micas e anfibólios. Porém, quando a lava vulcânica se consolida na superfície terrestre, esta se resfria rapidamente não dando tempo dos cristais se desenvolverem tanto, originando então as rochas magmáticas extrusivas, como o caso do basalto. As rochas ígneas escuras são mais ricas em minerais contendo magnésio e ferro, enquanto que as rochas ígneas claras são mais ricas em silício e alumínio (MACHADO *et al.*, 2013).

Para a análise das argamassas é imprescindível saber a quantidade de minerais que compõem os granitos, pois, esses estarão presentes no resíduo e dependendo da proporção entre seus constituintes, como por exemplo, o

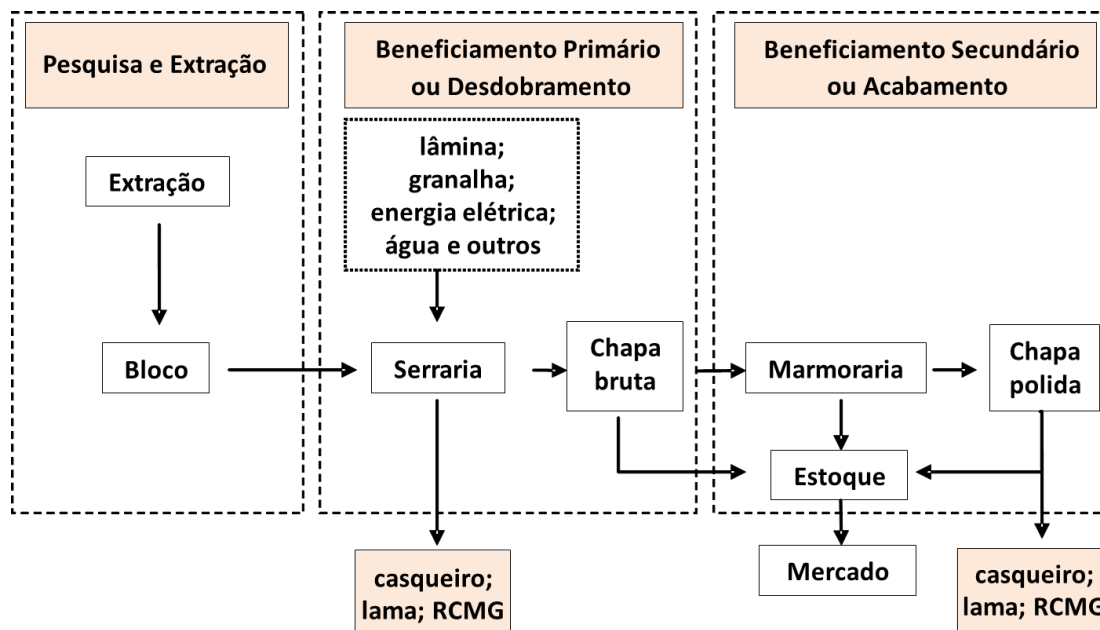
magnésio, pode gerar expansibilidade nas argamassas no estado endurecido, refletindo em fissuras quando utilizadas em revestimentos. (OLIVEIRA, 2004; MACHADO, 2000). Além disso, devido à elevada finura do resíduo e o teor de  $\text{SiO}_2$  associado ao processo produtivo, o RCMG pode apresentar uma elevada reatividade, tendo como consequência a ocorrência de reações álcali-agregado (RAA).

As rochas metamórficas são originárias da transformação de outras rochas preexistentes, mediante novas condições de temperatura e pressão. A depender dos eventos geológicos de cada região, como as cadeias montanhosas, sua estrutura é diferenciada, podendo ser observada através de sua foliação. O mármore é um exemplo dessas rochas, composto principalmente por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). E, por fim, as rochas sedimentares resultam da deposição de detritos de outras rochas, magmáticas ou metamórficas, ou do acúmulo de detritos orgânicos ou ainda, da precipitação química, tendo como exemplo o arenito e o calcário (MACHADO *et al.*, 2013).

Durante a extração das rochas nas pedreiras, estas são cortadas em chapas para o uso em vários ramos da construção civil, gerando resíduos que se caracterizam pelo tipo da rocha extraída, como mármore, granitos ou outras rochas.

O ciclo produtivo de rochas ornamentais compreende três etapas básicas: a extração ou mineração das rochas brutas em grandes blocos, medindo aproximadamente  $3,0 \times 2,0 \times 1,5 \text{ m}^3$ , em seguida ocorre o beneficiamento primário, que consiste na serragem dos blocos por meio dos teares, para que estes sejam desdobrados em grandes chapas, com medidas em torno de  $2,80 \times 1,90 \times 0,02 \text{ m}^3$  e por fim, o beneficiamento secundário, que ocorre nas marmorarias, onde são realizados os acabamentos finais e polimentos conforme o pedido do cliente (RODRIGUES *et al.*, 2011; SETEC/MEC, 2007). Em cada metro cúbico de rocha serrado nos teares, desdobram-se, em média,  $32 \text{ m}^2$  de chapas com 2 cm de espessura ou  $49 \text{ m}^2$  com 1 cm de espessura (ABIROCHAS, 2012). A Figura 1 esquematiza as três etapas ocorridas no beneficiamento das rochas ornamentais e a Figura 2 ilustra todo o processo.

Figura 1: Fluxograma das etapas de geração do RCMG.



Fonte: Gonçalves, 2000 com adaptações da autora, 2013.

Figura 2: Fotos referentes às etapas geração do RCMG; A) Extração das rochas na pedreira, B) Corte dos blocos de rocha na serraria, C) Acabamento final na marmoraria, D) Depósito de lama gerado nas pedreiras depositado a céu aberto.



Fonte: A) Neto, 2006, B) Simec, 2009, C) A autora, 2013, D) Neto, 2006.

Os teares podem ser de fios diamantados ou de lâminas metálicas. No primeiro caso, o resíduo é constituído por pó de rocha e água. Já no tear de lâminas metálicas, o tipo mais amplamente difundido, a lama gerada é formada por água, cal, granalha e fragmentos metálicos das próprias lâminas. A lama

escoa até um poço de recolhimento, recircula pelos teares através de bombas e é continuamente aspergida na superfície de corte, para desobstruir os canais entre as chapas e facilitar a serragem. Além de lubrificar e resfriar as lâminas metálicas, evita a sua oxidação (GONÇALVES, 2000; REIS e TRISTÃO, 2007). Esses tipos de teares podem ser observados pela Figura 3.

Figura 3: Tipos de teares utilizados no corte de mármore e granitos, A) Tear de fios diamantados, B) Corte da rocha com tear de fios diamantados, C) Tear composto por multilâminas de aço, D) Vista aproximada das multilâminas de aço.



Fonte: A e B) Pedrini, 2008, C) Ouro e Prata Granitos, 2010, D) Decorama Mármore e granitos, 2007.

Os resíduos gerados pelo corte das rochas têm origem nas pedreiras e nas marmorarias, pois, após a extração dos blocos, esses são serrados nos teares e, posteriormente, quando chegam às marmorarias, as chapas brutas são divididas em partes menores. Nos teares de multilâminas de aço, são misturadas as granalhas de aço na água para facilitar o corte, gerando um resíduo com maior teor de ferro. Nas marmorarias, as serras são de lâminas de diamante, formando um resíduo mais “puro”. Contudo, diferentes tipos de



rochas passam pelas serras, gerando um resíduo diversificado, portanto, sua caracterização física, química e mineralógica é imprescindível para uso em novos produtos.

O resíduo é oriundo da fração mais viscosa da lama, podendo ser encaminhado às lagoas de sedimentação diretamente no solo da própria empresa, ou a filtros tipo prensa, com o objetivo de reduzir sua umidade. Em seguida, este é transportado e disposto em aterros sem nenhum tratamento prévio (REIS e TRISTÃO, 2007). Em inúmeros casos, os rejeitos acabam sendo depositados em rios, córregos, esgotos ou até mesmo em tanques feitos inadequadamente, provocando assoreamento de rios, contaminação de lençóis freáticos e gerando conflitos entre os órgãos ambientais e as populações vizinhas (SILVA *et al.*, 2005).

Para minimizar os impactos ambientais, algumas empresas construíram unidades de tratamento de efluentes, como caixas de decantação e, com isso, o resíduo pode ser utilizado para diversos fins, como, por exemplo, matéria prima de concretos e argamassas. A Figura 4A mostra as etapas do tratamento de efluentes da indústria de argamassas industrializada no estado do Rio de Janeiro, composta pela decantação dos efluentes e posteriormente, como mostra a figura 4B, o resíduo é encaminhado para secagem. (MARTINS, 2010).

Figura 4: Etapas do tratamento de efluentes, A) Decantação dos efluentes com a separação do resíduo, B) Secagem do resíduo fino de rochas.



Fonte: Martins, 2010.

A composição química do RCMG é diversificada, e no geral, o resíduo é formado, em grande parte, por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) e óxidos

alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), contudo, encontra-se também o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que pode aparecer em maior quantidade devido ao desgaste das lâminas de corte (GONÇALVES, 2000; MENEZES, 2009; SILVA *et al.*, 2005; DESTEFANI & HOLANDA, 2011). A seguir, na tabela 1, encontram-se descritos os compostos químicos presentes nos trabalhos de outros autores, oriundos do corte de mármore e granitos. As siglas significam, respectivamente: Rejeitos da indústria de beneficiamento de mármore e granitos (RMG), Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG), Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais (RSRO), Resíduo de Rochas Ornamentais (RRO), Resíduo de Mármore (RM), Resíduo do Corte de Granito (RCG), Resíduo de Granito (RG).

Tabela 1: Compostos químicos encontrados nos resíduos de mármore e granitos.

Compostos	RMG (1)	RBMG (2)	RSRO (3)	RRO (4)	RM (5)	RCG (6)	RG (7)
SiO <sub>2</sub>	37,86	54,62	5,893	67,638	0,67	59,62	61,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,65	9,7	1,231	16,416	0,12	12,77	13,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,56	5,86	9,06	2,994	0,08	9,49	8,75
CaO	19,92	12,99	79,01	3,337	54,43	4,83	5,73
MgO	3,49	3,22	0,397	-	0,59	1,96	1,01
TiO <sub>2</sub>	0,61	-	0,35	0,424	-	-	0,46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	-	-	-	-	-	0,18
Na <sub>2</sub> O	3,58	2,15	0,298	-	0,14	2,72	2,56
K <sub>2</sub> O	4,32	-	-	7,552	-	5,3	3,18
MnO	0,07	-	-	0,05	-	-	0,08
SO <sub>3</sub>	-	0,02	-	1,425	-	0,03	-
SO <sub>4</sub>	-	-	0,4	-	-	-	-
Outros	-	-	-	0,163	-	-	-
Perda ao fogo	12,37	-	0,211	-	43,4	1,92	2,18

Fonte: (1) Silva *et al.*, 2005, (2) Lopes *et al.*, 2006, (3) Moura & Leite, 2011, (4) Destefani & Holanda, 2011, (5) Aruntaş *et al.*, 2011, (6) Gonçalves, 2000, (7) Mármol *et al.*, 2010

## 2.2 Argamassas de cimento Portland

As argamassas são produtos formados por um ou mais ligantes misturados com agregado miúdo e água. Entre os ligantes estão, por exemplo, o cimento Portland, a cal e o gesso e entre os agregados miúdos estão a areia natural ou artificial. Além disso, aditivos e adições minerais podem ser utilizados na mistura a fim de melhorar suas propriedades (CARASEK, 2007).

Pela NBR 13281 (2005), argamassa é definida 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, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

As argamassas são utilizadas na construção civil como assentamento de blocos de alvenaria, revestimento de paredes e tetos, contrapisos para regularização de superfícies, assentamentos e rejuntamentos de revestimentos cerâmicos ou pedras, além de recuperação de estruturas (CARASEK, 2007). De acordo com a NBR 13529 (1995), os revestimentos de argamassa são definidos como cobrimentos de superfícies que podem ser executados com uma ou mais camadas superpostas e receber acabamento decorativo ou podem ser o próprio acabamento final, como camada única. As argamassas de revestimento fornecem acabamento às paredes de alvenaria, paredes de concreto e tetos de edificações, de acordo com os requisitos arquitetônicos do projeto.

As funções das argamassas estão associadas diretamente as suas finalidades ou aplicações. As argamassas mais utilizadas são para assentamento de alvenarias ou para revestimento de paredes.

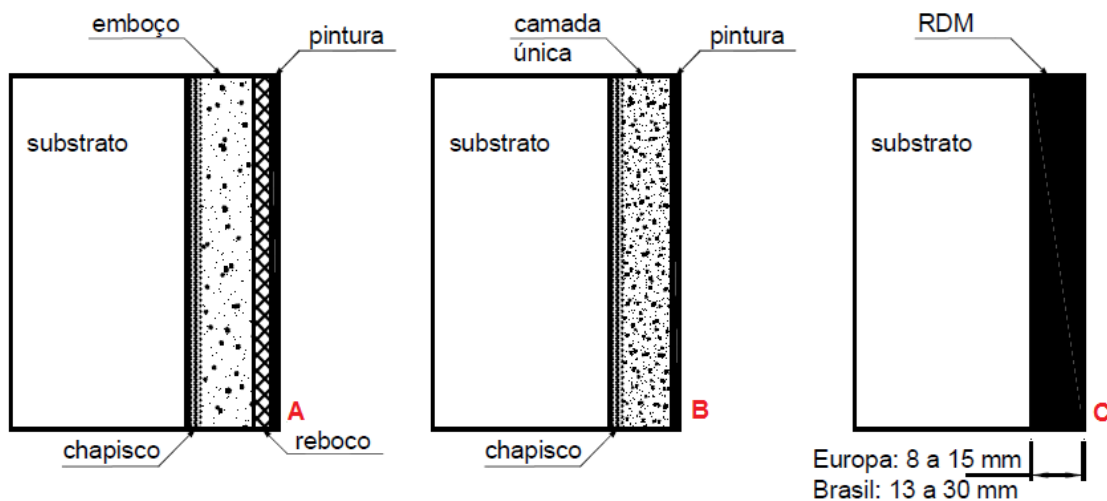
### **2.2.1 Argamassas para assentamento de alvenaria**

A argamassa é muito utilizada para a elevação de paredes e muros de tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, servindo para uni-los e formar um elemento monolítico, contribuindo para aumentar a resistência aos esforços laterais, além de distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos; serve para selar as juntas, garantindo a estanqueidade da parede à penetração de água das chuvas; absorver as deformações naturais, como as de origem térmica e as de retração por secagem (origem higroscópica) a que a alvenaria estiver sujeita (CARASEK, 2007).

### 2.2.2 Argamassa de revestimento

Argamassa de revestimento é empregada em revestimento de paredes, muros e tetos, e posteriormente poderão ser aplicados diversos acabamentos, como pintura e cerâmicas. A depender do projeto, essa argamassa pode ser constituída de várias formas, podendo ser: (a) com várias camadas (chapisco, emboço e reboco) sendo o mais antigo, (b) camada única, o mais utilizado atualmente no Brasil e (c) revestimento decorativo monocamada (RDM), também chamado por monocapa, sendo muito empregado na Europa (CARASEK, 2007). A Figura 5 ilustra esses tipos de argamassa de revestimento.

Figura 5: Tipos de revestimento, A) Revestimento com várias camadas (chapisco, emboço e reboco), B) Revestimento com camada única, C) Revestimento decorativo monocamada (RDM).



Fonte: Carasek 2007, com adaptações da autora, 2013.

O substrato pode ser composto por tijolos cerâmicos, blocos de concreto, blocos de concreto celular, paredes de concreto e outras bases cimentícias. Sua textura ou rugosidade é importante para a ancoragem da argamassa auxiliando na aderência do chapisco, que serve para preparar a base, unir o substrato à argamassa e melhorar a adesão do revestimento (BAUER, 2005).

O emboço serve para cobrir e regularizar a base, permitindo a união de outra camada de acabamento ou o próprio revestimento cerâmico e o reboco é a última camada que propicia o acabamento final para receber a pintura. O revestimento de camada única é constituído por chapisco e apenas um único tipo de argamassa é aplicado após a regularização da base, e em seguida, pode receber a pintura. Também é conhecido como massa única ou reboco paulista. Por fim, encontra-se o revestimento decorativo monocamada (RDM), um produto industrializado composto por cimento branco, cal hidratada, agregados, pigmentos inorgânicos, fungicidas e aditivos, que tem a função de regularizar e decorar ao mesmo tempo, sendo aplicado com uma única camada (CARASEK, 2007).

As argamassas de revestimento externo servem para proteger a alvenaria e a estrutura contra os agentes climáticos; melhorar a vedação dos edifícios proporcionando isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais; além de regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação (CINCOTTO *et al.*, 1995; CARASEK, 2007).

### **2.2.3 Componentes das argamassas**

As argamassas são constituídas por um ou mais aglomerantes (cimento e/ou cal), areia e água, podendo conter aditivos e adições, que são acrescentados a fim de melhorar a plasticidade e outras propriedades (CARASEK, 1996).

#### **2.2.3.1 Cimento Portland**

O cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes atuando como elemento ativo que endurece com a presença de água, tornando-se um

material compacto ao longo do tempo. Essa reação é chamada de hidratação do cimento (COPELAND *et al.*, 1960; METHA & MONTEIRO, 1994). A finura do cimento influencia decisivamente na reatividade e na velocidade das reações químicas que ocorrem durante a pega e o endurecimento, pois, quanto mais fina é a partícula do cimento, maior é a área superficial, e, portanto, mais rapidamente ocorre a hidratação (BAUER, 2005). Ao se acrescentar areia na pasta, obtém-se a argamassa e ao se acrescentar o agregado graúdo (brita) às argamassas, obtém-se o concreto. O cimento Portland teve origem em 1824, quando um pedreiro inglês, John Aspdin, patenteou o material por ser um concreto resistente de mesma cor e qualidades semelhantes à pedra calcária natural da ilha de Portland, no canal inglês (PCA, 2013).

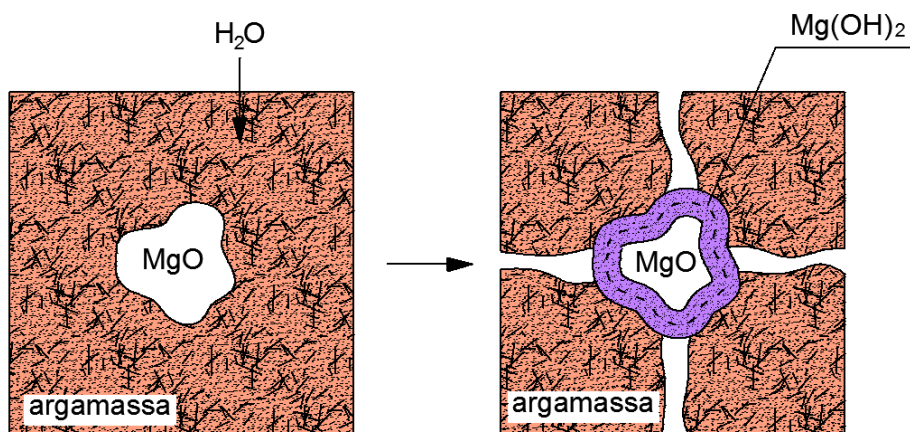
O processo de fabricação do cimento Portland consiste em desaglomerar as matérias primas (argila e calcário), e em seguida, misturá-las em proporções adequadas e posteriormente queimá-las a temperatura de 1450°C em forno rotativo. Nessa temperatura, o material sofre fusão incipiente formando pelotas, conhecidas como clínquer, que ao serem resfriadas e moídas, tornam-se um pó bem fino. Por fim, acrescenta-se um pouco de gesso à mistura e chega-se ao cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Durante a clínquerização, as reações físico-químicas da mistura crua do calcário e da argila dão origem à formação de quatro componentes essenciais, que possuem nomenclatura abreviada de  $C_3S$  - silicato tricálcico,  $C_2S$  - silicato bicálcico,  $C_3A$  - aluminato tricálcico e  $C_4AF$  - ferro-aluminato tetracálcico. Contudo, os minerais de clínquer possuem impurezas de elementos secundários, como Al, Fe, Mg, K, Cr, Ti, P, assim como, periclásio (MgO cristalizado), CaO livre, sulfatos, sulfetos e outros (ABCP, 1984).

O periclásio é formado a partir de clínqueres ricos em MgO, oriundos de calcários magnesianos de granulação inadequada, devido à moagem insatisfatória; calcários dolomíticos ou devido à incorporação de pedaços do refratário cromo-magnésiano dos fornos (ABCP, 1984; MARINGOLO, 2001). A presença de periclásio no clínquer significa que os teores de MgO são superiores a 2% porque até este valor, o MgO pode ser incorporado ao clínquer sob forma de solução sólida. O cristais de MgO estão presentes tanto no

cimento quanto no RCMG, pois os granitos escuros possuem maior quantidade de magnésio, aumentando a possibilidade de reações de expansão com o cimento durante a mistura, como pode ser observado pela figura 6 (ABCP, 1984; LERCH, 1938; NEVILLE, 1997; BAUER, 2005; SCHOON *et al.*, 2013; MO *et al.*, 2014).

Figura 6: Esquema do MgO hidratado gerando expansão de volume e resultando em fissuras nas argamassas



Fonte: SCHOON *et al.*, 2013, com adaptações da autora, 2013.

Contudo, as reações de expansão ocorridas pelo periclásio, podem ser benéficas quando utilizadas para compensar as retrações térmicas de concretos e argamassas. Atualmente, a China é o único país que utiliza, há anos, cimentos com periclásio em sua composição para concretagem de barragens (MO *et al.*, 2014).

Outro grande problema enfrentado pelas indústrias cimenteiras está relacionado às emissões de CO<sub>2</sub> liberadas para o meio ambiente, pois essas indústrias são responsáveis por cerca de 5% das emissões globais de dióxido de carbono no planeta (WBCSD, 2012). Durante a produção de cimento, ocorrem as maiores emissões diretas de CO<sub>2</sub> na atmosfera, principalmente na decomposição das matérias primas para a formação do clínquer (cerca de 60%) e na queima de combustíveis para atingir as temperaturas elevadas dos fornos. De forma indireta, o consumo de energia elétrica é responsável por 10% das emissões globais de CO<sub>2</sub> na atmosfera (WBCSD, 2009).

A China é o maior produtor e consumidor mundial de cimento (SNIC, 2012) e conforme o National Greenhouse Gas Inventory of China – NDRC/2004 apud Yu Lei *et al.* (2011), em 1994 essa produção foi responsável pela emissão de 57% de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Com o intuito de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a pesquisa de Yu Lei *et al.* (2011), verificou que o potencial de CO<sub>2</sub>, durante a produção de cimento na China, pode ser mitigado em 12,8% em 2020, se for melhorada a eficiência energética nas indústrias, se houver a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS) e com a utilização de combustíveis alternativos. Essas três medidas em conjunto também poderão reduzir as emissões de material particulado, dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogênio na atmosfera.

A indústria de cimento no Brasil possui um parque industrial moderno, com elevada eficiência energética e reduzidos níveis de emissão de CO<sub>2</sub>. Em 2009, o Brasil emitiu um fator médio de 580 Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento e a China gerou aproximadamente 620 Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada. Por conta disso, o Brasil tem se tornado referência mundial pelas baixas emissões e pelo uso de adições e de biomassa na produção do cimento (SNIC, 2010).

#### 2.2.3.2 Cal

A cal é o mais antigo aglomerante utilizado pela humanidade até a invenção do cimento Portland, em 1824, sendo associado ou não com pozolanas (CINCOTTO *et al.*, 2007). Cal é a denominação genérica de um aglomerante inorgânico, aéreo, produzido a partir da calcinação de rochas calcárias, constituídas por carbonatos e/ou magnésio e apresenta-se na forma de um pó fino, cuja área superficial específica é cerca de 10 vezes maior que a dos cimentos (CINCOTTO *et al.*, 2007; GUIMARÃES *et al.*, 2004).

O cimento necessita de água para reagir e endurecer, enquanto que a cal reage com o CO<sub>2</sub> da atmosfera, realizando a carbonatação e se transforma em carbonatos tão sólidos quanto às rochas calcárias que a originou (GUIMARÃES *et al.*, 2004). Para Barbhuiya *et al.* (2009), o endurecimento da



cal hidratada é realizado de forma lenta devido a reação do  $\text{CO}_2$  e, se comparado a outros aglomerantes, como o cimento Portland e o gesso, é considerada uma vantagem ambiental.

Há dois tipos de cales que podem ser empregadas nas argamassas: a cal virgem, sob a forma de óxidos de cálcio ou óxidos de cálcio e magnésio e a cal hidratada, sob a forma de hidróxido de cálcio ou hidróxido de cálcio e magnésio (BAUER e SOUZA, 2005). CARASEK *et al.* (2001) afirmam que as cales podem ser classificadas segundo a sua composição química em três tipos: cálcica, (teor de  $\text{CaO} \geq 90\%$  em relação aos óxidos totais); magnesiana ( $65\% < \text{CaO} < 90\%$ ) e dolomítica ( $\leq 65\%$  de  $\text{CaO}$ ). Os autores acreditam que quanto maior a quantidade de hidróxido de magnésio presente na cal hidratada, maior é a resistência de aderência da argamassa, podendo ser, em parte, atribuído às diferenças constatadas na microestrutura da pasta aglomerante. A elevada finura da cal proporciona alta plasticidade e grande retenção de água, portanto, argamassas contendo cal tendem a preencher mais facilmente e de forma mais completa toda a superfície do substrato, proporcionando maior aderência.

Entretanto, a durabilidade da aderência é conseguida por meio da reação de carbonatação que se processa ao longo do tempo, conhecida como restabelecimento ou reconstituição autógena, representando uma das vantagens do uso desse aglomerante nas argamassas de revestimento e assentamento (CARASEK *et al.*, 2001).

Para Guimarães *et al.* (2004), a cal hidratada é um dos principais constituintes das argamassas, proporcionando diversos benefícios à mistura, tais como:

- Maior economia, pois reduz os custos por metro cúbico devido a sua massa unitária ser a menor entre os aglomerantes e possuir maior volume por peso, já que os aglomerantes são comprados em peso e as argamassas são dosadas em volume, além de reduzirem a quantidade de cimento quando utilizados em conjunto;

- Elevado poder aglomerante, unindo os grãos de areia existente nas argamassas;
- Maior plasticidade, devido à elevada finura que na presença de água, esta age como lubrificante, facilitando o manuseio e proporcionando melhor trabalhabilidade;
- Elevada retenção de água, pois ao reagir e endurecer com a presença do CO<sub>2</sub> da atmosfera, a cal libera a água (oriunda da hidratação e da água de amassamento) para ser absorvida pelo cimento, ou seja, excelente sincronicidade entre os aglomerantes;
- Boa proteção às armaduras de concreto, impedindo que ocorra a oxidação nas ferragens devido a sua alcalinidade (pH em torno de 12);
- Excelente agente bactericida e fungicida devido à alta alcalinidade, além de ser compatível com todas as tintas;
- Baixo módulo de elasticidade, possuindo maior capacidade de absorver pequenas movimentações, evitando o aparecimento de trincas e fissuras.

### 2.2.3.3 Areia

A areia é um sedimento clástico inconsolidado, de grãos geralmente de natureza quartzosa, cujos diâmetros situam-se entre 150 µm a 4,75 mm (ALBUQUERQUE, 1994). Mehta & Monteiro (1994) classificam os agregados em graúdo (partículas maiores que 4,8 mm) e miúdo (partículas menores que 4,8 mm) e a NBR 7211/2005 define agregado miúdo como aquele, cujos grãos passam pela peneira 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 150 µm, como as areias.

No âmbito dos materiais de construção, a areia é o agregado miúdo e quanto a sua origem, a areia pode ser classificada como: areia de rio, encontrada nos depósitos dos leitos de rios; areia de cava, quando é extraída por meio de escavação; areia de escória de alto forno, que é um resíduo da produção de ferro gusa; areia de britagem, oriunda das pedreiras e classificada conforme a porcentagem de materiais pulverulentos e por fim, a areia de praia e dunas que não são utilizadas para o preparo de concretos e argamassas, devido ao fato de serem finas e apresentarem elevados teores de sais deletérios aos materiais cimentícios (ALBUQUERQUE, 1994).

#### 2.2.3.4 *Água*

A água é um ingrediente essencial na argamassa e possui duas funções primordiais: possibilitar a trabalhabilidade da mistura e combinar quimicamente os aglomerantes, proporcionando endurecimento e resistência (CARASEK, 1996). O excesso de água pode gerar segregação, exsudação e fissuras devido à retração por secagem. A qualidade da água tem papel importante nas propriedades das argamassas, pois, as impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência de concretos e argamassas, assim como causar manchas nas superfícies, e no caso de concretos, pode haver corrosão das armaduras (NEVILLE, 1997).

#### 2.2.3.5 *Aditivos químicos*

Os aditivos são substâncias adicionadas intencionalmente aos concretos e argamassas com o intuito de melhorar ou reforçar certas características, como por exemplo: retardar ou acelerar a pega; diminuir a retração, o calor de hidratação; aumentar a compacidade, a durabilidade; melhorar a trabalhabilidade, a impermeabilidade, entre outras (PETRUCCI, 1998).

Os aditivos químicos podem ser plastificantes, incorporadores de ar, redutores de água, retardadores de pega, modificadores de reologia, inibidores de corrosão, redutores de retração, redutores de permeabilidade, inibidores de reação álcalis-sílica, pigmentos, agentes de adesão, agentes de formação de gás, agentes de coesão, agentes para bombeamento, agentes espumantes, dentre outros (HARTMANN *et al.*, 2011).

#### 2.2.3.6 Adições minerais

De acordo com Malhotra e Mehta (1996) apud Fonseca (2010), a adição refere-se a qualquer material além de água, agregados e cimento que é utilizado como um ingrediente da matriz e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura, ou seja, as adições são utilizadas com o objetivo de somar ou substituir parcialmente o cimento, enquanto que os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto.

As adições podem ser classificadas de acordo com sua ação físico-química em: materiais pozolânicos, materiais cimentantes ou *fillers*, podendo ser naturais ou artificiais (FONSECA, 2010).

De acordo com a NBR 12653/2012 as pozolanas são definidas como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que em si mesmo possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, em uma forma finamente dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. As adições pozolânicas podem ser naturais, de origem vulcânica ou sedimentar, assim como podem ser artificiais, resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico, como argilas calcinadas e cinzas volantes.

As adições oriundas de materiais cimentantes necessitam do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), mas sua auto-hidratação normalmente é lenta, portanto, a quantidade

de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material para fins estruturais. O hidróxido de cálcio e a gipsita aceleram a hidratação dos materiais cimentantes, como a escória granulada de alto-forno (DAL MOLIN, 2011).

Os *fillers* são adições constituídas por partículas minerais de dimensões inferiores a 0,075mm (BONAVETTI & IRASSAR, 1994). Estes são muito utilizados na construção civil como espessadores de asfaltos fluidos, na preparação de concretos hidrocarbonatos, pois atuam como espessadores e aumentam a densidade da mistura, oferecendo maior durabilidade, além de adição a cimentos e adição em concretos para colmatar os vazios (PETRUCCI, 1998). *Filler* é um material finamente moído com finura aproximada ao cimento Portland e, devido às suas propriedades físicas, é bem eficaz sobre as propriedades dos concretos e argamassas, como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração. Normalmente os *fillers* são inertes, porém, podem apresentar alguma reatividade na pasta de cimento, podendo ser benéficos quando ativam a hidratação do cimento atuando como pontos de nucleação (NEVILLE, 1997; RAHHAL & TALERO, 2005).

Para Dal Molin (2005), o *filler* também produz um efeito físico de melhorar o empacotamento granulométrico das partículas. Em muitos estudos, o resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) é considerado um *filler*, com propriedades inertes, que aumenta a densidade de concretos e argamassas, melhorando suas características e propriedades, além de reduzir a demanda mundial de cimento (GONÇALVES, 2000; RAHHAL & TALAERO, 2005, AGARWAL & GULATI, 2006; ERGÜN, 2011, JATURAPITAKKUL, 2011, PELLETIER-CHAIGNAT *et al.*, 2012).

Alguns autores afirmam que os *fillers* não reativos, como as partículas de pó de pedra e rutilo (pó de dióxido de titânio) podem reduzir o calor de hidratação das reações com o cimento, podendo minimizar as tensões térmicas no endurecimento do concreto, evitando um craqueamento térmico precoce (GUTTERIDGE & DALZIEL, 1990; POPPE & SCHUTTER, 2005).

## **2.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco**

As argamassas devem apresentar propriedades adequadas para o seu manuseio e resistência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, muitas propriedades das argamassas estão relacionadas à reologia, tais como: trabalhabilidade, consistência, coesão, plasticidade, tixotropia, reopexia, adesão inicial, retenção de água, conteúdo de ar incorporado, entre outras (CINCOTTO *et al.*, 1995, BAUER, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

### **2.2.4.1 Reologia**

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria (FREDRICKSON, 1964). O termo tem origem nas palavras gregas *rheos* (fluir) e *logos* (estudo), ou seja, reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando submetidos a uma determinada tensão ou solicitação mecânica externa (STEIN, 1986 apud OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Para Glatthor & Schweizer (1994), reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação em determinado período de tempo. De acordo com a *International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC*, (2012), reologia é o estudo do fluxo e deformação da matéria sob a influência de uma força mecânica, preocupando-se com o comportamento de materiais que não podem ser descritos pelos modelos lineares simples da hidrodinâmica e da elasticidade, devido à presença de partículas coloidais ou à influência de superfícies. Para Cardoso *et al.* (2005), o comportamento reológico dos materiais é representado por relações entre o fluxo ou deformação com as forças a que são submetidos. De acordo com Banfill (2003) reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria, enfatizando a relação entre tensão, força, taxa de deformação e tempo.

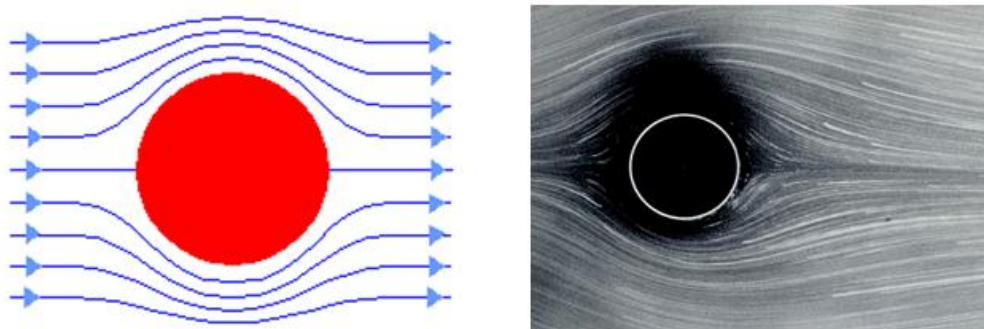
O conceito de viscosidade, estabelecido por Newton, diz que a resistência que surge a partir da falta de deslizamento proveniente de um fluido é proporcional à velocidade pela qual as partes do fluido estão separadas umas das outras (ISAAC NEWTON, 1687 apud DORAISWAMY, 2002).

A viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido, indicando a facilidade de escoamento contínuo sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa, é um indicativo de coesão entre as moléculas que constituem as lâminas adjacentes do fluido. Fazendo uma analogia, pode-se considerar que as moléculas de um fluido viscoso, como o mel, estão mais coesas entre si do que as moléculas de um fluido menos viscoso, como a água (STREET *et al.*, 1986 apud OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Para se entender melhor os conceitos de viscosidade e conseqüentemente o comportamento das argamassas no estado fresco, é imprescindível avaliar o comportamento reológico das suspensões. Essas são misturas do tipo sólido/líquido, formadas por um conjunto de partículas distribuídas de forma relativamente uniforme através de um meio líquido, sem que haja dissolução do material particulado em função do tempo (STEIN 1986 apud OLIVEIRA, 2000).

O efeito da adição de partículas sobre a viscosidade de um líquido é o mesmo que adicionar um sólido esférico entre as lâminas paralelas de um modelo de Newton, pois o sólido atua como uma barreira ao escoamento do líquido, formando linhas curvas ao seu redor, dificultando o deslizamento natural do fluido (OLIVEIRA, 2000), como pode ser observado pela Figura 7.

Figura 7: Partícula sólida esférica introduzida em um líquido viscoso

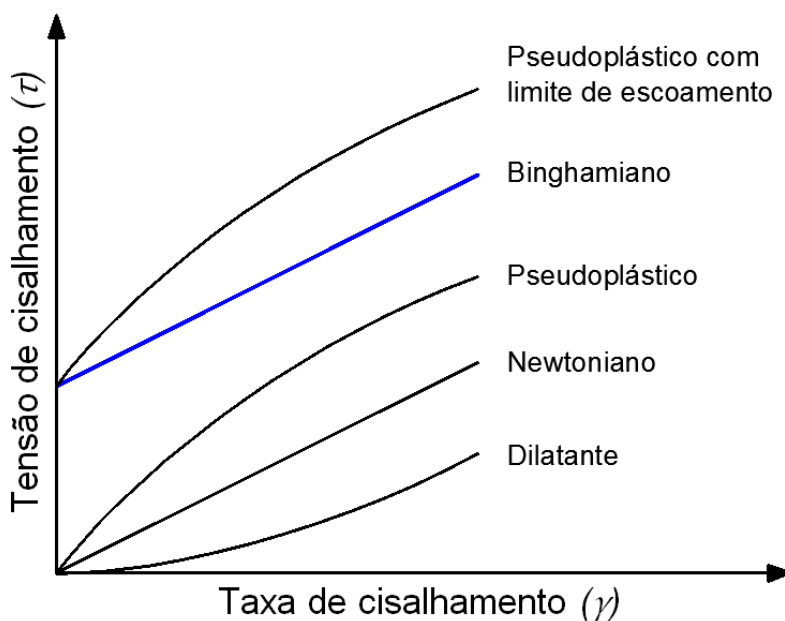


Fonte: Notas de aula RODRÍGUEZ, 2012.

As propriedades de fluxo das suspensões são normalmente representadas por curvas de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) em função da taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), a relação entre essas duas propriedades define o comportamento dos líquidos considerados puramente viscosos. A representação gráfica dessas duas variáveis é conhecida como reograma ou curva de fluxo. A Figura 8 representa esquematicamente a curva de fluxo das suspensões concentradas que apresentam comportamento reológico dependente da taxa de cisalhamento (MACHADO, 2002; OLIVEIRA, 2000).

De uma maneira geral, os fluidos se classificam como Newtonianos ou não-Newtonianos. Os fluidos Newtonianos também são chamados de fluidos ideais, tendo como exemplo a água. Esses apresentam uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, sendo representado no gráfico das curvas de fluxo (figura 8), como uma linha reta com início na origem dos eixos. Isso significa que durante o escoamento em regime laminar, à temperatura e pressão constantes, apenas uma determinação experimental é necessária para definir o único parâmetro reológico existente, portanto, sua viscosidade é única e absoluta, sendo então constante, a razão entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento.

Figura 8: Curva de fluxo de alguns tipos de fluidos dependentes da taxa de cisalhamento



Fonte: Machado 2002, com adaptações da própria autora, 2013.



Um fluido newtoniano pode ser representado matematicamente, conforme a equação 1.

$$\tau = \eta\gamma \quad (1)$$

Onde  $\tau$  (Pa) é a tensão de cisalhamento,  $\eta$  (Pa.s) é a viscosidade dinâmica absoluta e  $\gamma$  (s<sup>-1</sup>) a taxa de cisalhamento.

Se houver qualquer variação na relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, considerando a temperatura e pressão constantes e o escoamento em regime laminar, classifica-se como um fluido não-Newtoniano, representado por todas as outras curvas do reograma da Figura 8. Esses fluidos são classificados conforme o aspecto da curva de fluxo e a correlação de algum modelo matemático, portanto a viscosidade não é única e varia conforme a taxa de cisalhamento, sendo então denominada de viscosidade aparente  $\eta_{ap}$  (Pa.s), ou seja, é a viscosidade que um fluido teria se fosse Newtoniano, naquela condição de fluxo. Esta viscosidade só é válida para uma determinada taxa de cisalhamento e sempre que for citada deve vir acompanhada da respectiva taxa de cisalhamento (MACHADO, 2002). A equação 2 representa um fluido não-Newtoniano

$$\tau = \eta_{ap}\gamma \quad (2)$$

A maioria dos fluidos são considerados não-newtonianos, isto é, quando ocorrem dispersões de sólidos em meio líquido, principalmente quando os sólidos interagem com a fase líquida, solvatando-se ou inchando-se, como é o caso das argamassas, pastas de cimento, dispersões de argila em água, asfaltos, emulsões concentradas de óleo em água e água em óleo, entre outros (MACHADO, 2002).

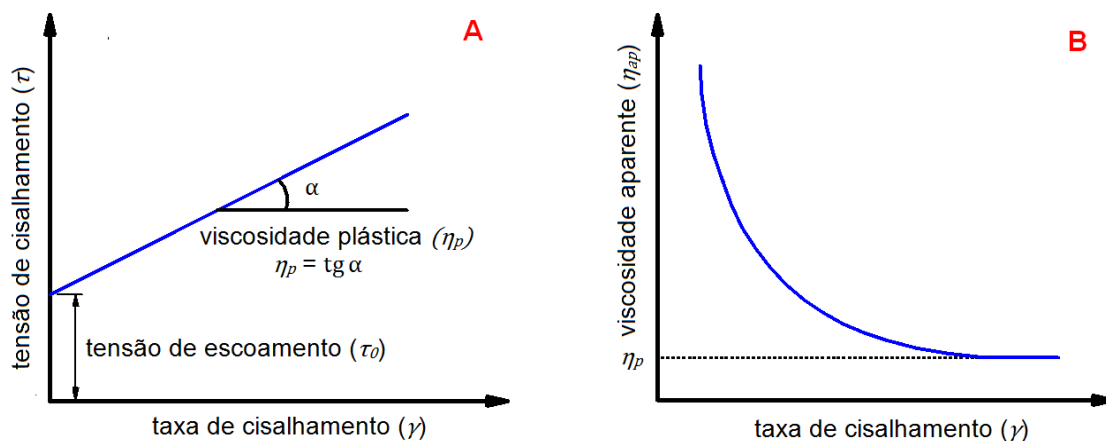
O modelo de Bingham, ou plástico ideal, é o que mais se assemelha com as argamassas. Este é um modelo de fluidos que possuem um comportamento como os fluidos Newtonianos, porém necessitam de uma tensão mínima de cisalhamento para iniciar o fluxo, chamada de tensão de escoamento  $\tau_0$  (Pa),

(OLIVEIRA *et al.*, 2000; MACHADO, 2002). A equação 3 define um fluido de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (3)$$

Onde  $\eta_p$  (Pa.s) é a viscosidade plástica. Vale salientar que a viscosidade aparente  $\eta_{ap}$  (Pa.s), definida pela equação 2, não é constante, portanto, ela varia em função da taxa de cisalhamento. As Figuras 9A e 9B mostram respectivamente, a curva de fluxo e a curva de viscosidade do modelo de Bingham.

Figura 9: Comportamento dos fluidos conforme o modelo de Bingham; A) Curva de fluxo B) Curva de viscosidade



Fonte: Oliveira *et al.*, 2000, com adaptações da autora, 2013.

Entre os métodos de análise da reologia das argamassas, destacam-se o *squeeze flow* e o reômetro. O primeiro consiste na compressão de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas. O método é capaz de avaliar com precisão a faixa de consistência das argamassas em velocidades e graus de deformação diferentes (CARDOSO *et al.*, 2005). O reômetro possui a vantagem de realizar medições da viscosidade e da tensão de escoamento simultaneamente para uma ampla faixa de taxas de deformação (SENFF *et al.*, 2010).

A trabalhabilidade está associada aos conceitos de consistência, plasticidade e tixotropia, sendo esses avaliados pela reologia. Assim, a trabalhabilidade é a propriedade relacionada com a facilidade de transporte e manuseio pelo operário, garantindo as condições de execução e o adequado desempenho do revestimento em serviço (CINCOTTO,1995). Podendo ser influenciada pela forma, dimensões e distribuição granulométrica dos agregados, pois partículas com texturas ásperas, angulosas e alongadas necessitam de mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, aumentando, assim, o custo de argamassas e concretos (METHA e MONTEIRO, 1994). Os cimentos que possuem maior finura podem resultar em argamassas com maior trabalhabilidade e maior retenção de água (CINCOTTO,1995). Da mesma forma, com a incorporação de partículas finamente divididas, geralmente há a melhora da trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume de vazios (METHA e MONTEIRO, 1994). Cincotto (1995) considera a argamassa trabalhável quando esta pode ser espalhada com facilidade sobre o substrato e aderida à superfície, de forma a proporcionar boa produtividade durante a execução do serviço e atingir o acabamento final desejado.

De acordo com a *International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC* (2012), consistência é a propriedade de um material pelo qual ele resiste à mudança permanente de força, ou seja, é a propriedade da argamassa na qual esta tende a resistir à deformação, refere-se à capacidade da argamassa em manter as mesmas características ao longo do tempo. A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pela relação água/aglomerante; relação aglomerante/areia, granulometria da areia e natureza e qualidade do aglomerante (CINCOTTO *et al.*, 1995). Diversos autores classificam as argamassas como: secas, plásticas ou fluidas, conforme a quantidade de pasta que envolve os grãos de areia.

As argamassas secas ocorrem quando a pasta aglomerante preenche somente os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato, pois, existe o atrito entre as partículas resultando em uma massa áspera. Quando a pasta forma uma fina película atuando como lubrificante na superfície dos

agregados, constituindo uma boa adesão entre eles, formando uma estrutura pseudo-sólida, estas são consideradas plásticas e as argamassas fluidas acontecem quando os grãos ficam imersos na pasta sem coesão interna e com tendência de depositar-se por gravidade (segregação), dessa forma, a argamassa encontra-se tão líquida que os grãos de areia não oferecem resistência ao deslizamento, se espalhando facilmente sobre a base, impedindo a execução adequada de trabalho (CINCOTTO *et al.*, 1995; CARASEK, 2007). Conforme a NBR 13276/2005, as argamassas secas apresentam índice de consistência inferior a 250 mm e podem ser aplicáveis em contrapisos; para os índices entre 260 e 300 mm são consideradas argamassas plásticas, muito utilizadas como emboço e por fim, argamassas com índices acima de 360 mm são consideradas fluidas, utilizadas como chapisco (SILVA, 2006).

A plasticidade é uma propriedade que permite à argamassa deformar-se sem ruptura, sob a ação de forças superiores, que promove sua estabilidade, mantendo sua deformação depois de cessado o esforço deformante. O teor de ar, a natureza e a quantidade dos aglomerantes e agregados, bem como a intensidade da mistura e a presença de aditivos influenciam na plasticidade das argamassas. (CARASEK, 2007).

A coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta aglomerante.

A tixotropia foi descoberta em 1923 por Schalek e Szegvari, porém o termo só foi publicado em 1927 por Peterfi, onde relatou corretamente o fenômeno. O termo tem origem na combinação das palavras gregas *thix* (mexendo ou agitando) e *trepo* (mudança de direção), que referem-se às mudanças reversíveis de um sólido-gel (sólido-líquido), devido a agitação mecânica e não apenas por mudança de temperatura (MEWIS, 1979; BARNES, 1997; MEWIS & WAGNER 2009; WALLEVICK 2009).

Atualmente, a terminologia utilizada pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2012) para definir tixotropia afirma que quando é aplicado um fluxo de movimento em uma amostra em repouso ocorre a

diminuição contínua da viscosidade e quando este fluxo é interrompido a viscosidade é recuperada.

Costa (2006) define tixotropia como a capacidade de um gel se liquefazer na medida em que lhe aplicamos uma determinada quantidade de calor ou uma força mecânica, como cisalhamento ou vibrações e, após a cessação do calor ou da força aplicada, esse mesmo gel, então liquefeito, possui a capacidade de voltar ao seu estado original. Para Cincotto *et al.* (2005), o estado gel, no caso das argamassas, diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta, se tornando mais densa após a hidratação. A influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado.

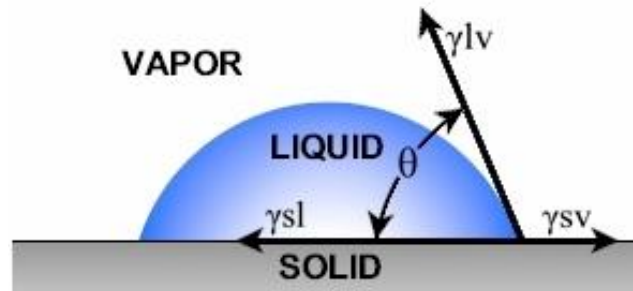
No entanto, a reopexia é um fenômeno reológico caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente em função do tempo em suspensões submetidas a uma taxa (ou tensão) de cisalhamento constante, ou seja, é considerada um fenômeno inverso à tixotropia (OLIVEIRA, 2000; MACHADO, 2002; SCHRAMM, 2006).

A adesão inicial é uma propriedade importante das argamassas no estado fresco, ou seja, é a forma com que a argamassa faz a união com o substrato, pois, quando esta é lançada na parede, deve-se fixar imediatamente à superfície, sem escorrer ou desprender-se, permitindo que o operador possa espalhá-la e acomodá-la de forma adequada. A adesão inicial está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante (ROSELLO, 1976 apud CARASEK, 1996). Esta adesão pode ser explicada através da molhabilidade e da equação de Young-Dupré que descreve um determinado ângulo de contato em estado de equilíbrio ( $\theta$ ).

Segundo Wolf (2006), a molhabilidade é a interação que ocorre entre um sólido e dois ou mais fluidos, sendo possível observar quando uma gota se espalha em uma superfície, pois, quando esta se encontra em equilíbrio com o seu próprio vapor, observa-se uma linha de contato representada por um arco, que é comum às três fases (sólida, líquida e vapor). A partir desta linha, obtém-

se a definição do ângulo de contato ( $\theta$ ), que se resume no espaço formado entre a reta tangente à interface líquido/vapor e a superfície do sólido, como ilustrado pela figura 10.

Figura 10: Molhagem do sólido por um líquido e as tensões atuantes



Fonte: Ramé-hart, 2013.

Sendo  $\gamma_{LV}$ , a tensão superficial líquido/vapor a;  $\gamma_{SL}$ , a tensão superficial sólido/líquido e  $\gamma_{SV}$ , a tensão superficial sólido/vapor.

O trabalho de adesão (*Work of Adhesion*,  $W_A$ ) explica a força de interação entre as fases líquida e sólida e pode ser calculado mediante a equação 4 de Young-Dupré, onde ( $\gamma_{LV}$ ) é a tensão superficial líquido /vapor.

$$W_A = \gamma_{LV} (\cos \theta + 1) \quad (4)$$

Assim, o ângulo de contato é a medida de molhabilidade e quanto menor o ângulo, maior é a molhabilidade. Analogamente, no caso das argamassas, quanto menor o ângulo de contato, maior será adesão superficial da mistura e posteriormente, maior a aderência da argamassa ao substrato no estado endurecido.

#### 2.2.4.2 Retenção de água

Para que as argamassas apresentem bom desempenho após o endurecimento, é necessário que possuam uma capacidade mínima de retenção de água (CARASEK, 1996). Alves & Do Ó (2005) afirmam que a

retenção de água corresponde à propriedade da argamassa de não alterar sua trabalhabilidade, mantendo-se aplicável ao longo do tempo quando sujeita a evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação.

A retenção de água é influenciada pela finura do aglomerante e está diretamente relacionada com a superfície específica. Quanto mais finas são as partículas, maior a área específica dessas e maior a retenção de água (DUJAB, 2000). Este aumento de retenção de água pode ser conseguido de várias formas, seja aumentando os materiais constituintes com maior área específica, mediante a utilização de saibro ou cal nas argamassas, assim como, utilizando aditivos que impeçam a perda de água, isto é, aditivos retentores de água (ALVES e DO Ó, 2005).

#### 2.2.4.3 *Conteúdo de ar incorporado*

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar aprisionado na argamassa fresca, influenciando diretamente na densidade de massa das argamassas nos estados fresco e endurecido, pois o ar possui densidade menor que a argamassa e ocupa uma fração da sua massa (NAKAKURA & CINCOTTO, 2004). O aumento do teor de ar nas argamassas pode reduzir os pontos de contato das argamassas com o substrato e resultar em baixa resistência de aderência, contudo, o teor de ar, isoladamente, não pode ser considerado como um parâmetro indicador da qualidade da argamassa, pois, a depender do tipo de incorporador de ar, irá formar tamanho de bolhas diferentes, influenciando na aderência. Bolhas pequenas e de estrutura uniforme favorecem a resistência de aderência, enquanto que bolhas grandes e estruturas irregulares são prejudiciais (CARASEK, 1996). As bolhas de ar grandes são menos estáveis por possuírem maior força de ascensão, dessa forma, tendem a subir para a superfície e podem ser perdidas (ALVES, 2002).

Os aditivos incorporadores de ar aumentam presença de bolhas de ar microscópicas nas argamassas, assim, melhoram a coesão, permitindo diminuir a quantidade de agregado miúdo da mistura, sem alterar a tendência

de exsudação e segregação. As bolhas de ar melhoram a trabalhabilidade podendo-se reduzir a quantidade de água da mistura e, além disso, contribuem na retenção de água, reduzindo a retração por secagem e a retração plástica (ALVES, 2002).

## **2.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido**

No estado endurecido, as principais propriedades analisadas para as argamassas são: resistência mecânica, porosidade, densidade, retração e absorção de água por capilaridade (CINCOTTO *et al.*, 1995; BAUER, 2005).

### **2.2.5.1 Resistência mecânica**

A capacidade das argamassas de resistir às tensões de tração, compressão ou cisalhamento, decorrentes de cargas de natureza estática ou dinâmica a que os revestimentos podem estar sujeitos, consiste na resistência mecânica, podendo ser acentuada mediante aos efeitos climáticos e ambientais (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A resistência à compressão manifesta-se nas argamassas pelo seu endurecimento, quando ocorrem as reações de hidratação do cimento. Embora a resistência à compressão seja um importante parâmetro para a verificação da uniformidade de produção, a solicitação maior às quais as argamassas de revestimento estão sujeitas são as de tração ou cisalhamento. Portanto, a resistência à compressão está mais associada ao desempenho das argamassas de assentamento, com relação aos sistemas de vedação e a resistência à tração ou a esforços cisalhantes são mais requeridos nas argamassas de revestimento (NAKAKURA & CINCOTTO, 2004).



### 2.2.5.2 *Retração*

O mecanismo de retração consiste na variação de volume da argamassa devido à remoção de água retida pelas forças superficiais do gel da pasta aglomerante, água absorvida, e da água retida entre as superfícies dos cristais durante o processo de secagem, ou seja, água intersticial (CINCOTTO,1995). Para Peña (2004), o processo de retração é decorrente da reação química dos ligantes e da perda do excesso de água da matriz cimentícia, sendo influenciado tanto pela composição da mistura quanto pelas condições de exposição às quais o material está sujeito.

Yuan (2003) afirma que a retração é uma das propriedades mais significativas nas fissuras. De acordo com Peña (2004) existem muitas variáveis influenciando na retração e essas podem ser classificadas em dois grupos: quando se referem à composição da mistura, onde se encontra a relação água/cimento e o volume da pasta e quando se referem às condições de exposição, observa-se o período de cura, a umidade relativa do ambiente, temperatura, relação superfície/volume, grau de restrição e vento.

A fissuração afeta a estanqueidade e a durabilidade de um revestimento, visto que, após a aplicação, a argamassa é impedida de retrair-se livremente devido à aderência ao substrato. Isso leva ao surgimento de tensões de tração no interior da argamassa ou na zona de contato argamassa/substrato, que podem gerar fissuração no revestimento (BASTOS *et al.*, 2005). Assim, o teor de aglomerantes determina a retração por hidratação e por carbonatação. Observa-se que o aumento do teor de cimento eleva o potencial de retração da argamassa (CINCOTTO *et al.*, 2005).

### 2.2.5.3 *Permeabilidade*

Propriedade que avalia a passagem de água através da argamassa endurecida por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água, a permeabilidade depende das características do substrato,

além da granulometria do agregado, natureza e teor do aglomerante. Em geral, quanto maior o teor de cimento, menor a permeabilidade das argamassas (CINCOTTO *et al.*, 1995; SANTOS, 2008).

A porosidade é a medida da proporção do volume total de concreto ou argamassa ocupada pelos poros, expressa em porcentagem. Se a porosidade for grande e os poros interligados, estes contribuem para o deslocamento de fluidos no interior do concreto, aumentando a permeabilidade, porém, se os poros forem descontínuos, ineficazes no deslocamento dos fluidos, a permeabilidade será baixa, mesmo contendo uma porosidade alta. Por isso, a permeabilidade de argamassas e concretos não é uma função simples da porosidade, pois depende das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997).

A permeabilidade da pasta de cimento é controlada pela porosidade capilar, pois esta decresce com a evolução da hidratação. O volume total do gel (massa coesiva de cimento hidratado oriundo das reações de hidratação) é aproximadamente 2,1 vezes maior do que o volume de cimento não hidratado. O gel vai preenchendo os espaços ocupados pela água com o passar do tempo, assim, os poros capilares tendem a ser bloqueados e segmentados por este. Se houver uma relação água/cimento adequada e um período de cura úmida ideal, resultará na ausência de capilares contínuos, melhorando a estanqueidade das argamassas e concretos (NEVILLE, 1997).

### **2.2.6 Propriedades das argamassas no estado aplicado**

Quando as argamassas são utilizadas como revestimento, estas se relacionam com as propriedades no estado endurecido, tais como: porosidade, resistência de aderência, resistência à tração e módulo de elasticidade que, juntos, constituem parâmetros para promover maior durabilidade nas edificações.

### 2.2.6.1 Aderência

Cincotto *et al.* (1995) afirmam que a aderência tem papel fundamental no desempenho das argamassas de revestimento e na absorção de tensões que surgem na interface do revestimento com os componentes da base, sendo influenciada pelas condições do substrato (porosidade, absorção de água, resistência mecânica, textura superficial) e pelas condições de execução de assentamento. Para Maciel *et al.* (1998), a aderência é definida como a propriedade do revestimento de manter-se fixo ao substrato, através da resistência às tensões que surgem na zona de interface entre a base e o revestimento. Silva e Libório (2002) afirmam que a falta ou perda de aderência dos revestimentos de argamassa aos seus substratos prejudica a habilitabilidade, o conforto dos usuários e a estética do revestimento.

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido à penetração desta nos poros ou entre as rugosidades do substrato. Parte da água de amassamento contendo os componentes aglomerantes penetra pelos poros e pelas cavidades do substrato. No interior dos poros ocorre a hidratação do cimento e da cal fazendo com que haja a ancoragem da argamassa à base através do intertravamento da etringita (CARASEK, 2007). A etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ), é um dos produtos de hidratação do cimento em formato de cristais prismáticos aciculares (METHA & MONTEIRO, 1994).

Muitos fatores exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas, como: rugosidade, porosidade e sucção da água pelo substrato; forma de execução, cura, limpeza e preparo da base; reologia, adesão inicial e retenção de água das argamassas; além das condições climáticas, como ventos, temperatura e umidade relativa (CARASEK, 2007).

A granulometria dos aglomerantes e agregados também possui papel fundamental na aderência das argamassas. Quanto mais fino é o cimento, maior é a aderência e a resistência das argamassas, principalmente nas idades iniciais. Contudo, os elevados teores de cimento podem levar a retração e a fissuras.

A finura da cal também proporciona importantes propriedades plastificantes e de retenção de água, pois, as argamassas com cal permitem melhor preenchimento das irregularidades entre a argamassa e o substrato. Com relação ao agregado miúdo, a areia deve possuir uma distribuição granulométrica contínua, pois quanto mais trabalháveis forem as argamassas, maior será a resistência de aderência obtida. O aumento do teor de areia reduz a resistência de aderência, por outro lado, é a areia que garante a durabilidade da aderência pela redução da retração por constituir-se no esqueleto indeformável da massa. Portanto, a combinação harmoniosa entre os elementos da mistura é que faz com que as argamassas sejam resistentes, duráveis e bem aderidas ao substrato (CARASEK, 2007).

#### 2.2.6.2 *Elasticidade*

Um material é considerado perfeitamente elástico se surgem e desaparecem deformações imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões (NEVILLE, 1997), ou seja, a elasticidade é a capacidade das argamassas em se deformarem sem que ocorra a ruptura, retornando às suas dimensões originais quando cessarem as solicitações que lhes são impostas. As deformações no concreto, que frequentemente levam à fissuração, ocorrem como um resultado da resposta do material à carga externa e ao meio ambiente (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O módulo de elasticidade da argamassa está relacionado com a sua capacidade de absorver deformações, eventuais movimentações e acomodações da alvenaria. Quanto maior for esta capacidade, menor é o módulo de deformação e menor é a quantidade de cimento empregada na argamassa. Os revestimentos têm melhor desempenho quando conseguem absorver deformações próprias e da base sem se romper (NAKAKURA & CINCOTTO, 2004).

## 2.3 Uso do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG)

Diversos estudos foram realizados com a utilização do RCMG, como na produção de vidros borossilicatos (MARÇAL, 2001), em cosméticos (OLIVEIRA *et al.*, 2007) e em adubação de solos tropicais (MACHADO *et al.*, 2006).

Bilgin *et al.* (2012) adicionaram resíduo de pó de mármore na produção de tijolos industriais em proporções em massa de 0 - 80%. Os autores observaram que as misturas contendo 10% de pó de mármore e 90% de pó de tijolo não alteraram as propriedades mecânicas do produto final, comparadas ao tijolo de referência, porém com adições superiores a 10% houve um aumento da absorção de água e a diminuição das propriedades mecânicas dos tijolos.

Durante a sinterização dos tijolos, com temperaturas variando entre 900 a 1100°C, houve a queima de matéria orgânica que resultou na retração do material, reduzindo assim, seu peso e tamanho. Porém com o acréscimo de pó de mármore, apesar da redução de peso, houve um aumento de volume. Os autores concluíram que a principal razão para isso foi a ocorrência de poros na estrutura devido a liberação de CO<sub>2</sub> durante a calcinação CaCO<sub>3</sub> e também pelo fato da cal virgem (CaO), originada durante a calcinação, ser um composto muito expansivo e reativo. Por consequência, o aumento da porosidade resultou na diminuição da resistência à flexão.

### 2.3.1 Uso do RCMG como adição em matrizes cimentícias

Krstulović *et al.* (1994) observaram que o RCMG melhorou a resistência de argamassas e concretos, principalmente quando foram adicionadas quantidades pequenas de resíduo, entre 5 e 6% em relação à massa de cimento. Os autores também perceberam que o este efeito é mais evidente se o material de enchimento for muito fino, como é o caso do *filler* calcário utilizado na pesquisa.

Freire *et al.* (2009) utilizaram o resíduo do corte de granito (RCG) em blocos paisagísticos, utilizando o traço de 1:2:1 (cimento: areia: água), onde se adicionou 10% e 25% de RCG em relação à massa de cimento. Durante a pesquisa, constatou-se que a resistência à compressão axial com 10% de adição de resíduo obteve ganho médio maior que as argamassas com 25% de adição. Da mesma forma, os blocos contendo 10% de adição de resíduo produziram uma barreira física melhor à absorção da água, diminuindo a porosidade. Os autores concluíram que a adição de 10% de RCG apresentou melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade.

Binici *et al.* (2008) utilizaram o RCMG como agregado graúdo (19mm) e escória de alto-forno junto com areia como agregados miúdo, na produção de concretos e verificaram que houve redução na profundidade de penetração de cloretos em aproximadamente 70%, além de obter melhor ligação entre os componentes da mistura (aditivos, cimento e agregados). Os resultados indicaram que os agregados de resíduo de mármore e granito podem ser usados para melhorar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a resistência química do concreto convencional.

Gonçalves (2000) adicionou o resíduo de corte de granito RCG em concretos nas proporções de 10% e 20% em relação à massa de cimento, mantendo constante a relação água/cimento e verificou que as misturas com adição do resíduo apresentaram maior coesão e consistência e diminuíram a exsudação. O desempenho mecânico também foi melhorado, apresentando aumento na resistência à compressão axial de 8% e 19,6% para os teores de 10% e 20%, respectivamente. As taxas de absorção por sucção capilar e por imersão diminuíram com a adição de 10% de RCG e aumentaram para o teor de 20% de RCG, indicando que o resíduo promove o preenchimento dos poros, diminui a taxa de absorção e a porosidade efetiva potencial, além de aumentar a resistência capilar. Por fim, o autor concluiu que a adição de 10% de RCG promove no geral, os melhores resultados.

### 2.3.1.1 *Uso do RCMG como substituição ao aglomerante em matrizes cimentícias*

No estudo realizado por ERGÜN (2011), houve a substituição parcial do cimento em 5% pelo resíduo de mármore e a diatomita. Os resultados obtidos mostraram que além do uso de um aditivo superplastificante na mistura, a substituição do cimento pelo resíduo de mármore e/ou diatomita (tanto juntos, quanto separados), melhorou as propriedades mecânicas dos concretos convencionais.

Estudos sobre cimentos alternativos, onde o clínquer foi parcialmente substituído pelo resíduo de corte de mármore nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, chegaram aos seguintes resultados: os tempos de início e fim de pega não foram afetados com o aumento do teor de resíduo; as argamassas produzidas com os cimentos contendo diferentes teores de resíduo de mármore apresentaram desempenho mecânico similar àquelas em que foi utilizado o cimento Portland comum (após 90 dias de cura); houve uma queda máxima de 4% na resistência da composição da mistura contendo 15% de resíduo, fazendo com que os autores concluíssem que o resíduo pode ser usado na produção de cimento e possuirá o mesmo desempenho do cimento convencional e principalmente, reduzindo os custos. (ARUNTAŞ *et al.*, 2010).

Já Menezes *et al.* (2009) verificaram que argamassas produzidas com até 50% de resíduo como substituição à cal, apresentaram desempenho mecânico semelhante ao das argamassas de referência, apesar de o teor de aglomerante ter sido reduzido até a metade. Os autores afirmam que isso ocorreu devido ao efeito físico do RCMG, que atua como material de preenchimento, refinando a estrutura dos poros e alojando-se entre os grãos do agregado. A zona de transição matriz-agregado e a matriz aglomerante se tornaram mais densas, melhorando o empacotamento do sistema e evitando a queda da resistência mecânica.

### 2.3.1.2 *Uso do RCMG como substituição à areia em matrizes cimentícias*

Corinaldesi *et al.* (2010) avaliaram o efeito da adição do resíduo de corte de mármore em concretos autoadensáveis e constataram que, na presença de aditivo superplastificante, o resíduo é bem eficiente para melhorar a resistência à segregação. O resíduo foi incorporado como substituição parcial ao cimento ou à areia em 10% e a consistência foi fixada como parâmetro de controle. Em ambos os casos ocorreu um decréscimo na resistência à compressão aos 56 dias, no entanto, com a substituição do resíduo de mármore pela areia houve apenas 10% de redução, enquanto que a substituição do resíduo pelo cimento diminuiu ainda mais a resistência à compressão, chegando a 20%. Entretanto, as resistências atingidas pelas argamassas nas idades iniciais foram superiores às da mistura de referência, constatando o efeito *filler* do resíduo no processo de hidratação do cimento.

No estudo de Cruz *et al.* (2003) apud Reis e Tristão (2007), foram produzidas argamassas de cimento e areia com relação água/cimento constante ( $a/c = 0,48$ ), traço 1:3 e substituição parcial da areia pelo resíduo de corte de rochas ornamentais em teores de 5% a 20%. Foi constatado que o módulo de elasticidade das argamassas aumentou para teores de até 15% de resíduo, sendo que com 20% de substituição houve um decréscimo neste valor.

Na pesquisa realizada por Moura *et al.* (2002), com argamassas de revestimento de traço 1:6 (cimento : areia), houve a substituição da areia pelo RCMG, em proporções de 5% e 10% em relação à massa da areia, observando-se o aumento de resistência em todas as idades estudadas, principalmente na substituição de 10% da areia, onde houve o melhor resultado. A areia utilizada foi oriunda de um solo areno-siltoso com características similares à areia utilizada nesta pesquisa.



### **2.3.2 Considerações**

Assim, o presente trabalho buscará utilizar o RCMG como adição em argamassas simples, de cimento e areia, a fim de avaliar seu comportamento no estado fresco, endurecido e aplicado, além disso, para observar o comportamento do RCMG na prática, será avaliado o efeito deste nas argamassas mistas (cimento e cal) e argamassas industrializadas.

Porém, o grande diferencial desta pesquisa, além de utilizar diferentes argamassas, visa focar os estudos da reologia, no estado fresco, que, por conseguinte, irão influenciar nos estados endurecido e aplicado. Outra importante contribuição, que raramente é observada, é a verificação da expansibilidade, que pode ocorrer em argamassas, com o uso do RCMG, pois dependendo da quantidade de MgO e CaO existente na mistura, esses compostos podem expandir, gerando trincas e fissuras. Assim, será possível contribuir com uma pequena parcela no mundo do conhecimento.



### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS**

Serão descritos a seguir os materiais utilizados neste trabalho, assim como os métodos empregados na caracterização destes e na avaliação do desempenho das argamassas produzidas.

#### **3.1 Materiais**

Foram confeccionados três tipos de argamassas para a realização dos ensaios e confecção dos painéis: argamassa simples (cimento, areia e RCMG); argamassa industrializada com adição do RCMG e argamassa mista (cimento, cal, areia, RCMG e aditivo incorporador de ar).

##### **3.1.1 Cimento Portland**

Utilizou-se o cimento Portland CP-II Z 32 RS, da marca Poty, comercialmente disponível na cidade de Salvador, Bahia.

##### **3.1.2 Areia**

A areia natural, no âmbito dos materiais de construção civil, é classificada como agregado miúdo, conforme a NBR NM 248:2003, cujos grãos estão compreendidos na faixa de 150  $\mu\text{m}$  a 4,75 mm de diâmetro esférico equivalente. As areias podem ser provenientes de planícies aluviais, leitos de rios, minas ou jazidas, praias e dunas litorâneas, sendo os dois últimos tipos inadequados como materiais de construção devido aos elevados teores de sais (SERNA & REZENDE, 2009). Neste estudo foi utilizada areia natural de jazida, proveniente do município de Camaçari, na Região Metropolitana de Salvador.

### **3.1.3 Água de amassamento**

A água utilizada é proveniente da rede pública de abastecimento da Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A. – Embasa.

### **3.1.4 Resíduo de corte de Mármore e Granito (RCMG)**

O resíduo, coletado em forma de lama, foi gerado por uma marmoraria localizada na Região Metropolitana de Salvador. Sua composição química pode variar em função das proporções indefinidas de mármore e granito, a depender da demanda dos clientes pelos tipos de rochas, portanto, o lote em estudo pode apresentar variações em relação a outras pesquisas.

A empresa estudada possui área útil de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> e realiza apenas o beneficiamento secundário das rochas, que consiste na obtenção de produtos acabados e polimentos. Os estados fornecedores de rochas são o Espírito Santo e a Bahia. As chapas chegam à empresa medindo aproximadamente 1,90 x 2,80 x 0,02 m<sup>3</sup> e são descarregadas com o auxílio de ventosas e ganchos. Por meio de um dispositivo móvel que se desloca sobre trilhos suspensos, as chapas são levadas ao local de estoque situado em um grande galpão, sendo agrupadas de acordo com o tipo de rocha. A Figura 11 ilustra este processo.

O primeiro passo do processo de corte é a máquina com serra de disco de diamante, onde são executados cortes retos. A lâmina da serra fica fixa e as chapas das rochas ficam apoiadas sobre uma plataforma móvel que desliza em direção a serra. Todo o processo é realizado com a presença de água para facilitar o corte, resfriar a lâmina e evitar a dispersão de material particulado, gerando uma lama formada por resíduo de rochas e água, que é depositada em um reservatório. Como a serra é de disco de diamante, o resíduo gerado torna-se mais “puro” em relação às máquinas de granalha de ferro utilizadas na maioria das pedreiras. Este processo pode ser observado pela Figura 12.

Figura 11: Etapas do processo de chegada de chapas brutas na marmoraria, A) Chegada das chapas, B) Depósito das chapas brutas.



Fonte: A autora, 2013.

Figura 12: Processo de cortes lineares em serras de diamante, A) Máquina de corte serrando a chapa bruta, B) Detalhe da serra com disco de diamante.



Fonte: A autora, 2013.

A fração mais viscosa da lama é decantada no tanque e, em seguida, transportada a poços de armazenamento através de uma tubulação subterrânea até o momento do seu descarte. Com o intuito de minimizar os impactos ambientais, foi este o resíduo utilizado na pesquisa.

Após os primeiros cortes longitudinais e transversais, as peças são enviadas para o acabamento final e polimento. Nesta etapa utilizam-se o disco de desbaste (DDA) ou fresa e o rebolo para lapidar, fazer cantos arredondados e acabamento com brilho. Neste local, conforme a Figura 13, os acabamentos são realizados com lixas secas e lixas d'água. Essas vão aumentando de numeração conforme a necessidade de melhor acabamento, começando pelas

lixas secas de números 36, 60, 120, e continuando para dar brilho, com os números 220, 320, 400, 600, 800, 1200. No caso dos granitos, após todas essas, ainda são utilizadas as lixas d'água de números 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 3000.

Figura 13: Processo de acabamento final na marmoraria, A) Acabamento lateral por meio de discos, B) Acabamento de cantos arredondados por meio do rebolo.



Fonte: A autora, 2013.

Contudo, estão previstas mudanças nas instalações até 2014, para melhor se adequarem às questões ambientais e de segurança no trabalho, como a substituição de lixas secas por lixas d'água, minimizando bastante os resíduos particulados no ar. Durante o primeiro corte nas serras, a lama formada por pó de mármore, granito e água vai direto para um poço e a cada seis meses, uma empresa terceirizada retira uma quantidade de lama, equivalente a 10 mil litros, conduzindo-a para um aterro. Conforme os dados da empresa, a perda de peças durante a segunda etapa, desde a retirada das placas nas pedreiras até as serrarias e posteriormente à casa do cliente, atinge o índice de 15%.

Quanto ao tratamento do RCMG para a presente pesquisa, este foi coletado na forma de torrões de lama seca, desaglomerado por meio de almofariz e passado na peneira, com abertura de 2,36  $\mu\text{m}$ , para a retirada de impurezas maiores, em seguida, foi levado para a estufa, por 24 horas. Preferiu-se utilizar o material já seco ao invés da lama, tornando desnecessária a correção do volume de água a ser utilizado nas argamassas.

### **3.1.5 Argamassa industrializada**

A argamassa industrializada foi fornecida pelo próprio fabricante, sendo da marca Contimassa, de múltiplo uso e bombeável, destinada para revestir paredes e tetos. As proporções dos seus componentes não foram reveladas, porém, ela é composta por cimento, areia, cal e aditivos (plastificante e incorporador de ar).

### **3.1.6 Cal**

A cal hidratada utilizada na mistura é do tipo CH-I, da marca Damasceno, originária de Euclides da Cunha – BA e está conforme a norma NBR 7175:2003.

### **3.1.7 Aditivo**

O aditivo utilizado foi do tipo incorporador de ar, plastificante para argamassa de pega normal, impermeabilizante e estabilizante, da marca Forte Massa.

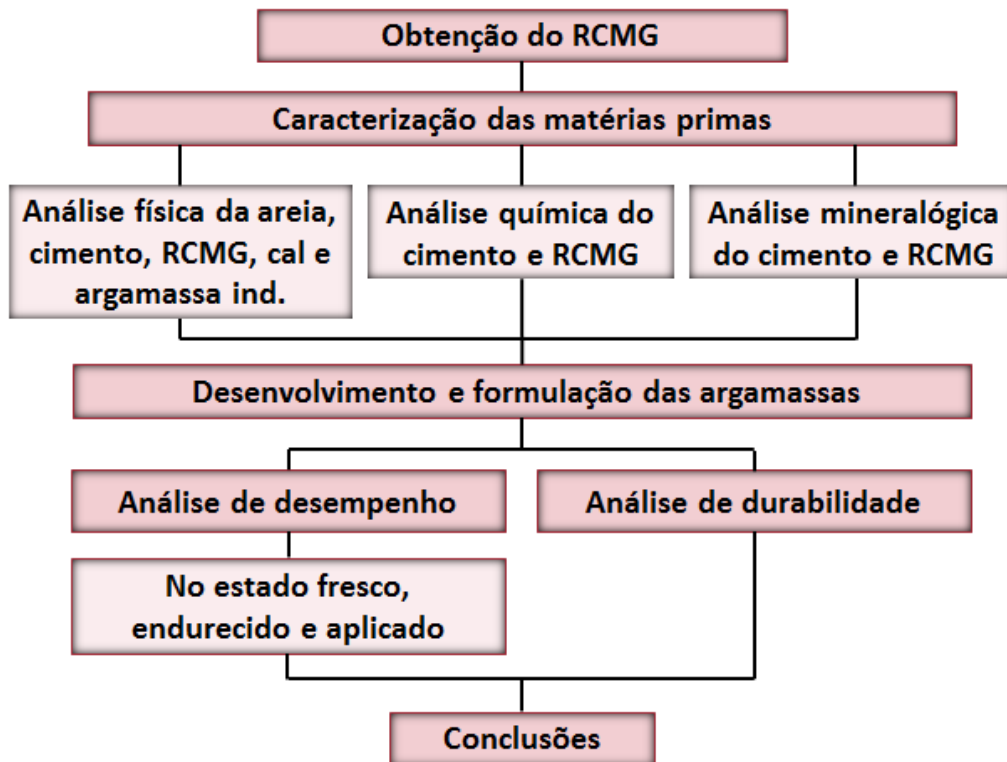
## **3.2 Métodos**

As matérias primas foram devidamente caracterizadas para se obter informações necessárias quanto às possibilidades de uso, principalmente o RCMG devido a sua composição ser desconhecida para este estudo. Conforme as pesquisas de Bilgin *et al.* (2012), Freire *et al.* (2009), Gonçalves (2000), Ergün (2011), Aruntaş *et al.*, 2010 e Menezes *et al.* (2009), que utilizaram o resíduo em seus estudos, os resultados se mostraram mais eficazes quando

utilizaram o RCMG em matrizes cimentícias. Contudo, a depender da porcentagem de cada tipo de rocha, como por exemplo, se houver maior composição de granitos escuros, onde a presença do magnésio é maior, aumenta-se a probabilidade de reações de expansão com o cimento durante a mistura e o endurecimento. Portanto, a caracterização adequada do RCMG e das matérias primas foi imprescindível para minimizar problemas futuros.

Em seguida, os corpos de prova foram moldados de acordo com as prescrições das respectivas normas de ensaio, assim como os painéis. As avaliações foram realizadas a partir da análise de desempenho mecânico e dos parâmetros de durabilidade apresentados pela argamassa de referência e das argamassas com RCMG em seus diferentes traços. A Figura 14 mostra o fluxograma de todo o projeto experimental.

Figura 14: Fluxograma do projeto experimental.



Fonte: A autora, 2013.



### **3.2.1 Caracterização das matérias primas**

As matérias primas foram caracterizadas quanto à massa específica, massa unitária, distribuição do tamanho de partículas, área superficial específica, materiais pulverulentos, composição química (FRX) e as fases foram identificadas por (DRX).

#### **3.2.1.1 Massa específica e densidade real**

A massa específica ( $\rho$ ) é determinada pela relação entre a massa ( $m$ ) e o volume ( $V$ ), levando em consideração o volume dos grãos e seus poros impermeáveis, ou seja, expressa a quantidade de massa por volume efetivamente ocupada pelos agregados na composição, visto que as irregularidades superficiais dos grãos são completamente preenchidas pela pasta. Essa grandeza é um parâmetro essencial para os cálculos, em volume, da quantidade de agregados ou ligantes necessários para uma mistura e do consumo de materiais necessários para argamassas. A massa específica da areia foi determinada pelo método do frasco de Chapman e a densidade real do cimento, da cal e do RCMG foi determinada por picnometria a gás hélio, utilizando o aparelho AccuPyc 1330 V2.01, da Micrometrics, sendo analisadas pelo Laboratório de Formulação e Síntese Cerâmica (LAFSCer) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

#### **3.2.1.2 Massa unitária**

A massa unitária é a relação entre a massa e uma unidade de volume do material, considerando os vazios existentes entre os grãos. É também referida por massa barimétrica ou massa específica aparente. Este parâmetro não é utilizado no cálculo do consumo real de materiais, sendo empregado somente na conversão de massa para volume em campo, ou seja, na prática das

construções, quando ocorrem situações nas quais não é possível o uso de balanças.

O grau de adensamento, ou compactidade, é um fator que influencia no valor da massa unitária. De modo que, a depender do procedimento adotado, pode-se aferir a massa unitária no estado solto ou massa unitária no estado compactado. Neste estudo, foi realizado o ensaio de massa unitária no estado solto da areia seca (NBR NM 45/2006, “Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios”). O ensaio consiste em determinar a massa de agregado necessária para preencher completamente um recipiente de volume conhecido, deixando o agregado cair de uma altura não superior a 10 cm, sem compactação. A massa unitária no estado solto, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , corresponde à razão entre essa massa e o volume do recipiente.

### 3.2.1.3 *Distribuição do tamanho de partículas*

A granulometria do RCMG, do cimento, da cal e da argamassa industrializada foi determinada com o auxílio de um sedígrafo - Horiba CAPA-700, que faz a análise da distribuição do tamanho de partículas através do princípio da foto-sedimentação em fase líquida. A velocidade da sedimentação das partículas varia conforme o tamanho, as que possuem maior diâmetro sedimentam-se primeiro e através de transmissão óptica é possível avaliar a intensidade de luz transmitida pela solução por meio de um detector localizado do lado oposto da célula de leitura (RIBEIRO, 2010). Este ensaio foi realizado no LAFSCer – UFSCar.

Para a análise granulométrica da areia, foi feito o peneiramento manual com um conjunto de peneiras ABNT, de acordo com a NBR 7211/2009 (“Agregados para concreto - Especificação”). A distribuição do tamanho de partículas é feita decompondo a massa total utilizada no ensaio em faixas de tamanhos de grãos, correspondentes às aberturas das malhas das peneiras. A partir da verificação da granulometria da areia foi determinado o seu módulo de finura, sendo este uma grandeza adimensional que serve como indicativo da

finura do agregado e é calculado algebricamente mediante a soma das percentagens retidas em cada peneira da série normal e dividindo o resultado por cem.

#### 3.2.1.4 *Área superficial específica*

A área superficial específica é uma grandeza expressa em unidade de área por unidade de massa, e consiste em um indicador da finura e reatividade de um material. A demanda de água para atingir uma determinada consistência é maior em misturas contendo materiais finamente divididos se comparada àquelas com partículas maiores. Isso se dá devido à maior quantidade de água adsorvida na superfície das partículas. Assim, um aumento na área superficial geralmente é acompanhado do aumento da taxa de uma reação química.

As áreas superficiais específicas BET do cimento, do RCMG, da cal e da argamassa industrializada foram determinadas com o auxílio do aparelho Gemini 2370 V1.02, da Micrometrics. Essa determinação foi realizada no LAFSCer, na UFSCar. As observações são interpretadas seguindo o modelo de Brunauer, Emmet e Teller (método BET), em que a área superficial é determinada a nível atômico, pela quantidade de moléculas de N<sub>2</sub> adsorvida fisicamente na superfície das partículas (RIBEIRO, 2010).

#### 3.2.1.5 *Materiais pulverulentos*

As areias contêm impurezas que podem ser prejudiciais para a constituição de argamassas e concretos. Os materiais pulverulentos são constituídos por partículas finas de argila ou outros componentes que se dispersam ou são dissolvidos na água. Para a caracterização dos materiais pulverulentos existentes na areia foi utilizada a NBR NM 46:2003 (“Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem”). Esta norma estabelece o método de determinação por lavagem, em

agregados, da quantidade de material mais fino do que a abertura de malha da peneira de 75  $\mu\text{m}$ .

#### 3.2.1.6 *Composição química*

A técnica de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) foi utilizada para a determinação da composição química do RCMG. O ensaio foi realizado pela SGS GEOSOL Laboratórios Ltda.

A fonte de radiação do analisador emite fótons que, caso tenham energia suficientemente alta, são capazes de criar vacâncias nas camadas eletrônicas internas dos átomos da amostra. Ao se deslocarem para preencher essas vacâncias, os elétrons das camadas mais externas emitem radiações fluorescentes que são características dos elementos químicos presentes. Assim, o princípio da técnica é a medida do comprimento de onda e energia dos fótons de raios X característicos (fluorescência) emitidos pela amostra. Isso permite a identificação dos elementos que compõem o material, assim como a determinação de suas massas ou concentrações. A FRX possui certa limitação, apresentando apenas os óxidos dos elementos presentes no RCMG, portanto, para melhor compreensão, foi necessária a complementação mediante o uso da difratometria de raios X (DRX), (RIBEIRO, 2010).

#### 3.2.1.7 *Identificação de fases*

Para identificar as fases cristalinas do RCMG, utilizou-se a técnica de difração de raios X (DRX), por meio de um difratômetro Rigaku Geirgefex ME 210 GF2 para obter os espectros de difração na faixa de  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $80^\circ$ , modo contínuo a  $2^\circ/\text{min}$ . O ensaio foi realizado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP).

A técnica baseia-se na incidência de um feixe monocromático de raios X na amostra, que deve estar pulverizada (partículas de 0,002 mm a 0,005 mm

de diâmetro). Quando o feixe atinge um átomo, os elétrons ao seu redor começam a oscilar na mesma frequência do feixe incidente e, havendo interferência construtiva entre as ondas, o feixe sofrerá difração em um ângulo que é o dobro do ângulo de incidência (em relação a um plano fixo), conforme a lei de Bragg (Equação 5):

$$n\lambda = 2d.\text{sen}(\theta) \quad (5)$$

Em que  $n$  é a ordem de difração ( $\lambda$ ), é o comprimento de onda característico do feixe,  $d$  é a distância interplanar dos planos cristalográficos e  $\theta$ , o ângulo de incidência. São obtidas informações relativas às distâncias entre os planos cristalográficos e à intensidade da reflexão. Os picos de difração, verificados para cada ângulo ( $2\theta$ ), são característicos, de modo que, a partir do padrão de difração, é possível identificar as fases presentes na amostra de um determinado material. Para tanto, utilizou-se a base de dados *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS).

### **3.2.2 Desenvolvimento e formulação das argamassas**

Após a caracterização química, física e mineralógica dos materiais empregados, foi elaborado o traço das argamassas para o preparo dos corpos de prova e a preparação dos painéis com aplicação de chapisco e de argamassa em camada única. Os tipos de argamassas estudadas foram: argamassa simples, argamassa mista e argamassa industrializada.

#### **3.2.2.1 Argamassa simples**

A partir de estudos realizados com argamassas de revestimento (DUJAB, 2000) e de ensaios preliminares em laboratório, definiu-se o traço da argamassa simples sendo de 1,00: 2,60: 0,59 (cimento: areia: água), em

massa, sobre o qual foi acrescentada a quantidade de 5%, 10% e 15% de RCMG em relação à massa de cimento. É comum utilizar argamassas com este traço para reparo ou em concretos, no entanto, a argamassa simples também foi avaliada no estado aplicado, como revestimento. O consumo de materiais por metro cúbico e o traço podem ser observados pela Tabela 2.

A relação água/cimento foi mantida constante, como parâmetro de controle, e neste caso, nenhum tipo de aditivo foi empregado, a fim de que a análise do comportamento do RCMG não fosse mascarada ou influenciada por outras variáveis. Utilizou-se o cimento CP-II Z 32 RS da marca Poty, areia natural quartzosa vendida comercialmente, resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) e água proveniente da Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A. – Embasa.

Tabela 2: Consumo de materiais em Kg/m<sup>3</sup> da argamassa simples

Teor	Cimento	Areia	Água	RCMG
0%	529,08	1375,62	312,16	-
5%	524,33	1363,27	309,36	26,22
10%	519,67	1351,14	306,60	51,97
15%	515,99	1341,59	304,44	77,40
Traço	1,00	2,60	0,59	x

Fonte: A autora, 2013.

As argamassas foram misturadas mecanicamente, em betoneira, com capacidade para 120 litros, em torno de 10 min. Uma parte da mistura foi utilizada para aplicação do revestimento do painel e a outra foi destinada à confecção dos corpos de prova prismáticos (4cm x 4cm x 16cm) e cilíndricos (5cm x 10cm), onde realizou-se o adensamento em mesa vibratória. Após 24h houve a desmoldagem dos corpos de prova e estes foram submetidos à cura imersa em água com cal, até que atingissem as idades dos ensaios.

Vale salientar que as argamassas simples (AS) foram avaliadas como revestimento, mesmo sem serem destinadas para este fim, pois são ricas em cimento e não tem nenhum outro tipo de aglomerante ou de aditivos para deixá-las mais plásticas.

Portanto, para a avaliação como revestimento foram construídos quatro painéis de aproximadamente 1,00m de largura x 1,50m de altura com blocos cerâmicos medindo 9 cm x 24cm x 30cm. O traço da argamassa utilizada para o assentamento dos blocos e chapisco foi de 1:3 (cimento: areia). Os painéis foram construídos em área externa coberta a fim de se reproduzir condições climáticas reais para as análises dos ensaios. Após 24h da construção dos painéis, foi aplicado chapisco sem peneira, composto por cimento, areia e água, como utilizado nas construções em Salvador, portanto sua espessura ficou em torno de 5mm. Sobre o chapisco foi aplicada a argamassa em camada única, totalizando uma espessura em torno de 3,0cm, um pouco acima do que prescrito pela NBR 13749/96, que visa ser aproximadamente de 2,5cm.

### 3.2.2.2 Argamassa mista

Para a melhor representação de argamassas de revestimento, optou-se por avaliar o comportamento do RCMG em argamassas com cal. Para tanto, utilizou-se o mesmo traço de uma construtora em Salvador e acrescentou-se o RCMG nos teores de 5%, 10% e 15% em relação à massa de cimento, mantendo-se constante a relação água/cimento. Utilizou-se cimento CP-II Z 32 RS da marca Poty, cal hidratada CH I da marca Damasceno, areia natural quartzosa, RCMG, aditivo incorporador de ar da marca Forte Massa e água da Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A. – Embasa. O consumo de materiais por metro cúbico e o traço podem ser analisados pela Tabela 3.

Tabela 3: Consumo de materiais em Kg/m<sup>3</sup> da argamassa mista

Teor	Cimento	Areia	Cal	Aditivo	Água	RCMG
0%	225,18	1483,95	139,61	1,80	304,91	-
5%	224,32	1478,25	139,08	1,79	303,74	11,22
10%	223,46	1472,60	138,54	1,79	302,58	22,35
15%	222,61	1466,98	138,02	1,78	301,42	33,39
Traço	1,00	6,59	0,62	0,8%	1,35	x

Fonte: A autora, 2013.

A cal foi hidratada com água para a formação da pasta com 24h de antecedência, em seguida, as argamassas foram misturadas mecanicamente, em betoneira, com capacidade para 120 litros, por aproximadamente 10 min., apresentando índice de consistência na mesma faixa das argamassas industrializadas, em  $260 \pm 10$  mm.

Uma parte da mistura foi utilizada para aplicação do revestimento do painel em camada única e a outra parte foi destinada à confecção dos corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) e cilíndricos (5 cm x 10 cm) onde realizou-se o adensamento em mesa vibratória. Após 72h houve a desmoldagem dos corpos de prova e a cura foi realizada a seco para ilustrar as piores condições (UNGERICHT & PIOVESAN, 2011), visto que, em muitos casos, não se realiza a cura adequada em revestimentos externos. Para a análise do revestimento aplicado utilizou-se o mesmo processo da argamassa simples.

### 3.2.2.3 Argamassa industrializada

O uso das argamassas industrializadas é cada vez maior, portanto a adição do RCMG pode minimizar os custos e melhorar a qualidade das argamassas. Como essas argamassas são vendidas prontas, necessitando acrescentar apenas água, o fabricante não disponibiliza o traço utilizado, porém é sabido quais componentes estão presentes na mistura, como: cimento, areia, cal e aditivos plastificantes e incorporadores de ar. Para simular a adição nos teores de 5%, 10% e 15%, foi calculada a porcentagem de RCMG a ser adicionada, baseada na relação água/materiais secos, onde os resultados se apresentaram bem próximos dos teores da argamassa simples, obtendo-se respectivamente 1,4%, 2,8% e 4,2%.

A quantidade de água adicionada à mistura das argamassas industrializadas foi determinada mediante as recomendações indicadas pelo fabricante, (no máximo 16,8% em relação à massa seca) e pelo índice de consistência fixado em  $260 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$  (*flow table*), pois, como nas



argamassas simples, a relação água/materiais secos (a/ms) se manteve constante para todos os teores de adição. Assim, o traço de referência da argamassa industrializada foi de 1,00:0,171 (argamassa industrializada : água), sobre o qual adicionou-se o RCMG nos teores de 1,4%, 2,8% e 4,2% em relação à massa seca. A mistura das argamassas foi realizada em betoneira, por 17 minutos ( $\pm 1$  min) e o consumo de materiais por metro cúbico, assim como o traço utilizado na mistura podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Consumo de materiais em Kg/m<sup>3</sup> da argamassa industrializada

Teor	Mat. Secos	Água	RCMG
0%	1812,82	309,99	-
5% *	1797,32	307,34	25,16
10% *	1782,08	304,74	49,90
15% *	1767,11	302,18	74,22
Traço	1,00	0,171	x

\* Os valores de 5%, 10% e 15% referem-se a 1,4%, 2,8% e 4,2%, respectivamente.

Fonte: A autora, 2013.

O mesmo processo utilizado nas argamassas simples e nas argamassas mistas para a moldagem dos corpos de prova e na aplicação e avaliação dos revestimentos em painéis, também foi realizado com as argamassas industrializadas. A desmoldagem dos corpos de prova ocorreu após 24h e a cura foi realizada a temperatura ambiente ( $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade  $65\% \pm 5\%$ ).

### 3.2.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

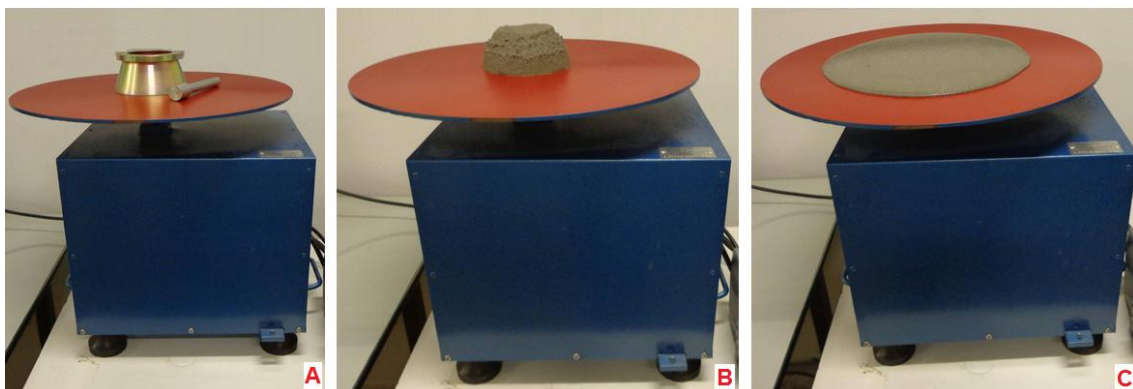
As argamassas no estado plástico foram caracterizadas imediatamente após a mistura, conforme as respectivas normas de ensaio. A avaliação reológica das argamassas foi realizada por meio da mesa de consistência (*flow table*), *squeeze-flow* e reômetro, que estão descritos detalhadamente a seguir:

### 3.2.3.1 Índice de consistência – *flow table*

A avaliação do índice de consistência foi realizada de acordo com a NBR 13276: 2005 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”, também conhecido como *flow table*.

O método avalia a consistência e a plasticidade das argamassas, medindo o espalhamento horizontal das argamassas no estado fresco. Quando as argamassas são recém-produzidas, essas são inseridas em um molde tronco-cônico, sendo adensadas em três camadas com soquete e, após a retirada do molde, são submetidas a sucessivos impactos, sendo em seguida, realizadas três medições do seu diâmetro. Quanto maior for a média dessas medidas, mais fluida é a argamassa e, conseqüentemente, maior a sua plasticidade e maior o índice de consistência. A Figura 15 ilustra respectivamente, o maquinário utilizado no ensaio e o espalhamento da argamassa após os impactos.

Figura 15: Etapas do ensaio de *flow table*, A) Mesa de espalhamento com a forma tronco-cônica e o soquete, B) Argamassa após a retirada do molde, C) Argamassa espalhada após o término dos impactos.



Fonte: A autora, 2013.

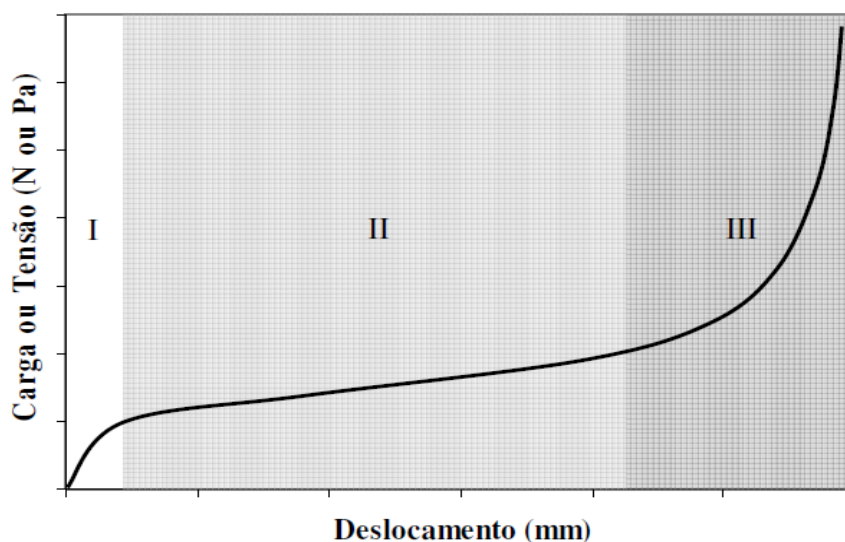
De acordo com KOEHLER & FOWLER (2003) este é um teste dinâmico, ou seja, muda constantemente, pois isso acontece quando a energia fornecida ao material é feita mediante vibrações, cisalhamento ou impactos. No *flow table*, utilizam-se os impactos como método de aplicação. O teste é simples e

rápido, porém não representa as condições reais de aplicação das argamassas.

### 3.2.3.2 Avaliação reológica por meio do *squeeze-flow*

Com o intuito de se avaliar a reologia das argamassas por meio do *squeeze-flow*, utilizou-se a NBR 15839: 2010 - Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Este é capaz de avaliar a reologia das argamassas, definindo com precisão a faixa de consistência das mesmas em velocidades e graus de deformação diferentes (CARDOSO *et al.*, 2005). Mediante os resultados apresentados no gráfico é possível avaliar sua plasticidade e consistência. O gráfico típico de carga em função do deslocamento de uma amostra de argamassa submetida ao ensaio de *squeeze-flow* possui três etapas bem definidas, de acordo com a Figura 16.

Figura 16: Gráfico típico de carga em função do deslocamento em um ensaio de *squeeze-flow* realizado com velocidade controlada.



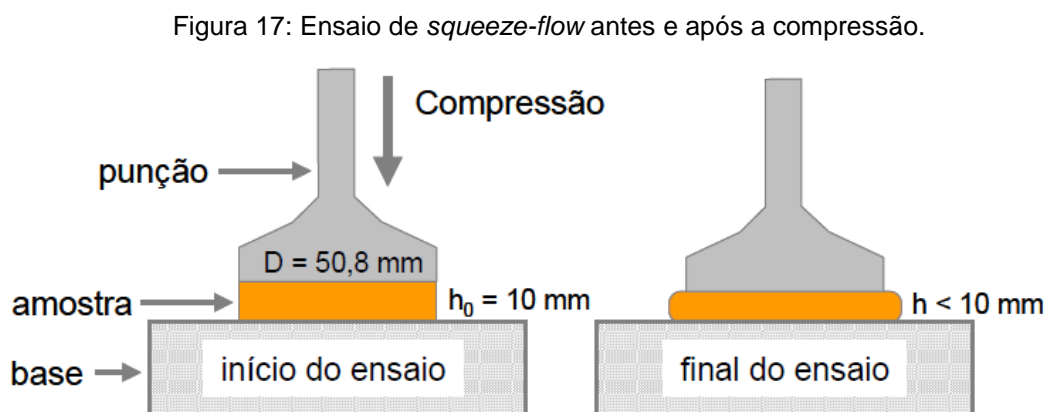
Fonte: Cardoso *et al.*, 2005.

A primeira delas ocorre uma deformação elástica linear, fazendo com que as argamassas se comportem como um sólido. Se esta etapa for extensa,

podem ocorrer fissuras nas argamassas ainda no estado fresco devido à recuperação elástica do processo. Na segunda etapa, as argamassas apresentam uma deformação plástica e/ou viscosa, podendo sofrer grandes deformações sem aumentar significativamente a força necessária para o deslocamento, ou seja, a argamassa possui melhor espalhamento e melhores condições de aplicação. E no terceiro estágio, a argamassa é submetida a grandes deformações, podendo ocorrer um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para o deslocamento da mesma, (CARDOSO *et al.*, 2005).

Os mesmos autores enfatizam que a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem variar de acordo com a composição dos materiais, como teor de água, dimensões mínima e máxima das partículas, presença de aditivos e a configuração de ensaio utilizada, (CARDOSO *et al.*, 2005).

O ensaio consiste em medir o esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas de mesmo diâmetro. O processo inicia-se com a introdução da argamassa no molde cilíndrico e após a retirada do mesmo, cuidadosamente, realiza-se a compressão, conforme demonstrado pela Figura 17.



Fonte: Cardoso, 2009

A Figura 18 ilustra a sequência do ensaio realizada pela prensa hidráulica universal EMIC, modelo DL 2000, com capacidade máxima de 20KN. A célula de carga utilizada foi de 5 KN, porém, durante o ensaio, o limite

máximo de força foi de 1 KN e as argamassas foram submetidas à compressão máxima de 9mm, com uma taxa de deslocamento de 0,1mm/s.

Figura 18: Sequência do ensaio de *squeeze-flow*, A) Base para a argamassa com a punção, B) Forma preenchida com argamassa, C) Argamassa após a retirada da forma, D) Base com argamassa e a punção na posição de início de ensaio, E) Argamassa após a compressão.



Fonte: A autora, 2013.

### 3.2.3.3 Avaliação reológica por meio do reômetro

Reômetros são equipamentos direcionados à avaliação das propriedades reológicas de fluidos e suspensões que permitem estudar o comportamento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica em função de outras variáveis, como o tempo, temperatura e outras (CASTRO *et al.*, 2009). A vantagem de se utilizar os reômetros é a obtenção dos resultados desses parâmetros reológicos, de forma precisa.

O reômetro rotacional é capaz de determinar o comportamento reológico das argamassas e apresenta forma geométrica adequada para avaliá-las durante as etapas de mistura e transporte, por simular condições de escoamento turbulento (CARDOSO *et al.*, 2005). O reômetro utilizado na pesquisa foi do tipo rotacional, Rheotest Medingen GmbH - RN 4.1, ilustrado pela Figura 19.

Figura 19: A) Componentes do reômetro ; B) Vista superior do reômetro com argamassa; C) Detalhe da garra utilizada para rotacionar a argamassa.

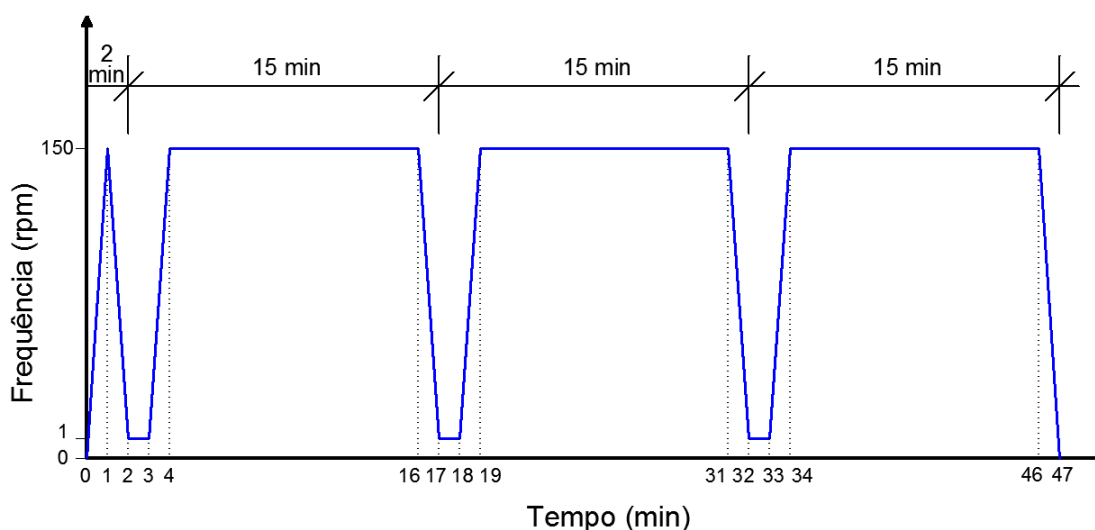


Fonte: A autora, 2013.

Para que todas as argamassas fossem avaliadas foi necessário acrescentar 8% a mais de água na argamassa industrializada, 12% na argamassa simples e 13% na argamassa mista, a fim de que não ultrapassassem o limite de torque máximo do reômetro (150 mN.m). Portanto, não se pode comparar os resultados obtidos pelas argamassas no reômetro com as outras argamassas, pois o traço é diferente.

As misturas foram realizadas de forma sistemática em argamassadeira, durante cinco minutos e foram levadas para o reômetro, iniciando-se a rotação após 10 minutos do início da mistura na argamassadeira, ficando no reômetro, por 47 min. A rotina definida para a avaliação das argamassas foi dividida em quatro partes, conforme a Figura 20, sendo a primeira com duração de 2 minutos com rápida aceleração e desaceleração a fim de se obter os valores iniciais de tensão de escoamento e viscosidade. Os outros períodos, a cada 15 minutos, foram realizados para se observar a evolução desses dois parâmetros ao longo do tempo, pois se não houvesse essas interrupções, só haveria um valor para a tensão de escoamento. Dessa forma é possível simular um comportamento utilizado na prática, quando ocorrem interrupções nos trabalhos executados em obra.

Figura 20: Rotina da frequência em função do tempo utilizada no reômetro.



Fonte: A autora, 2013.

O modelo utilizado para determinar os parâmetros reológicos, como tensão de escoamento e viscosidade plástica, foi o modelo de Bingham, também conhecido como plástico de Bingham (Figura 9), pois as argamassas são materiais que apresentam uma tensão mínima para iniciar o escoamento (tensão de escoamento) e durante o fluxo, possuem uma relação aproximadamente linear entre a tensão e taxa de cisalhamento (OLIVEIRA et

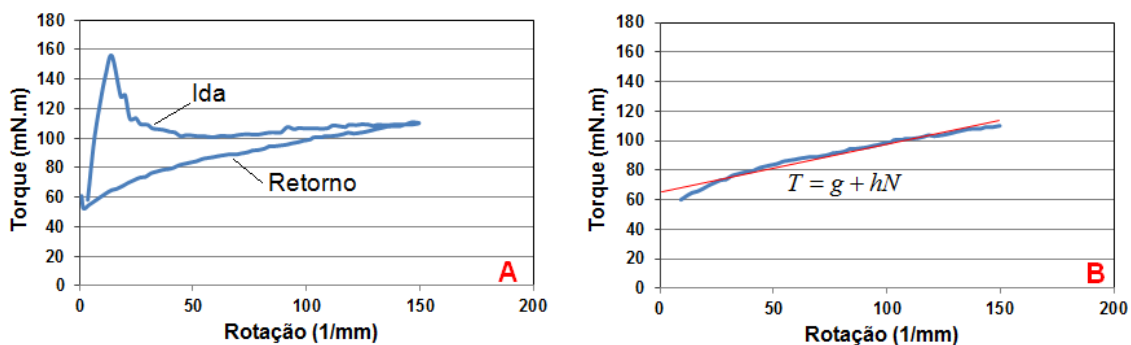
al., 2000; RIBEIRO *et al.*, 2013; BANFILL, 2003, SCHRAMM, 2006; FORMAGINI, 2005).

Os reômetros não fornecem os valores exatos de tensão de escoamento e nem de viscosidade, mas é possível encontrar esses valores por meio de parâmetros proporcionais que se relacionam com esses, pois os reômetros medem o torque (T) em função da velocidade (N), assim, a equação referente ao modelo de Bingham (Eq. 3) pode ser interpretada conforme a equação 6:

$$T = g + hN \quad (6)$$

Onde  $g$  e  $h$  são proporcionais à tensão de escoamento e à viscosidade plástica, respectivamente. A Figura 21 exemplifica como se determinam qualitativamente a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, por meio do reômetro (RIBEIRO, 2010, CARDOSO *et al.*, 2014), pois é durante os períodos de desaceleração, quando a velocidade é reduzida de 150 rpm até o repouso, a partir da curva de descida, que é possível se obter uma reta de tendência e calcular parâmetros proporcionais à tensão de escoamento ( $g$ ) e à viscosidade plástica ( $h$ ), (RIBEIRO, 2010).

Figura 21: Modelo de Bingham na determinação de parâmetros proporcionais à tensão de escoamento ( $g$ ) e da viscosidade plástica ( $h$ ); A) Gráfico de torque em função da velocidade indicando a aceleração e a desaceleração do reômetro B) Gráfico de torque em função da velocidade mostrando a reta de tendência durante o período de desaceleração (retorno) do reômetro.



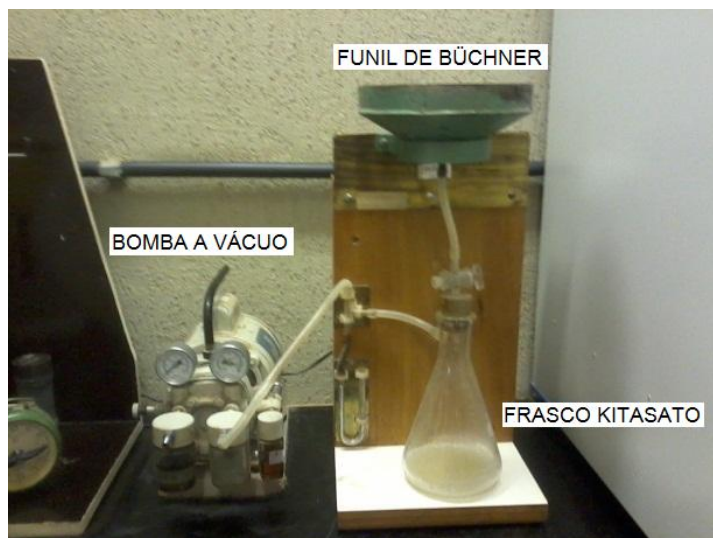
Fonte: A autora, 2013.



### 3.2.3.4 Retenção de água

A retenção de água das argamassas foi determinada por meio da NBR 13277: 2005 - “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água” e está relacionada à sua capacidade em manter a trabalhabilidade, quando sujeita a perda de água de amassamento, tanto por evaporação quanto por absorção pelo substrato (CARASEK, 2007). No caso das argamassas com cal, esta tem a capacidade de impedir que a água de amassamento seja absorvida em excesso pela base (SILVA, 2006). O ensaio consiste em filtração sob sucção a vácuo, composto pelo funil de Büchner, frasco Kitasato e uma bomba a vácuo, conforme ilustrado pela Figura 22.

Figura 22: Aparato para ensaio de retenção de água composto por funil de *Büchner*, frasco *Kitasato* e bomba à vácuo.

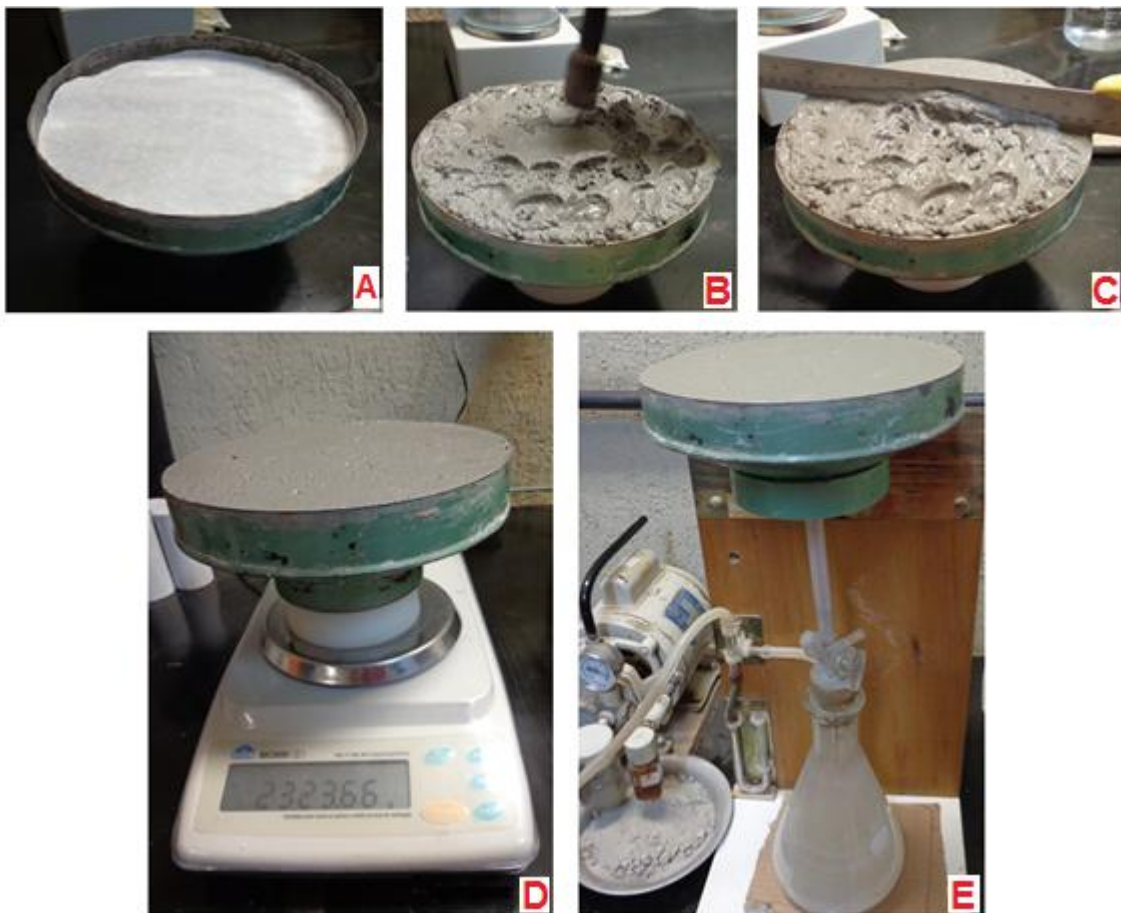


Fonte: A autora, 2013.

Inicia-se o ensaio com a aferição da massa do funil vazio ( $m_v$ ), composto pelo funil e o papel filtro levemente umedecido colocado no fundo do mesmo. Em seguida, o funil é preenchido com argamassa e o adensamento é feito por meio de 16 golpes aplicados com o soquete ao redor da borda e 21 golpes distribuídos na parte central da amostra. A superfície é rasada com uma espátula e o conjunto é novamente pesado, sendo ( $m_a$ ) a massa do funil com

argamassa. Com o auxílio da bomba a vácuo é realizada a sucção de água contida na argamassa, durante 15 minutos. Após este período o conjunto é novamente pesado, registrando-se a massa do funil com argamassa após a sucção ( $m_s$ ). A Figura 23 ilustra todo o processo de ensaio.

Figura 23: Etapas de ensaio de retenção de água, A) Funil de Büchner com papel filtro levemente umedecido após a pesagem inicial, B) Funil com argamassa sendo adensado, C) Funil com argamassa sendo rasado com espátula, D) Funil sendo pesado com argamassa antes da sucção de água, E) Funil com argamassa conectado ao frasco Kitasato por meio de uma mangueira e interligado a bomba à vácuo (lado esquerdo).



Fonte: A autora, 2013.

Para o cálculo da retenção de água ( $R_a$ ) utiliza-se a equação 7, complementada pela equação 8:

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF \cdot (m_a - m_v)} \right] \cdot 100 \quad (7)$$

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (8)$$

Onde  $m_a$  é a massa do conjunto com argamassa,  $m_s$  é a massa do conjunto após a sucção, e  $m_v$  é a massa do conjunto vazio, sendo todas as massas expressas em gramas.  $AF$  é o fator água/argamassa,  $m_w$  é a massa total de água e  $m$  é a soma das massas dos componentes anidros, ambas expressas em gramas.

### 3.2.3.5 Densidade de massa

A densidade de massa foi determinada com base na NBR 13278: 2005 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado”.

Este ensaio constitui-se da utilização de um recipiente cilíndrico, rígido, de material não absorvente, calibrado com capacidade aproximada de 400 cm<sup>3</sup>, sendo a altura aproximada de 85 mm e o diâmetro de 80 mm. A argamassa é introduzida no recipiente em três camadas sucessivas, adensadas com 20 golpes de espátula na posição vertical, ao final, rasa-se o recipiente e é aferido a sua massa. A Figura 24 ilustra as etapas do ensaio.

Figura 24: Etapas do ensaio de densidade no estado fresco, A) Recipiente vazio, B) Recipiente com argamassa durante o adensamento, C) Recipiente com argamassa após o adensamento.



Fonte: A autora, 2013.

A densidade de massa ( $d$ ), em Kg/m<sup>3</sup>, é obtida pela equação 9:

$$d = \left( \frac{m_c - m_v}{v} \right) \cdot 1000 \quad (9)$$

Onde  $m_c$  é a massa do recipiente contendo argamassa,  $m_v$  é a massa do recipiente vazio, ambas expressas em gramas e  $V_r$  é o volume do recipiente representado em cm<sup>3</sup>.

O teor de ar incorporado na argamassa ( $A$ ) é expresso em porcentagem, mediante a equação 10:

$$A = 100 \cdot \left( 1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (10)$$

Onde  $d$  é a densidade de massa da argamassa e  $d_t$  é a densidade de massa teórica da argamassa, ambas em g/cm<sup>3</sup>.

### **3.2.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido**

Para avaliação no estado endurecido foram moldados corpos de prova prismáticos e cilíndricos, utilizando-se os seguintes métodos de ensaios:

#### **3.2.4.1 Resistência mecânica**

Para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial, utilizou-se a NBR 13279: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Este ensaio foi realizado em argamassas simples, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, porém, nas argamassas industrializada e mista foi realizado apenas aos 28 dias. O equipamento utilizado para o ensaio de

tração na flexão foi uma prensa para CBR (tradução do ensaio de Índice de Suporte Califórnia-ISC), com anel dinamométrico e com capacidade para até 5000 Kgf e para o ensaio de compressão axial foi uma prensa eletromecânica (VEB – Werkstoffprüfmaschinen Leipzig), com capacidade máxima de 30.000Kgf. Para cada idade e traço foram utilizados três corpos de prova prismáticos medindo (4 cm x 4 cm x 16 cm). Primeiramente os corpos de prova foram rompidos ao meio determinando-se a resistência à tração na flexão ( $R_F$ ), por meio da equação 11:

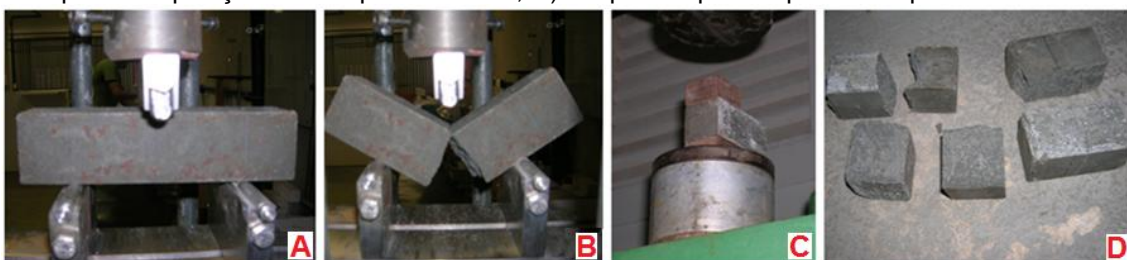
$$R_F = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (11)$$

Onde  $F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newton (N) e L é a distância entre os suportes, em milímetro (mm). Em cada metade restante, determinou-se a resistência à compressão axial ( $R_C$ ) calculada pela carga máxima aplicada ( $F_C$ ), em Newton, dividida pela área da seção ( $\text{mm}^2$ ), segundo a equação 12.

$$R_C = \frac{F_C}{1600} \quad (12)$$

A Figura 25 mostra a sequência do rompimento do corpo de prova centro, para aferição da resistência à tração na flexão (25A e 25B) e depois à compressão axial de cada metade (25C e 25D).

Figura 25: Sequência de rompimento do corpo de prova prismático, A) Corpo de prova na posição de rompimento, B) Corpo de prova sendo rompido no centro, C) Metade do corpo de prova na posição de compressão axial, D) Corpos de prova após a compressão axial.



Fonte: A autora, 2013.

A determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos foi realizada conforme a NBR 7222: 2011- Concreto e argamassa. Utilizou-se quatro corpos de prova cilíndricos para cada traço, medindo 5 cm de diâmetro por 10 cm de comprimento, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, para as argamassas simples e aos 28 dias para as argamassas industrializada e mista. A Figura 26 ilustra o ensaio que consiste em colocar um corpo de prova cilíndrico na posição horizontal, entre dois pratos da prensa. Em seguida, a carga é aplicada com crescimento contínuo da tensão de tração a uma velocidade constante até a ruptura do corpo de prova.

Figura 26: Ensaio de resistência a compressão diametral, A) Corpo de prova cilíndrico antes do ensaio, B) Corpo de prova rompido após o ensaio.



Fonte: A autora, 2013.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela equação 13:

$$F_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad (13)$$

Onde,  $F_{t,D}$  é a resistência à tração por compressão diametral em MPa,  $F$  é a carga máxima obtida no ensaio em  $kN$ ,  $d$  é o diâmetro do corpo de prova em mm e  $L$  é a altura do corpo de prova em mm.

### 3.2.4.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica e Módulo de elasticidade

A velocidade de propagação de onda ultrassônica foi determinada por meio da NBR 8802: 2013 - Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, que permite avaliar as características físicas de um material, por meio de um método não destrutivo, podendo ser rochas, madeiras, argamassas, concretos, entre outros (GIMENEZ, 2012).

Neste ensaio utiliza-se um aparelho que emite ondas ultrassônicas mediante um terminal emissor, até atingir o terminal receptor, como um circuito gerador-receptor, como mostra a figura 27.

Figura 27: Ensaio realizado pelo aparelho de medição de pulso ultrassônico com corpo de prova cilíndrico.



Fonte: A autora, 2013.

A amostra a ser aferida deve ficar localizada entre os dois terminais (transdutores), pois o aparelho emite um pulso ultrassônico que atravessa a amostra e chega ao receptor, medindo o tempo decorrido em todo processo, em segundos. Mediante este tempo, é possível calcular a velocidade de propagação ultrassônica. A transmissão pode ser direta, quando os transdutores estão localizados em faces opostas ao material; indireta, quando os transdutores estão na mesma face da amostra e semidireta, quando os

transdutores estão em faces adjacentes. A figura 27 mostra o ensaio realizado com as argamassas de forma direta.

A determinação da velocidade de ondas ultrassônicas foi realizada aos 28 dias, com três corpos de prova cilíndricos, para cada tipo de argamassa, conforme descreve a NBR 8802: 2013. Utilizou-se para aferição do pulso ultrassônico, o aparelho Ultrasonic Pulse Velocity Tester UPV - E48 – Controls, do Núcleo de Tecnologia da Preservação e Restauração (NTPR) da UFBA.

O aparelho fornece o tempo de propagação da onda ultrassônica ( $t$ ) em segundos e para se calcular a velocidade de propagação ( $V$ ) em m/s é necessário saber a distância entre os terminais ( $L$ ) em metro, que neste caso foi o comprimento do corpo de prova (10cm), e aplicar a equação 14.

$$V = \frac{L}{t} \quad (14)$$

A velocidade de propagação de uma onda ultrassônica em um meio sólido depende de vários fatores, como tipo e densidade do agregado, tipo de cimento e grau de hidratação, direção de ensaio da peça, tipo de adensamento e idade do material. Por sua vez, a velocidade de propagação será maior quanto mais denso for o material e, conseqüentemente, menor o tempo de propagação. Este efeito foi verificado por Hernández *et al.* (2006), mediante um estudo com argamassas, concluindo que aumento da porosidade causou a diminuição da velocidade ultrassônica e que o aumento do volume de areia resultou no efeito oposto.

A partir do ensaio ultrassônico é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico, para tal, utilizou-se a NBR 15630: 2009 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

O módulo de elasticidade pode ser considerado como a rigidez ou a resistência de um material à deformação elástica. Quanto maior o módulo, mais rígido é o material e menor é a deformação elástica (CALLISTER, 2008). O ensaio de propagação de onda ultrassônica também permite avaliar o módulo



de elasticidade dinâmico de um material. Silva e Campiteli (2008) observaram a existência de uma relação direta entre o módulo de elasticidade e a resistência mecânica de argamassas. Quanto maior o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), maior a resistência das argamassas, como ilustra a equação 15.

$$E_d = \gamma \cdot V^2 \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (15)$$

Onde  $\gamma$  é a densidade de massa no estado endurecido, em  $\text{Kg/m}^3$ ,  $V$  é a velocidade com que a onda percorre o corpo de prova no sentido longitudinal em  $\text{Km/s}$ ,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, adotado como 0,2 (NBR 15630:2009).

#### 3.2.4.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

A absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados pela NBR 9778: 2009 - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, representado pela Figura 28.

Figura 28: Determinação de massa de um corpo de prova submerso em água.



Fonte: A autora, 2013.

Neste ensaio é possível determinar a porosidade e a densidade aparente das argamassas, baseada no princípio de Arquimedes que verificou que todo corpo imerso em um fluido sofre a ação de uma força de empuxo que é numericamente igual ao peso do fluido deslocado (HALLIDAY *et al.*, 2003).

O ensaio inicia-se com a determinação da massa seca ( $m_s$ ) dos corpos de prova, em seguida, esses são imersos em água e ficam em repouso por 48h até a saturação, sendo então determinadas a massa imersa ( $m_i$ ), com auxílio da balança hidrostática (Figura 28) e a massa saturada ( $m_{sat}$ ).

A porosidade aparente ( $Pa$ ) e a densidade aparente ( $Da$ ) são calculadas pelas equações 16 e 17, sendo  $\rho_L$  a densidade do líquido utilizado na realização do ensaio, no caso, a água, onde  $\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ .

$$Pa = 100 \cdot \frac{m_u - m_{sat}}{m_u - m_i} (\%) \quad (16)$$

$$Da = \rho_L \cdot \frac{m_s}{m_u - m_i} \quad (17)$$

### 3.2.5 **Análise de durabilidade**

Para análise da durabilidade, foram avaliadas: absorção de água por capilaridade, reações de álcali-agregado e expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier, descritas a seguir.

#### 3.2.5.1 *Absorção de água por capilaridade*

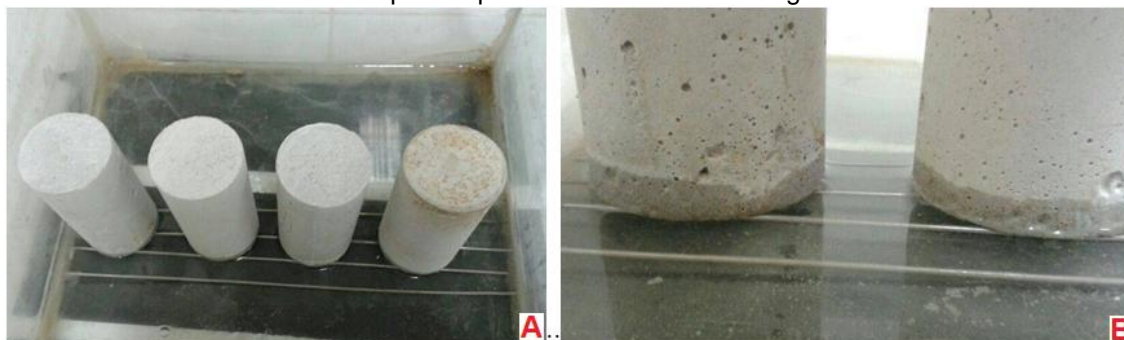
Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -  
Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade

A determinação de absorção de água por capilaridade, realizada por intermédio da NBR 9779:2012 Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade tem a função de analisar a velocidade de penetração da água por sucção capilar em função do tempo, mediante o ganho de massa adquirido pelos corpos de prova.

Este ensaio é importante para avaliar as condições do revestimento quanto à penetração de água da chuva, pois as fissuras são portas de entrada para agentes agressivos e percolações de água (CINCOTTO, 1995).

O ensaio foi realizado aos 28 dias utilizando três corpos de prova cilíndricos de 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro para cada teor de RCMG, em todos os tipos de argamassas (simples, industrializada e mista). Após o tempo de cura, os exemplares foram secos em estufa, resfriados e colocados sobre um suporte, dentro de um recipiente com lâmina d'água igual a 5 mm, sendo determinadas as suas massas, em intervalos de tempo pré-estabelecidos, até completar 72 horas. A Figura 29 ilustra o ensaio.

Figura 29: Ensaio de absorção por capilaridade, A) Quatro corpos de prova cilíndricos em contato com a água pela base inferior durante o ensaio, B) Vista aproximada da base inferior dos corpos de prova em contato com a água.



Fonte: A autora, 2013.

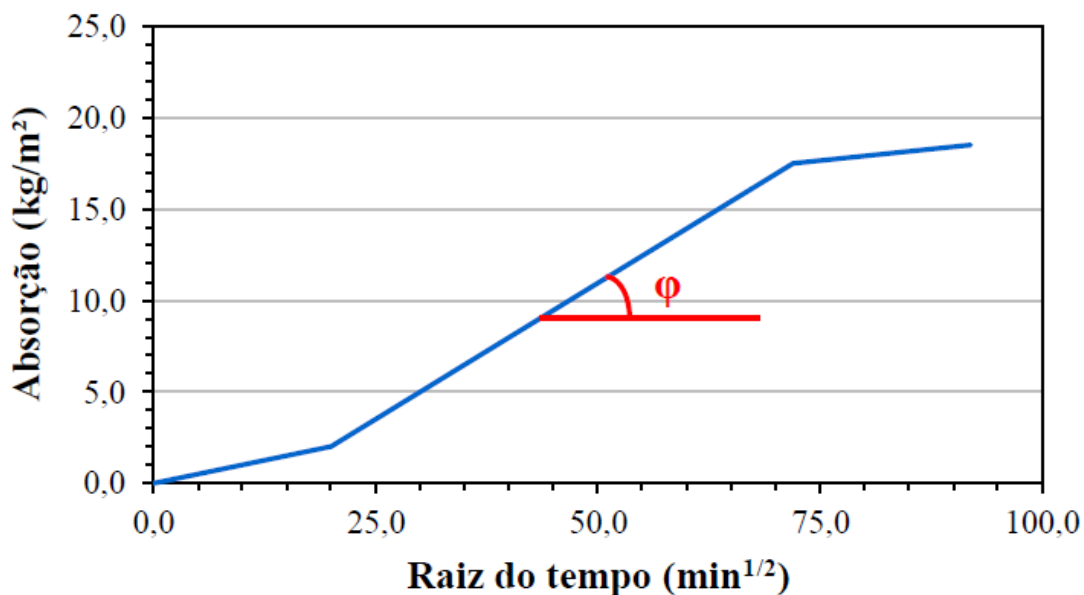
Para se determinar a absorção de água por capilaridade (C), em g/cm<sup>2</sup>, divide-se o aumento de massa do corpo de prova pela área da seção em contato com a água, conforme a equação 18:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (18)$$

Onde  $A$  é a massa do corpo de prova em contato com a água (g),  $B$  é a massa do corpo de prova seco (g) e  $S$  é a área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ ).

O coeficiente de absorção capilar representa a massa de água absorvida por metro quadrado da argamassa em contato com a água, em função da raiz quadrada do tempo decorrido até o final do ensaio. Numericamente, este valor correspondente ao coeficiente angular da reta proveniente do gráfico de absorção versus a raiz do tempo até que seja atingido o ponto de saturação, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30: Modelo da curva de absorção capilar de água em função da raiz quadrada do tempo, segundo a NBR 9779 para a determinação do coeficiente de absorção capilar ( $Tg \varphi$ ).



Fonte: Matta, 2012

### 3.2.5.2 Reatividade álcali-agregado (RAA)

A reatividade dos agregados é estabelecida pela norma NBR 15577: 2008 Agregados - Reatividade álcali-agregado (RAA).

Esta reatividade pode ocorrer em argamassas e concretos devido à reação química entre os álcalis do cimento e os agregados reativos ou potencialmente reativos (amorfos), em presença de umidade. Esses fatores podem comprometer as estruturas de concreto e revestimentos, causando

sérios danos, muitas vezes irreversíveis. O termo RAA também é utilizado para as reações álcali-sílica e álcali-silicato. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e minerais da classe dos filossilicatos, como quartzitos e granulitos. Em geral as reações com os silicatos são mais lentas do que com a sílica reativa, composta por cristobalita, opala, vidro vulcânico, entre outros. Como o RCMG é constituído por vários tipos de rochas e apresenta elevada finura, podem ocorrer RAA, dependendo dos componentes existentes no resíduo.

O ensaio de RAA utilizado na pesquisa foi adaptado para avaliar a reatividade potencial do RCMG, por meio do método acelerado, com duração de 30 dias para cada argamassa, como mostra a Figura 31.

Figura 31: Sequência do ensaio de RAA, A) Formas prismáticas preenchidas com argamassa, B) Corpos de prova desmoldados após 24 horas de cura, C) Vista externa do banho de água destilada, D) Vista interna do banho em solução de hidróxido de sódio.



Fonte: A autora, 2013.

O traço da argamassa de referência foi o mesmo prescrito pela presente norma, descrevendo que são necessários 440g de cimento Portland padrão e 990g de agregado. Para os outros traços contendo o RCMG, houve a substituição do cimento nas proporções de 5%, 10% e 15% pelo RCMG, mantendo-se a quantidade final de 440g de cimento e RCMG misturados, com a mesma quantidade de 990g de agregados.

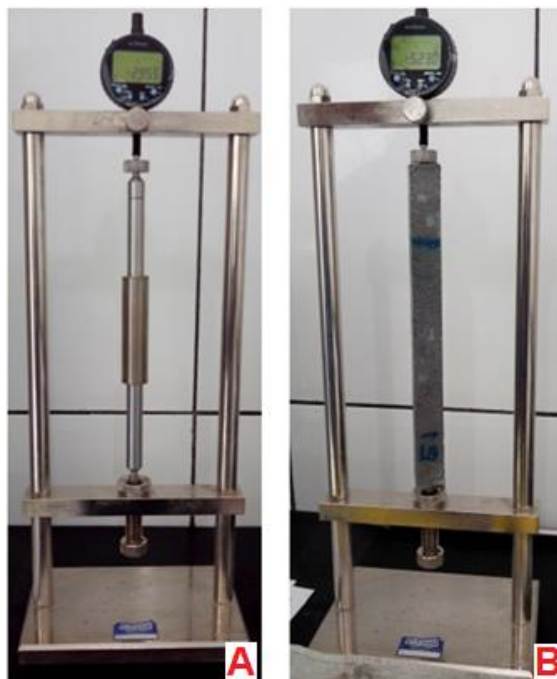
De acordo com a NBR 15577-1: 2008 devem ser confeccionados corpos de prova com os agregados de estudo e cimento padrão, com elevado teor de álcalis, e monitorá-los ao longo de 30 dias. Caso a expansibilidade seja menor que 19% ao final deste período, o agregado é considerado potencialmente

inócuo, porém, se a expansão ocorrida for maior ou igual a 19% aos 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo.

A primeira etapa consiste em moldar os corpos de prova prismáticos com argamassa. Após 24 horas de cura, estes são desmoldados e imersos em água destilada a 80°C por mais 24 horas. Por fim, os corpos de prova são levados para o banho em solução de hidróxido de sódio por 30 dias. Durante todo este período são realizadas as medições e observadas as características externas dos corpos de prova, onde é possível identificar se há formação de gel expansivo ou de compostos cristalinos.

A Figura 32 mostra o medidor sendo calibrado e a aferição da medida de um corpo de prova durante o ensaio, pois a expansão é calculada mediante o aumento percentual do seu comprimento ao longo do ensaio. A depender do resultado pode-se classificar o grau de reatividade do agregado, sendo considerado potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

Figura 32: Medidor dos corpos de prova. A) Medidor sendo calibrado, B) Corpo de prova prismático sendo aferida sua medida.



Fonte: A autora, 2013.

### 3.2.5.3 *Expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier*

A determinação da expansibilidade é realizada por meio da NBR 11582: 2012 Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier e serve para avaliar se tem algum composto reativo nas argamassas. O ensaio consiste em preencher com pasta de cimento corpos de prova cilíndricos de 30 mm de diâmetro por 30 mm de altura. As formas cilíndricas, em chapa de latão, são vazadas em ambas as bases e possuem uma fenda na lateral (altura). De cada lado da fenda são soldadas duas hastes de 150 mm de comprimento, que ficam juntas, lado a lado. Dependendo das reações de expansão ocorridas durante a cura, a forma pode ir se abrindo conforme se aumenta o volume do cilindro. A distância entre as extremidades das hastes determina a expansibilidade dos corpos de prova. A Figura 33 mostra a agulha de Le Chatelier.

Figura 33: Agulha de Le Chatelier.

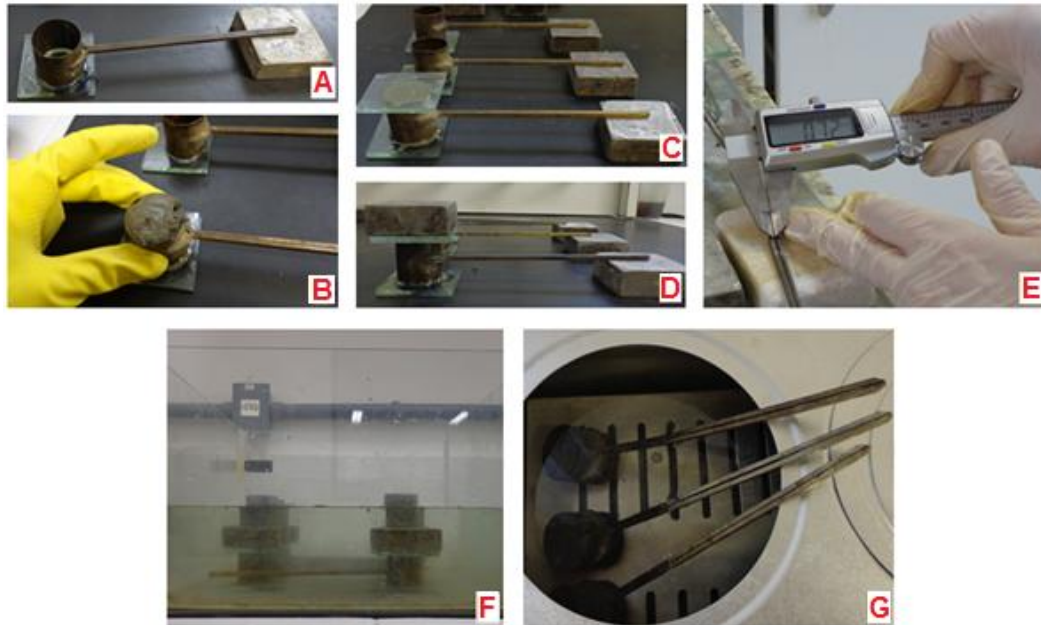


Fonte: A autora, 2013.

Este ensaio foi adaptado para medir a expansibilidade do RCMG e para tanto, acrescentou-se 5%, 10% e 15% de RCMG à pasta de cimento, onde foram utilizadas seis agulhas para cada traço, que após serem preenchidas com argamassa, foram curadas submersas em água por 24 horas.

Após a cura, foram realizadas as medidas de expansão inicial, e em seguida, três agulhas foram submetidas à imersão em água fria durante sete dias e as agulhas restantes foram levadas para imersão em água quente ( $\pm 100^{\circ}\text{C}$ ), por cinco horas. Ao final de cada processo, avaliou-se a abertura entre as hastes, identificando a expansão ocorrida em cada agulha. A figura 34 ilustra todo o processo de ensaio.

Figura 34: Sequência do ensaio de expansibilidade por meio das agulhas de Le Chatelier, A) Agulha untada com óleo, B) Preenchimento das agulhas com pasta de cimento, C) Fechamento do corpo de prova com vidro, D) Corpo de prova preparado para cura imersa com um peso na superfície superior, E) Medição de expansibilidade antes da cura, F) Corpos de prova submersos em água fria, G) Corpos de prova preparados para o ensaio a quente.



Fonte: A autora, 2013.

### 3.2.6 Caracterização das argamassas no estado aplicado

A aplicação do revestimento nos painéis foi realizada com todos os tipos de argamassas, simples (AS), mistas (AM) e industrializadas (AI), lembrando que as AS não são específicas para revestimento.

Todos os ensaios foram realizados aos 28 dias e a cura foi a seco para ilustrar as piores condições, visto que, em muitos casos, não se realiza a cura adequada em revestimentos externos (UNGERICHT & PIOVESAN, 2011).

#### 3.2.6.1 Dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

Para determinação da dureza superficial das argamassas aplicadas ao painel, foi necessário adaptar a NBR 7584:2012 Concreto endurecido -



Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio, para ser utilizada em argamassas.

O ensaio possui um método não destrutivo capaz de medir a dureza superficial das argamassas e avaliar a resistência e a integridade das mesmas no estado endurecido. Utiliza-se o esclerômetro de reflexão para produzir um impacto na superfície e mediante a energia recuperada pelo mesmo, após o impacto, se obtém um valor, em porcentagem, chamado de índice esclerométrico (IE). Quanto mais densa for a superfície, maior será sua dureza e maior será o valor do índice esclerométrico. A Figura 35 ilustra o painel com as marcações da área de ensaio realizado aos 28 dias e o esclerômetro de reflexão por meio de pêndulo com baixa energia de percussão, Schmidt Hammer Concrete testing, PROCEQ-Switzerland.

Para se determinar o índice esclerométrico médio efetivo ( $IE_{\alpha}$ ) de cada área de ensaio utilizou-se a equação 19.

$$IE_{\alpha} = k.IE \quad (19)$$

Sendo ( $IE_{\alpha}$ ) índice esclerométrico médio efetivo, ( $k$ ) o coeficiente de correção do índice esclerométrico obtido na aferição do aparelho (igual a 1, neste caso) e (IE) o índice esclerométrico médio.

Figura 35: Processo de ensaio por meio do esclerômetro de reflexão, A) Painel com as demarcações da área de ensaio, B) Esclerômetro sendo utilizado no painel durante o ensaio.



Fonte: A autora, 2013.

### 3.2.6.2 Resistência de aderência à tração

Para se avaliar a resistência de aderência à tração em revestimentos, utilizou-se a NBR 13528: 2010 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.

O ensaio avalia a resistência de aderência dos revestimentos, quando submetidos a um esforço normal de tração. O termo aderência se refere à interação de dois materiais e para a execução deste ensaio foram cortados, de forma aleatória, para que contemplasse as juntas e os blocos, quinze corpos de prova com a serra copo, apresentando 50 mm de diâmetro cada. Três corpos de prova foram arrancados para a avaliação de umidade e doze foram destinados à análise de resistência de aderência à tração. Na superfície dos doze corpos de prova foi colada uma placa de metal (pastilha) para acoplar o equipamento de tração e realizar o ensaio, conforme ilustrado pela Figura 36.

Figura 36: Sequência de ensaio de arrancamento de corpos de prova do painel, A) Pastilhas de metal coladas no painel, B) Posição de ajuste do dinamômetro às pastilhas de metal para início do ensaio, C) Fim do ensaio com a amostra do painel após o arrancamento, D) Painel após o arrancamento de todos os corpos de prova.



Fonte: A autora, 2013.

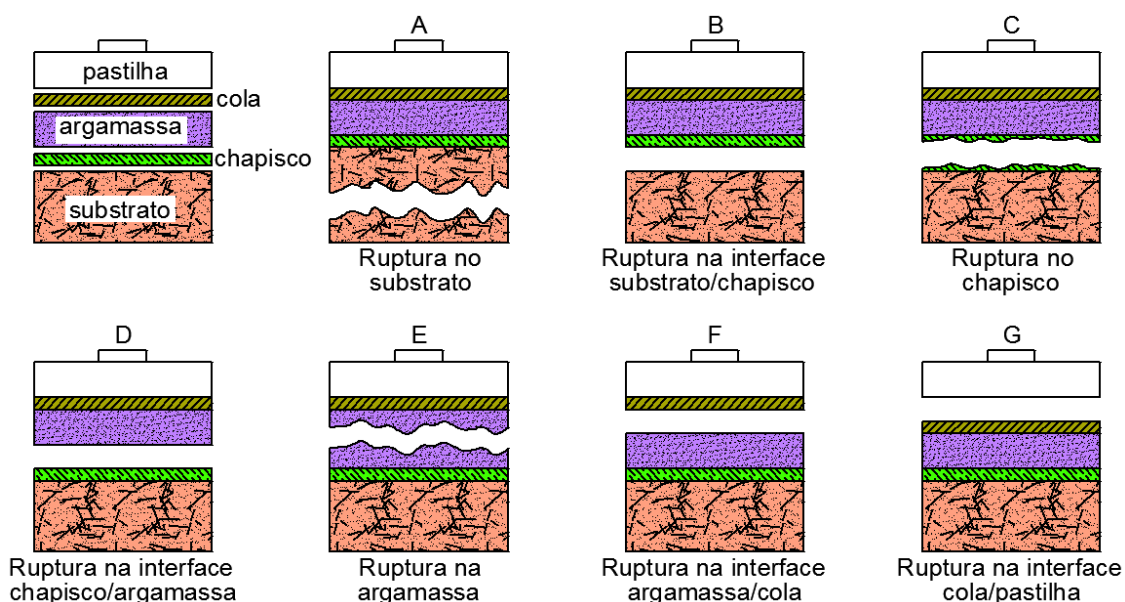
Após o arrancamento dos corpos de prova, foram observados os valores de resistência de aderência e suas respectivas formas de ruptura, sendo essas indicadas conforme a porcentagem de ocorrência. A sequência do ensaio está representada na Figura 36, mediante o dinamômetro ALAME ACIER com capacidade de 5 KN e resolução de 0,05 KN.

Para o cálculo da resistência de aderência à tração ( $R_a$ ), expressa em MPa, utiliza-se a relação entre a força de ruptura ( $F$ ), em Newton, e a área de aplicação da carga ( $A$ ) em  $\text{mm}^2$ , de acordo com a equação 20:

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (20)$$

Os diferentes tipos de ruptura ocorridos para um sistema de revestimento com chapisco estão relacionados a seguir e exemplificados pela Figura 37.

Figura 37: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco



Fonte: NBR 13528: 2010 com adaptações da autora, 2013.

a) Ruptura no substrato: Indica que houve boa aderência da argamassa e o substrato, porém este possui menor resistência à tração;

b) Ruptura na interface substrato/chapisco: Indica pouca aderência do chapisco ao substrato, podendo ser por haver resíduos no substrato, ou por este ser liso, ou pela cura do chapisco ter sido insuficiente, RUDUIT (2009);

c) Ruptura no chapisco: Indica que houve cura deficiente no chapisco ou o traço é pobre em cimento, (RUDUIT 2009);

d) Ruptura na interface chapisco/argamassa: Indica falta de contato entre a argamassa e o chapisco ou chapisco muito impermeável, (RUDUIT, 2009);

e) Ruptura na argamassa: Indica que a argamassa não está adequada para o revestimento;

f) Ruptura na interface argamassa/cola: Indica que a argamassa tem uma resistência superficial muito baixa, podendo comprometer o sistema de revestimento dependendo da camada decorativa;

g) Ruptura na interface cola/pastilha: Indica imperfeição na colagem da pastilha e o resultado deve ser desprezado, NBR 13528:2010.

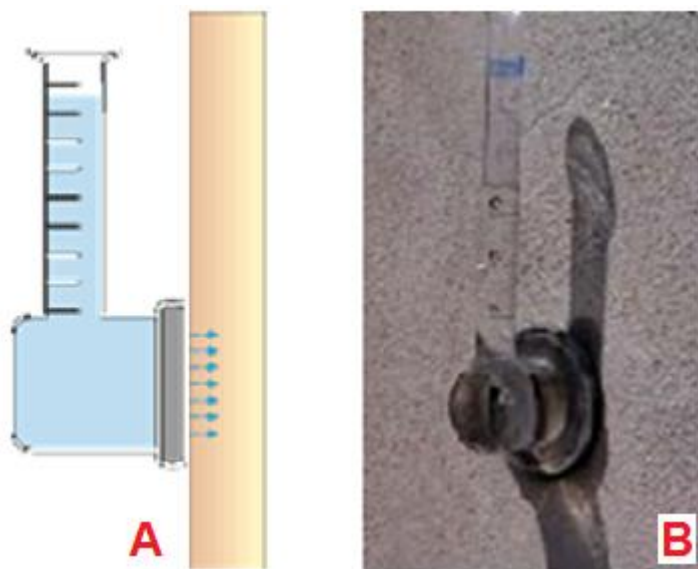
### 3.2.6.3 Absorção de água sob baixa pressão.

Para a obtenção do índice de absorção de água sob baixa pressão, por um determinado tempo, foi utilizado o método RILEM (11.4) - *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions* (1982). Para a realização do ensaio utiliza-se a pipeta de Karsten, popularmente conhecida pelo método do cachimbo (Figura 38).

Este método consiste em analisar a quantidade de água absorvida pelos painéis, por um tempo máximo de 60 minutos, através de tubos graduados em forma de cachimbo, que ficam fixados nos painéis. Na medida em que a água

permeia pelo painel é possível analisar o grau de absorção e, assim, determinar a qualidade da argamassa.

Figura 38: Ensaio de absorção de água sob baixa pressão, A) Esquema de absorção do tubo de Karsten acoplado no painel, B) Tubo de Karsten no momento do ensaio.



Fonte: A) Notas de aula Ribeiro, 2013, B) A autora, 2013.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordadas as características dos materiais constituintes das argamassas e os resultados dos ensaios das mesmas. Primeiramente, serão relatados os resultados das argamassas simples e posteriormente, os resultados das argamassas mistas e industrializadas em um mesmo gráfico, porque ambas são argamassas de revestimento.

### 4.1 Caracterização das matérias primas

A caracterização física da areia foi realizada pelo CETA – UFBA e a caracterização física do cimento, do RCMG, da cal e da argamassa industrializada foi realizada pelo LAFSCer – UFSCar. Os resultados obtidos estão relacionados na tabela 5.

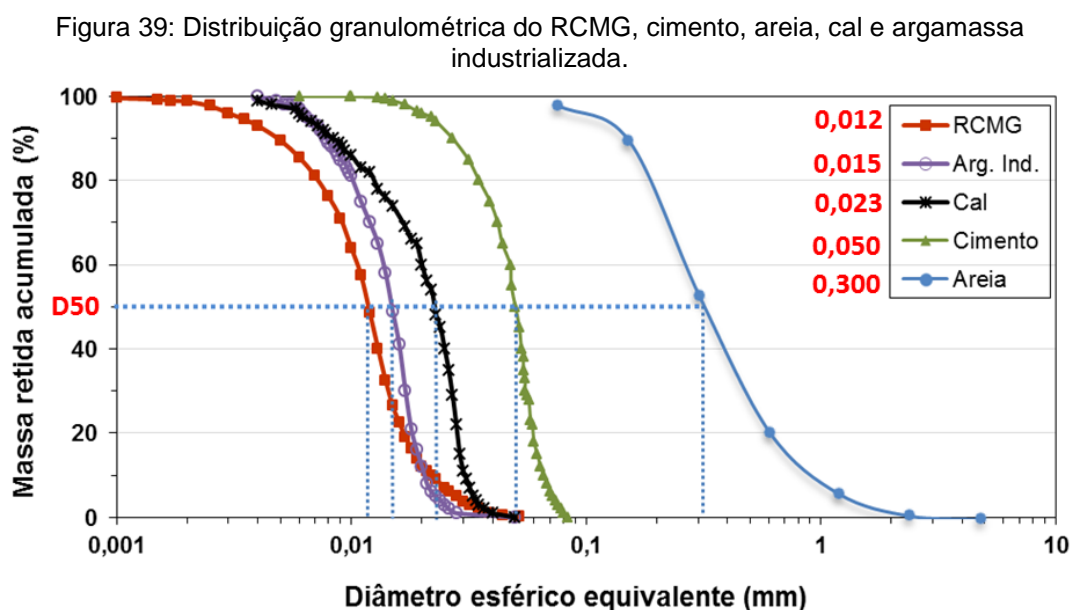
Tabela 5: Caracterização física da areia, cimento, cal, argamassa industrializada e RCMG.

<b>Características</b>	<b>Areia</b>	<b>Cimento</b>	<b>Cal</b>	<b>Arg. Ind</b>	<b>RCMG</b>	<b>Unid.</b>
Diâmetro médio de part. (D50)	0,300	0,050	0,023	0,015	0,012	mm
Massa específica	2,62	3,25	2,49	2,69	2,92	kg/dm <sup>3</sup>
Área superf. Específ. BET	-	1,09	4,66	0,29	3,54	m <sup>2</sup> /g
Massa unitária	1,59	-	-	-	-	kg/dm <sup>3</sup>
Módulo de finura	1,70	-	-	-	-	kg/dm <sup>3</sup>
Material pulverulento	1,30	-	-	-	-	%
Dimensão máx. característica	2,36	-	-	-	-	mm

Fonte: A autora, 2013.

A areia utilizada possui elevada finura e é considerada “muito fina” pela antiga NBR 7211/1983, contudo, pela norma atual, NBR 7211/2009, a areia está situada dentro do limite utilizável inferior, apresentando um diâmetro médio de suas partículas igual a 0,300 mm (300 µm), sendo o maior de todos os componentes utilizados nas argamassas. O menor deles foi o do RCMG,

apresentando 0,012mm (12  $\mu$ m), por conseguinte, possui maior área superficial específica BET, fazendo com que haja melhor empacotamento das partículas, promovendo o complemento da granulometria e o tamponamento dos poros devido a sua atuação como *filler*. Os outros componentes, como o cimento, a cal e a argamassa industrializada apresentaram granulometrias de tamanho médio intermediários, entre a areia e o RCMG. A distribuição granulométrica de todas as matérias primas pode ser observada pela figura 39.



A composição química do cimento (tabela 6) foi avaliada por fluorescência de raios X (FRX) e está de acordo com a NBR11578/1997 “Cimento Portland composto – Especificação”.

Tabela 6: Composição química do cimento CP II Z 32 RS

Composto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	PF*
Teor (%)	24,50	6,10	2,50	56,00	4,00	1,80	0,50	0,30	0,07	4,10
NBR 11578/97	-	-	-	-	≤ 6,5	≤ 4,0	-	-	-	≤ 6,5

PF\*: Perda ao fogo a 1000°C

Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que os resultados corroboram com os principais componentes do cimento Portland, como o óxido de cálcio (CaO), a sílica



(SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnésio (MgO) e uma pequena porcentagem de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>). Outros componentes estão presentes em menores quantidades, como impurezas, os álcalis do cimento (Na<sub>2</sub>O, óxido de sódio e K<sub>2</sub>O, óxido de potássio), além do óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e outras substâncias de menor importância (PERUZZI, 2002).

A norma estabelece as exigências químicas de determinados compostos a fim de proporcionar segurança e qualidade durante a produção e no uso posterior dos cimentos. Para tanto, esta prescreve que o teor de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) deverá ser inferior a 4,0%, pois este composto é instável, corrosivo e reage violentamente com a água. Os teores de óxido de magnésio (MgO) deverão ser inferiores a 6,5%, pois, se estiver presente em grandes quantidades no cimento, ao se hidratar com a água, transforma-se lentamente em hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>), expandindo-se e gerando tensões internas suficientes para provocar trincas e fissuras em argamassas e concretos (RODRIGUES & FONSECA, 2009; ABCP, 1984; LERCH, 1938; NEVILLE, 1997; BAUER, 2005; SCHOON *et al.*, 2013; MO *et al.*, 2014).

A perda ao fogo (PF) deve ser inferior a 6,5%, pois o ensaio revela a perda de massa do cimento após o aquecimento a 1000°C. A maior porcentagem de perda refere-se ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente no calcário, servindo para estimar o teor da adição deste durante a produção do cimento e a outra parte é referente à água evaporada do gesso (RIBEIRO, 2006; SILVA, 2011, GONÇALVES, 2005). Um valor alterado de perda ao fogo indica que o cimento possui avançada hidratação, como por exemplo, devido à estocagem inadequada (TOKUDOME, 2009; GONÇALVES, 2005).

A análise química do RCMG foi realizada por FRX e a porcentagem de incidência dos compostos químicos está ilustrada na Tabela 7.

Tabela 7: Composição química do RCMG obtida por FRX.

Composto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	PF*
Teor (%)	37,60	9,04	4,89	17,70	8,21	0,78	0,33	1,79	2,50	0,07	17,29

PF\*: Perda ao fogo a 1000°C.

Fonte: A autora, 2013.

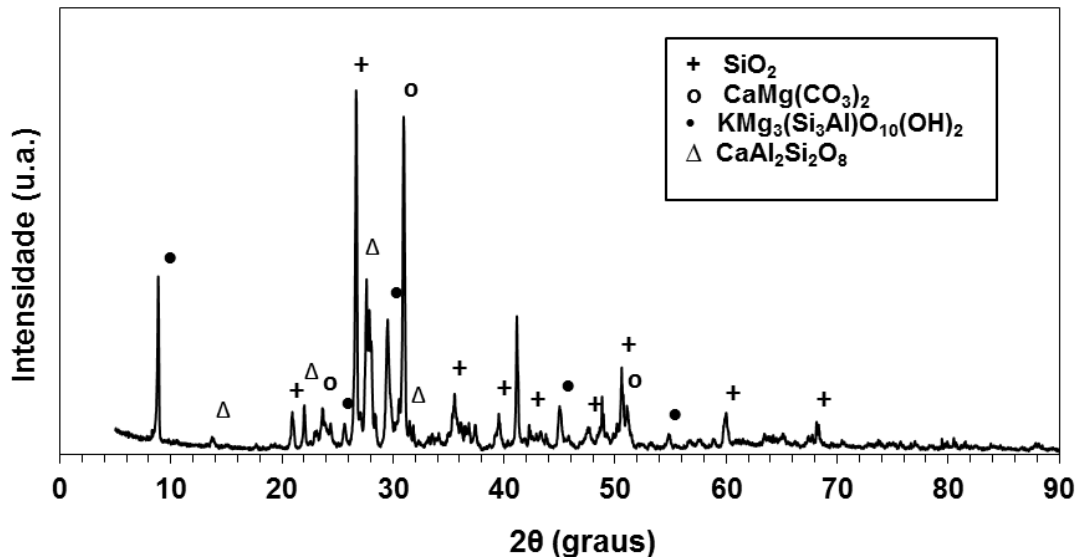
Observa-se que o composto predominante é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), seguido do óxido de cálcio ou cal livre ( $\text{CaO}$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Quando a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) encontra-se no estado amorfo, ou vítreo, esta é considerada reativa, porém, quando se apresenta no estado cristalino possui baixa reatividade (NEVILLE, 1997).

A quantidade de  $\text{SiO}_2$  presente no RCMG indica a possibilidade deste em ser reativo, porém, com a difração de raios X é possível obter informações sobre as fases cristalinas dos compostos existentes no resíduo. A pequena quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entre outras características, descarta a possibilidade do RCMG em ser um material pozolânico, pois não atende às exigências da NBR 12653:2012 (Materiais pozolânicos – Requisitos).

A quantidade de  $\text{MgO}$  encontrada no RCMG (8,21%) está de acordo com a classificação de Pettijohn (1987), onde descreve que a porcentagem de  $\text{MgO}$  em rochas calcárias dolomíticas deve estar entre 2,1 e 10,8%.

Mediante a difração de raios X (Figura 40) é possível identificar a composição mineralógica do RCMG.

Figura 40: Difratoograma de raios X do RCMG



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se a ocorrência de minerais componentes do granito e do mármore, tais como: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), aluminossilicatos de cálcio ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e flogopita, mineral da família das micas, classe dos filossilicatos, de fórmula

química  $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , presentes no granito e a dolomita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , presente no mármore. Como a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) encontra-se presente na difração de raios X, logo se apresenta em sua fase cristalina, indicando pequena possibilidade de o RCMG ser reativo.

## **4.2 Caracterização das argamassas simples (AS)**

Com o intuito de avaliar a efetiva influência da adição do RCMG nas propriedades de matrizes cimentícias, foi utilizada a argamassa simples (cimento e areia), à qual o resíduo foi adicionado em diversos teores.

### **4.2.1 Caracterização das argamassas simples (AS) no estado fresco**

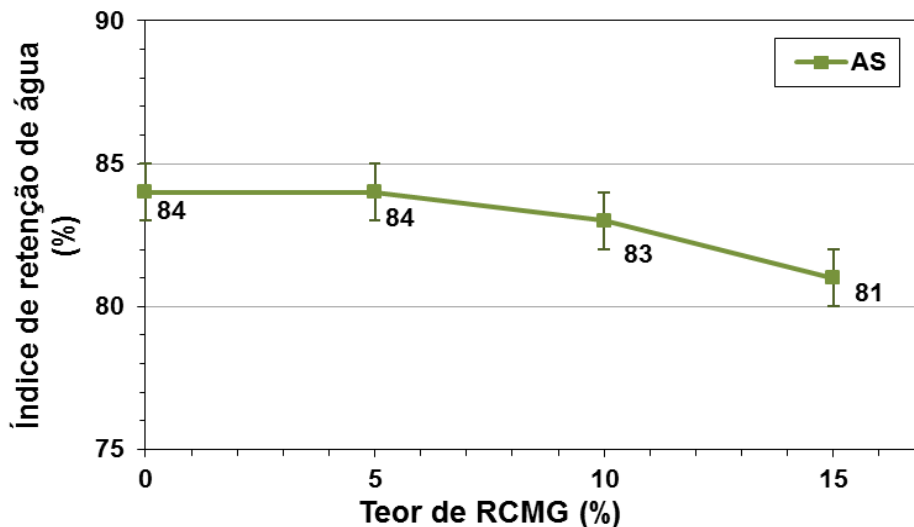
Todos os estudos referentes às argamassas simples (AS) estão descritos a seguir. A AS de referência é composta por cimento, areia e água. As outras AS tiveram 5%, 10% e 15% de adição de RCMG em relação à massa de cimento. A partir do índice de espalhamento entre  $290 \pm 10$  mm, a relação água/cimento foi fixada em 0,59, sendo constante para todas as argamassas.

As argamassas simples (AS), contendo apenas cimento, areia e RCMG foram fundamentais para avaliar o comportamento do resíduo devido à ausência de componentes que pudessem influenciar nos resultados, como aditivos ou outros aglomerantes. Em primeira instância, foram realizados testes experimentais com diferentes composições, desde a argamassa de referência (sem resíduo), até às argamassas contendo adição de 5%, 10% e 15% de RCMG, em relação à massa de cimento.

#### 4.2.1.1 Índice de retenção de água das argamassas simples (AS).

Com a adição do RCMG, aumenta-se a área superficial dos componentes da mistura, fazendo com que se obtenha maior índice de retenção de água, contudo, a Figura 41 mostra que não houve este aumento, mesmo com o acréscimo de RCMG. Ocorreram pequenas alterações, em torno de 3%, chegando a ter uma leve diminuição em relação à argamassa de referência (sem RCMG). Esses resultados mostram que o RCMG não influenciou neste parâmetro e/ou que podem ter ocorrido falhas durante o processo de ensaio, pois este é muito sensível. Resultados semelhantes foram observados por Bastos & Couto (2007), que acrescentaram partículas finas à mistura (< 75  $\mu\text{m}$ ) e obtiveram resultados inversos ao esperado.

Figura 41: Índice de retenção de água das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

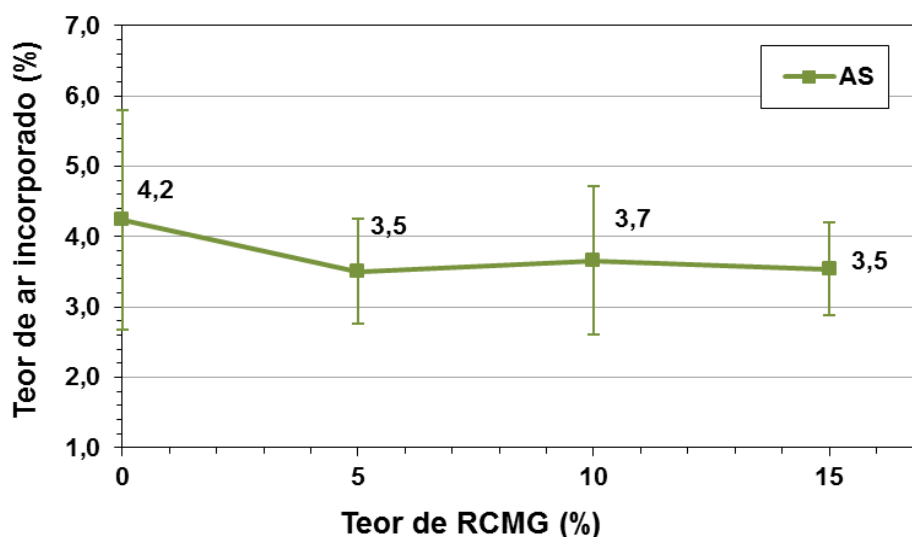
#### 4.2.1.2 Teor de ar incorporado e densidade de massa das argamassas simples (AS).

A densidade de massa aparente consiste na relação entre a massa do material e o seu volume, incluindo os vazios, a uma temperatura estabelecida.

Os vazios presentes na argamassa contêm ar aprisionado deixado pela evaporação do excesso de água de amassamento. Com a adição do resíduo, este tende a preencher esses espaços vazios, deixando-a mais densa, causando o efeito *filler*. O aumento do teor de *filler* faz com que aumente a densidade de massa aparente no estado fresco e, por conseguinte, diminua o teor de ar incorporado da mistura (ARNOLD & KAZMIERCZAK, 2009).

Os resultados de teor de ar incorporado e de densidade das AS podem ser observados pelas Figuras 42 e 43, respectivamente.

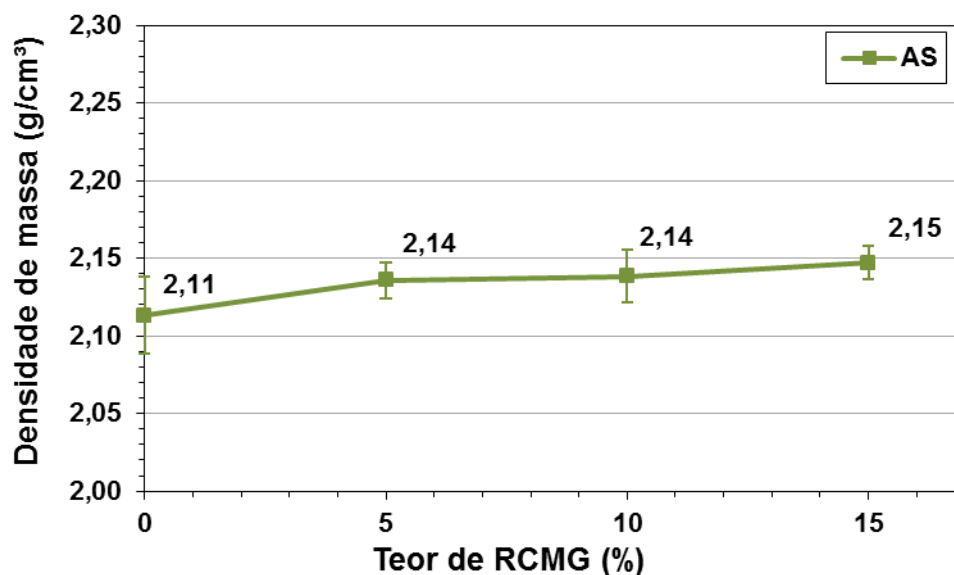
Figura 42: Teor de ar incorporado das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que, em relação à argamassa de referência, o acréscimo de RCMG promoveu a diminuição do teor de ar incorporado da mistura, pois, as partículas finas do RCMG promovem o preenchimento dos espaços vazios, resultando no tamponamento dos poros e consequentemente, refletem no aumento da densidade das argamassas.

Figura 43: Densidade de massa das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.



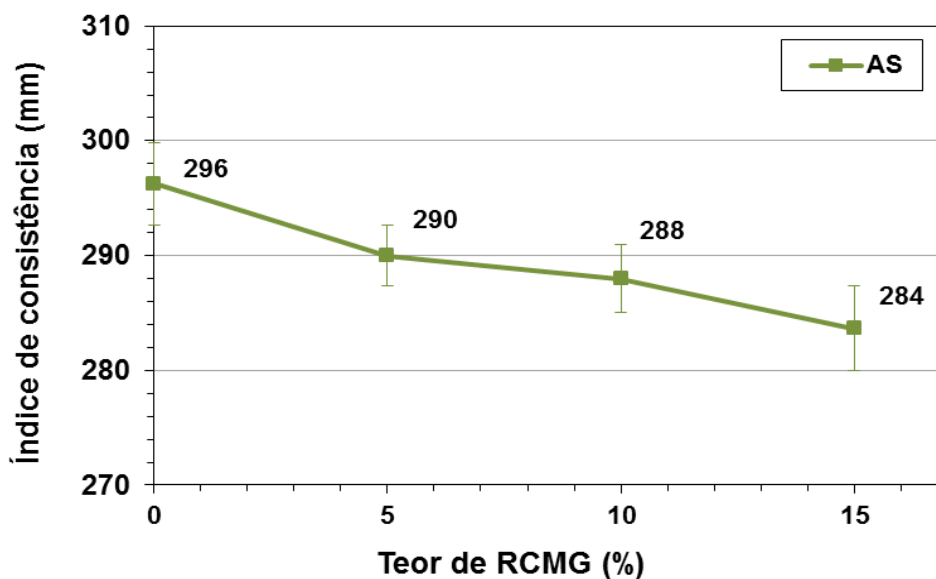
Fonte: A autora, 2013.

#### 4.2.1.3 Determinação das propriedades reológicas das argamassas simples (AS)

A determinação das propriedades reológicas por meio do *flow table*, (NBR 13276:2005) consiste na técnica mais tradicional utilizada em pesquisas. Conforme se observa na Figura 44, os resultados de espalhamento das argamassas simples foram diminuindo conforme se acrescentava o RCMG, pois devido o acréscimo de partículas finas houve a melhora no empacotamento das partículas resultando na diminuição do índice de consistência.

Krstulović *et al.* (1994) verificaram que a presença de *filler* em argamassas produziu significativa diminuição da trabalhabilidade e aumentou a densidade das mesmas. Este mesmo efeito foi identificado nas argamassas com RCMG. Observa-se também que houve a diminuição da exsudação, pois a água livre da mistura foi adsorvida pelo resíduo. Situações semelhantes foram verificadas por Gonçalves (2000) e Corinaldesi *et al.* (2010).

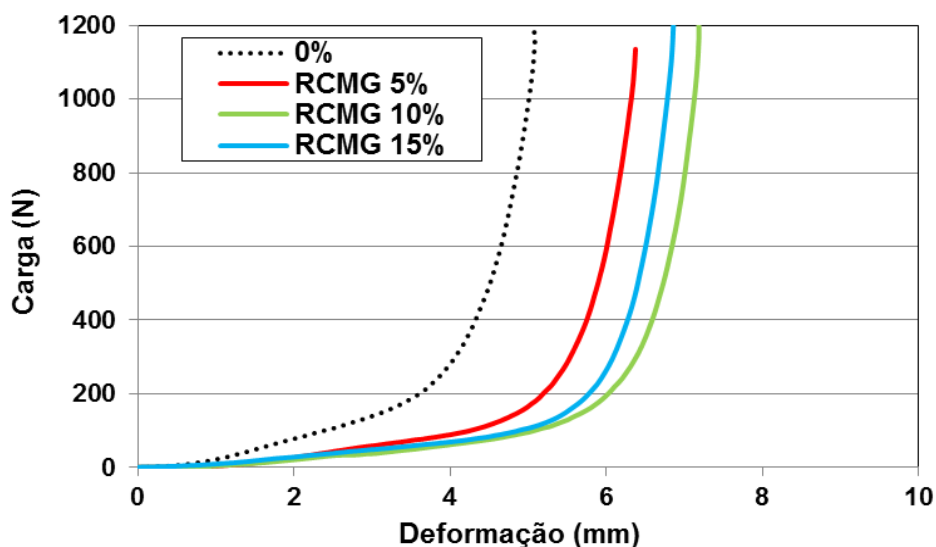
Figura 44: Índice de consistência das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

O método de avaliação da reologia pelo *squeeze-flow* é capaz de promover resultados que mais se aproximam as condições de aplicação das argamassas, por consistir no cisalhamento, em elevadas taxas, junto com a alongação de espalhamento do material sobre o substrato (CARDOSO *et al.*, 2005). A Figura 45 ilustra os resultados obtidos pelas AS.

Figura 45: Análise reológica das argamassas simples (AS) pelo método *squeeze-flow*, em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que o estágio I (Figura 16), referente ao regime de deformação elástico linear, é imperceptível, tornando-se mais visível o estágio II, onde se percebe o regime de deformação plástica e o estágio III, referente ao regime de deformação intensa, quando ocorre o aumento excessivo da carga porque a resistência dos grãos é maior do que a resistência da argamassa. Neste estágio pode acarretar na deformação dos grãos.

Nota-se que a AS de referência (sem RCMG) exigiu maior carga para se deformar e, conseqüentemente, menor plasticidade. As AS com RCMG apresentaram maior plasticidade, como demonstrado pelo estágio II, do gráfico típico de carga versus deslocamento. Resultados semelhantes foram observados por Arnold & Kazmierczak (2009).

Os resultados indicam que a adição de 10% de RCMG faz com que haja maior distância interpartículas, diminuindo o atrito entre elas, promovendo melhor fluidez e maior plasticidade, enquanto que o acréscimo de 15% de RCMG tornaria a quantidade de finos em excesso, prejudicando a plasticidade e piorando a trabalhabilidade (CARDOSO *et al.*, 2009; CARDOSO, 2009). Além disso, o excesso de resíduo adicionado aumenta a probabilidade de se formar aglomerados, elevando o atrito interno, dificultando assim o fluxo da mistura (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

As argamassas simples (AS) também foram avaliadas pelo reômetro, apenas em função do tempo (47 minutos). A velocidade máxima utilizada foi de 150 rpm e dessa forma foi possível observar o torque obtido pelo aparelho e, analogamente, a tensão de escoamento e a viscosidade. É importante ressaltar que as argamassas simples (AS) tiveram um acréscimo de 12% de água para que pudessem ser avaliadas e mesmo assim, a AS com 15% de RCMG não chegou ao final do ensaio, atingindo o limite de torque máximo do reômetro (150 mN.m), indicando que a mistura estava muito consistente, necessitando de mais força para rotacioná-la, como mostra a figura 46.

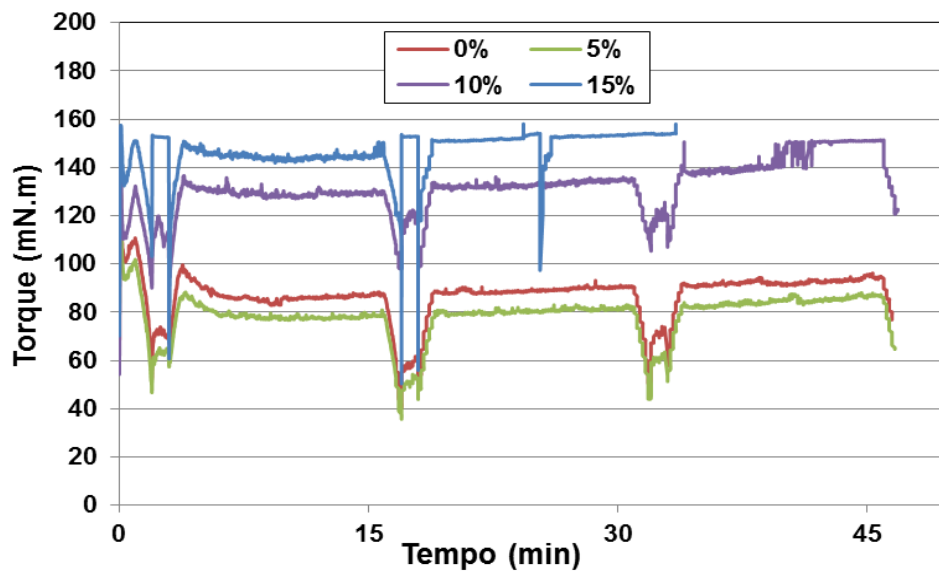
Observa-se que também houve um expressivo aumento na resistência ao cisalhamento e na consistência com o acréscimo de 10% e 15% de RCMG. Contudo, pode-se observar que o resíduo melhorou o fluxo das argamassas quando inserido em poucas quantidades, em até 5%, e que teores acima deste



valor dificultam o bom desempenho das misturas, criando aglomerados de partículas e prejudicando a plasticidade das argamassas (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

No início do segundo ciclo todas as argamassas apresentaram um pico no valor de torque, e logo após, uma redução. Isso é natural, pois durante os primeiros instantes, as partículas estão se ajustando ao meio, ou seja, ocorre uma organização espacial entre os agregados, enquanto as argamassas se adequam às condições de rotação (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Figura 46: Reologia das argamassas simples (AS) por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.

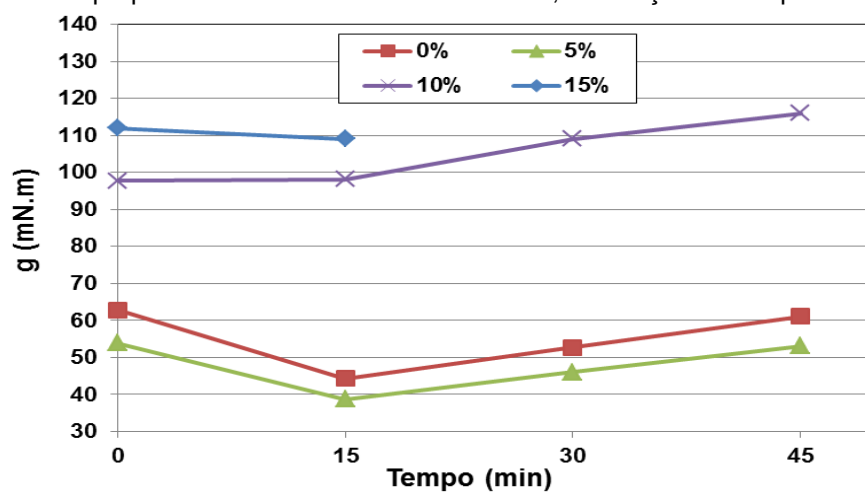


Fonte: A autora, 2013.

Mediante o modelo de Bingham aplicado aos fluxos nos momentos de desaceleração do reômetro, de 150 a 1 rpm, foi possível calcular parâmetros proporcionais à tensão de escoamento ( $g$ ), a partir do coeficiente linear da reta, na linha de tendência, e a viscosidade ( $h$ ), a partir do coeficiente angular da mesma (Eq. 6). Como a AS com 15% de RCMG não completou todo o ensaio, só foi possível calcular a tensão de escoamento e a viscosidade nos dois primeiros ciclos. A Figura 47 mostra os resultados obtidos pela argamassa simples (AS), onde se percebe que, no geral, os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento, foram decrescentes nos primeiros quinze minutos, pois, com o início da rotação, houve o rompimento da estrutura tridimensional das

partículas sólidas presentes nas argamassas, fazendo com que a água da mistura ficasse entre os grãos, facilitando o escoamento das argamassas durante o processo (OLIVEIRA, 2000; FORMAGINI, 2005). Com o passar do tempo, devido às reações de hidratação do cimento e com o acréscimo do resíduo, as argamassas simples tiveram um aumento gradual.

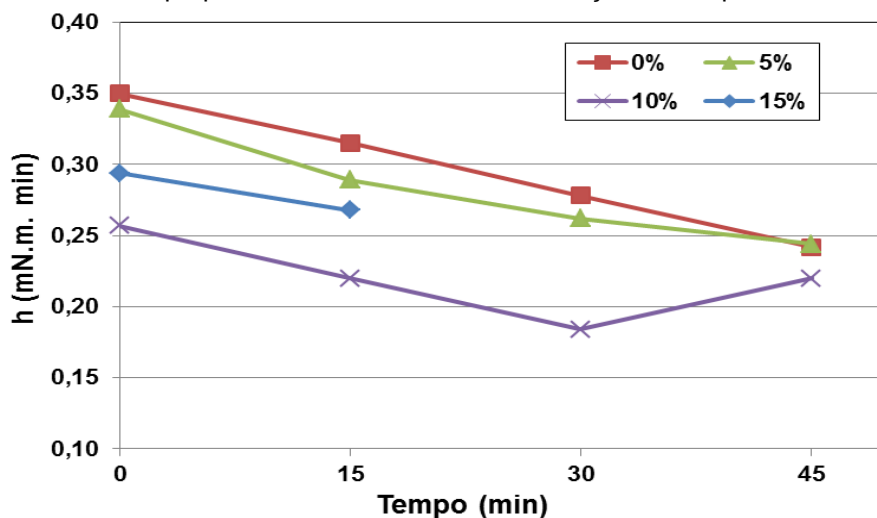
Figura 47: Comportamento reológico das argamassas simples (AS) mediante os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo.



Fonte: A autora, 2013.

A Figura 48 mostra os valores de  $h$ , proporcionais à viscosidade plástica, em função do tempo.

Figura 48: Comportamento reológico das argamassas simples (AS) mediante os valores de  $h$ , proporcionais à viscosidade, em função do tempo.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que a AS de referência (sem RCMG) obteve valores decrescentes de  $h$  com o passar do tempo porque o efeito da organização das partículas estava prevalecendo durante o ensaio.

Com o acréscimo de 5% de RCMG, houve um pequeno aumento, com o acréscimo de 10% de RCMG, percebe-se que, após 30 minutos, o efeito da hidratação do cimento fez com que a viscosidade aumentasse e com 15% de RCMG, não foi possível observar este aumento devido a interrupção do ensaio.

## **4.2.2 Caracterização das argamassas simples (AS) no estado endurecido**

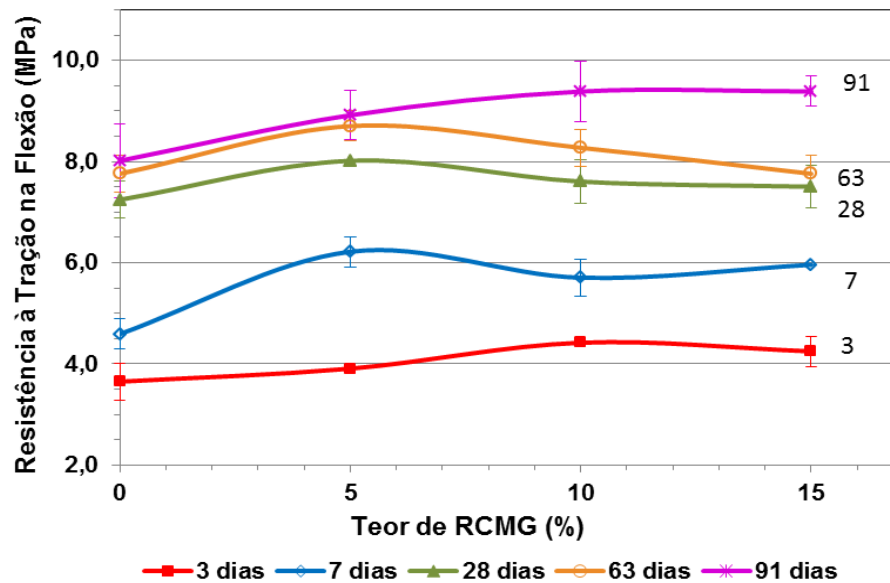
### **4.2.2.1 Caracterização Mecânica das argamassas simples (AS)**

Os ensaios mecânicos das argamassas simples (resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral) foram avaliados nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, a fim de se obter um estudo mais minucioso do comportamento do RCMG.

Os ensaios de tração na flexão das argamassas simples com 0%, 5%, 10%, 15% de RCMG foram realizados nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em corpos de prova prismáticos, sendo avaliados pela prensa eletromecânica (VEB – Werkstoffprüfmaschinen Leipzig) com capacidade máxima de 30.000Kgf. Os resultados obtidos estão descritos na Figura 49.

Observa-se que as argamassas contendo o RCMG obtiveram resultados superiores aos da argamassa de referência. Nas primeiras idades (3 dias), a argamassa contendo 10% de RCMG apresentou os melhores resultados, com 4,42 MPa, enquanto que a argamassa de referência (0%) ficou com 3,65 MPa, representando um aumento de 21,1%. E com sete dias, essa diferença foi ainda maior, apresentando um aumento de 35,51%. Este aumento, com relação à resistência aos esforços de tração, é devido ao efeito físico do *filler* que acelera a hidratação do cimento nestas idades (GONÇALVES, 2000).

Figura 49: Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas simples, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.



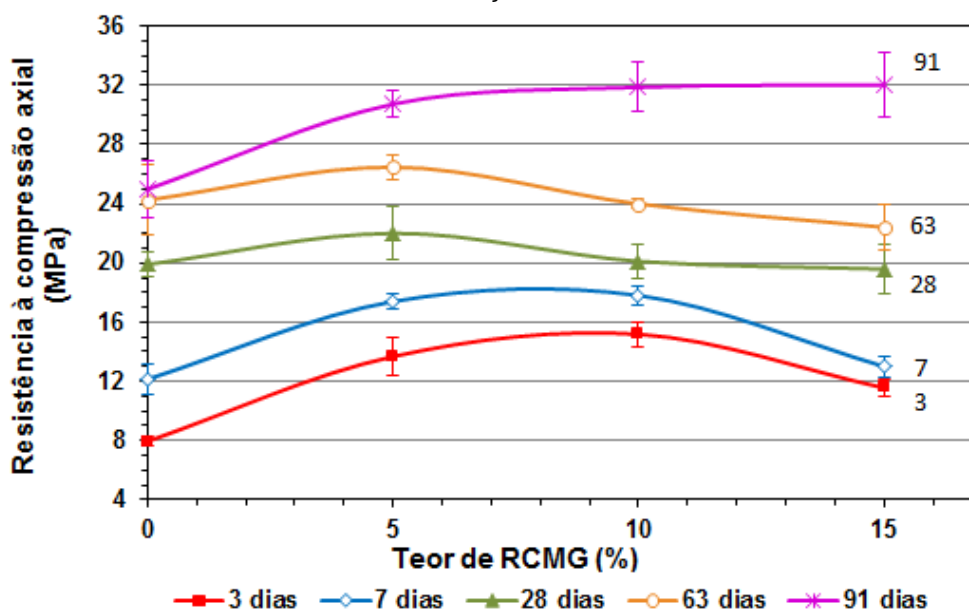
Fonte: A autora, 2013.

Aos 91 dias, as argamassas contendo 10% e 15% de RCMG apresentaram um aumento considerável com relação à argamassa de referência (37,53%), devido ao melhor empacotamento das partículas, pois, as partículas finas tendem a preencher os espaços vazios existentes, aumentando a densidade e compacidade do material.

Gonçalves (2000) verificou que em concretos compostos com 10% e 20% de adição de resíduo de corte de granito (RCG) apresentaram resistência à tração na flexão maior do que o concreto de referência, porém essa diferença não foi muito grande. O autor acredita que a distribuição das partículas, o refinamento dos poros, a possível dispersão e aceleração da hidratação fizeram com que a resistência aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RCG se elevassem.

Após a ruptura dos corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão, cada metade restante foi submetida ao ensaio de resistência à compressão axial, cujos resultados estão na Figura 50.

Figura 50: Resultados de resistência à compressão axial das argamassas simples, nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.

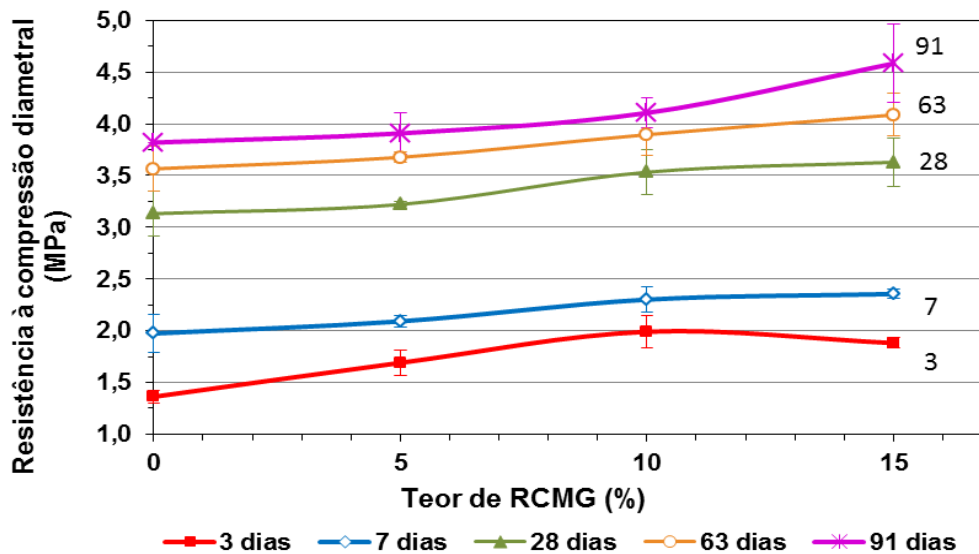


Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que as argamassas com adição do RCMG tiveram melhoras substanciais na resistência axial, principalmente nas primeiras idades, aos 3 dias, onde ocorreu um aumento de 91,07% nas argamassas contendo 10% de RCMG comparadas à argamassa de referência. Pois, a resistência à compressão axial de ambas foi de 7,95 MPa para 0% de RCMG e 15,19 MPa para 10% de RCMG. Isso mostra que o efeito produzido pelo RCMG nas argamassas é preponderantemente físico, de tamponamento dos poros e complemento da granulometria, pois, a elevada finura dos *fillers* é capaz de ativar a hidratação do cimento atuando como pontos de nucleação, provocando a precipitação de produtos hidratados e, assim, acelera o ganho de resistência nas primeiras idades, o que torna a pasta mais densa e homogênea pela diminuição do diâmetro e melhor distribuição dos poros (MORAES, 2001).

Os corpos de prova cilíndricos, compostos por argamassa simples (0%, 5%, 10%, 15% de RCMG), foram avaliados aos 3, 7, 28, 63 e 91 dias, quanto à resistência à compressão diametral. O equipamento utilizado para este ensaio foi a prensa para CBR, com anel dinamométrico e com capacidade máxima de 5000 Kgf. Os resultados estão apresentados na Figura 51.

Figura 51: Resistência à tração por compressão diametral das argamassas simples (AS), nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que houve um aumento da resistência com o acréscimo do resíduo, praticamente em todas as idades, se tornando mais acentuado nas idades mais avançadas. Este fato se atribui ao efeito físico da adição mineral sobre o empacotamento das partículas, pois, o alto teor de finos contribui para a nucleação heterogênea, ou seja, um processo conduzido pela ativação química da hidratação do cimento que catalisa o processo de nucleação dos hidratos por meio da redução da barreira de energia, aumentando assim, a homogeneidade e a resistência (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

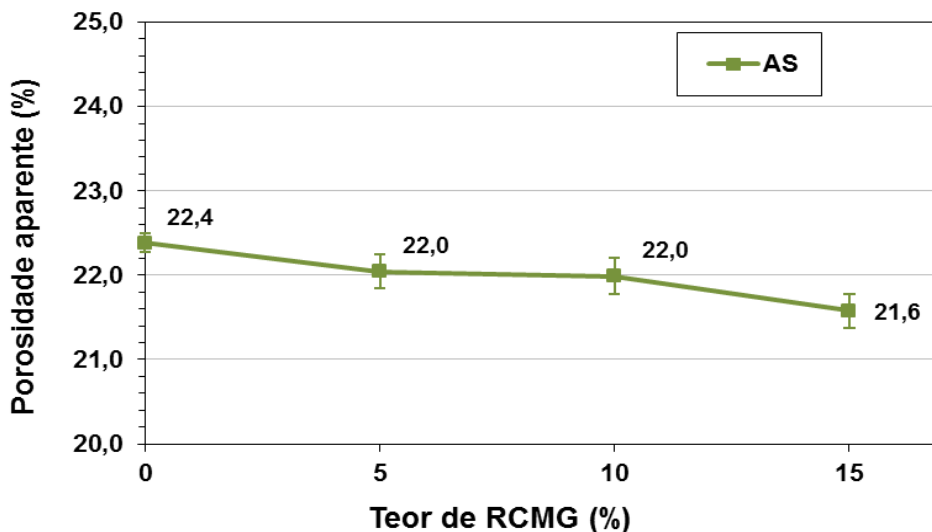
#### 4.2.2.2 Caracterização física das argamassas simples (AS)

##### a) Índice de vazios, porosidade e densidade aparentes das argamassas simples (AS)

Mediante os ensaios de avaliação dos índices de vazios e da massa específica é possível observar a evolução da porosidade e da densidade aparentes. Os resultados, realizados aos 28 dias, de porosidade aparente e

densidade das argamassas simples (AS) estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 52 e 53.

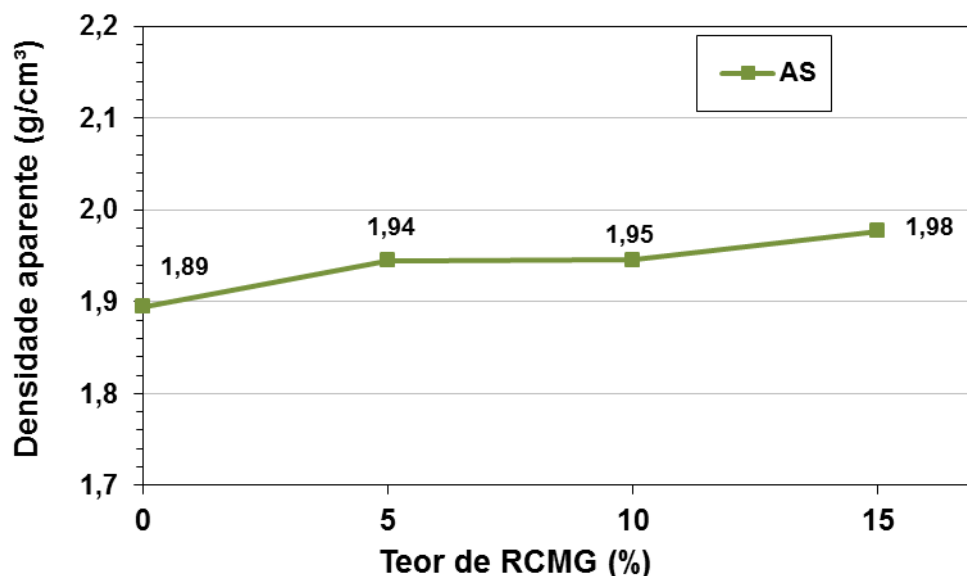
Figura 52: Porosidade aparente das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que nas argamassas simples (AS), a porosidade foi reduzindo conforme se aumentava o teor de RCMG. Isso mostra que o resíduo preencheu os espaços vazios, promovendo melhor empacotamento das partículas e conseqüentemente maior compactidade da mistura, devido a sua atuação como *filler*. O efeito de enchimento é explicado pelo aumento da área superficial do resíduo fazendo o papel de pontos de nucleação de hidratos, acelerando as reações de hidratação principalmente nas primeiras horas, assim, a pasta se torna mais densa e homogênea pela diminuição do diâmetro dos poros e melhor distribuição desses, que irá refletir no aumento da densidade e da resistência mecânica (WANG *et al.*, 1997; BOUASKER *et al.*, 2008). Pois, quanto menor a quantidade de poros, maior a densidade das argamassas e conseqüentemente, maior resistência mecânica. O aumento da densidade pode ser observado pela figura 53.

Figura 53: Densidade aparente das argamassas simples (AS) em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

#### b) Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas simples (AS)

Existem alguns métodos de ensaio não destrutíveis que são capazes de monitorar o desempenho dos revestimentos de argamassas quanto às resistências mecânicas e quanto ao surgimento de fissuras. Mediante a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é possível inferir se a argamassa está mais compactada e densa ou se está mais porosa e sujeita a fissuras, pois, quanto mais fechados estiverem os poros, mais contínuo se torna o caminho para as ondas se propagarem e conseqüentemente, mais resistentes serão as argamassas (SILVA & CAMPITELLI, 2006).

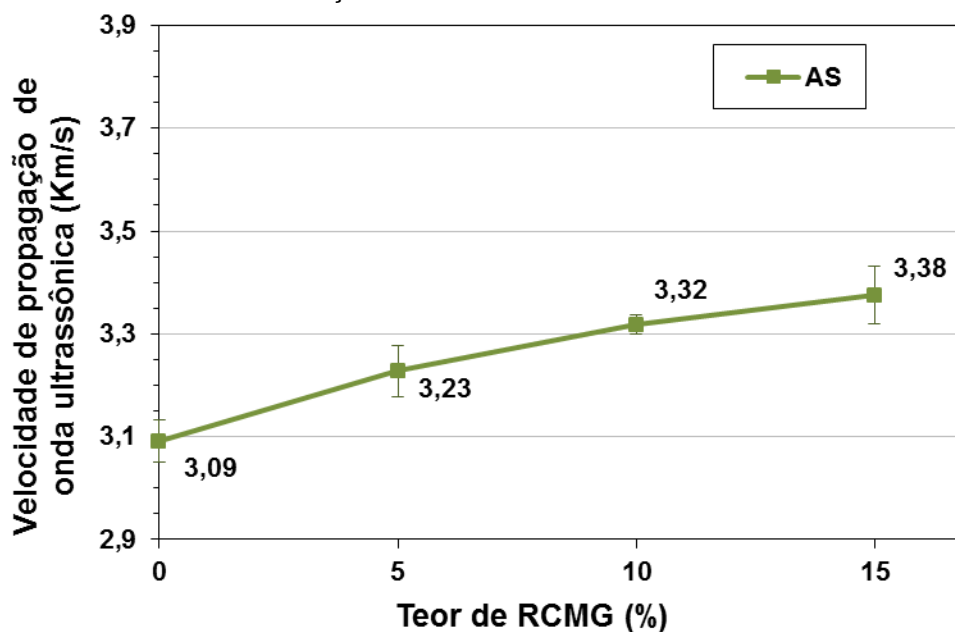
O resultado apresentado pelas argamassas simples (AS), ilustrado pela Figura 54, mostra que com o acréscimo do RCMG, a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aumentou, indicando a atuação do resíduo como *filler*, preenchendo os espaços vazios.

Segundo Dal Molin (2011) as partículas finas agem como pontos de nucleação e precipitação de hidratos, atuando no refinamento da estrutura de poros e dos produtos hidratados do cimento. Assim, as adições de RCMG, por



possuírem elevada finura, influenciam na cinética das reações de hidratação, acelerando-as de forma a restringir os espaços onde os produtos hidratados pudessem crescer, gerando maior quantidade de pequenos cristais, ao invés de poucos cristais de tamanho maior.

Figura 54: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



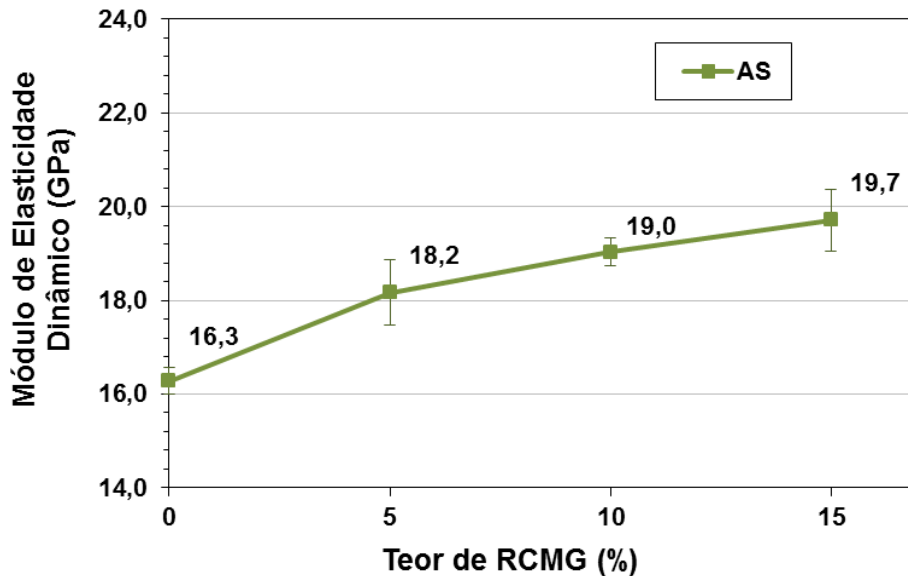
Fonte: A autora, 2013.

Silva & Campitelli (2006) também verificaram o aumento da compacidade do conjunto ligante/agregado, devido principalmente ao aumento do teor de finos na mistura, aumentando assim, a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Mediante os resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é possível estabelecer o módulo de elasticidade dinâmico, cujos valores são mostrados pela Figura 55.

Observa-se que quanto maior a velocidade de propagação da onda ultrassônica, maior é o módulo de elasticidade dinâmico, pois a relação entre ambos é diretamente proporcional, como mostrado pela equação 15. Quando um material possui módulo de elasticidade alto, significa que este é mais rígido e resistente, por conseguinte, possui menor deformação elástica, tornando-se frágil (CALLISTER, 2008). Benachour *et al.* (2008), afirmam que quanto maior a

porosidade das argamassas, menor o módulo de elasticidade e mais flexíveis essas se tornam.

Figura 55: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

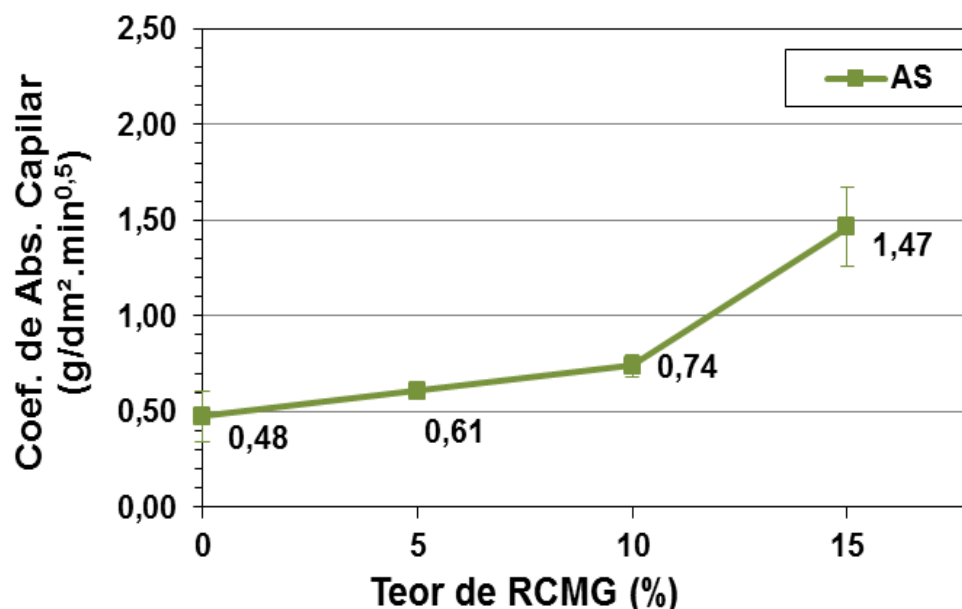
### c) Absorção de água por capilaridade das argamassas simples (AS)

As argamassas estão sujeitas às intempéries e a água é um dos grandes vilões de patologias nas construções, assim, avaliar os coeficientes de absorção capilar das argamassas é um dos procedimentos que ajudam a evitar sérios problemas futuros. Os resultados desse ensaio, realizado aos 28 dias, nas argamassas simples (AS), estão ilustrados na Figura 56.

Observa-se que a absorvidade das argamassas simples (AS) é crescente em função do aumento de resíduo, principalmente em 15% de RCMG. Esse aumento é decorrente do acréscimo de partículas finas à mistura, pois essas tendem a preencher os poros, reduzindo o diâmetro desses e, conseqüentemente, aumentando a taxa de absorção capilar de água (GRIGOLI & HELENE, 2001; SILVA, 2006). Nos estudos de Silva (2006), foi constatado que quando acrescentado material pulverulento (areia britada de rocha calcária) às argamassas, a absorvidade alcançou valores mais elevados,

provavelmente devido à diminuição do raio dos poros, levando a água a atingir maiores alturas nos corpos de prova.

Figura 56: Coeficiente de absorção capilar das argamassas simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Courard & Michel (2014), verificaram que o uso do *filler* calcário como substituição de parte do cimento, em proporções variando de 0% a 15%, fez com que aumentasse a absorção de água por capilaridade e quantidades entre 15% a 27% se mantiveram praticamente constantes, isso mostra que o *filler* atuou como tamponamento dos poros.

O princípio de Arquimedes, utilizado para a determinação da porosidade aparente (Figura 52) possibilita obter um indicativo do volume total de poros permeáveis, sem fazer diferenciação entre os tipos de poros existentes. Portanto, a redução da porosidade total não implica necessariamente na redução de poros capilares. Por conta disso, a porosidade aparente pode diminuir e a absorção por capilaridade aumentar, como ocorreu com as argamassas simples.

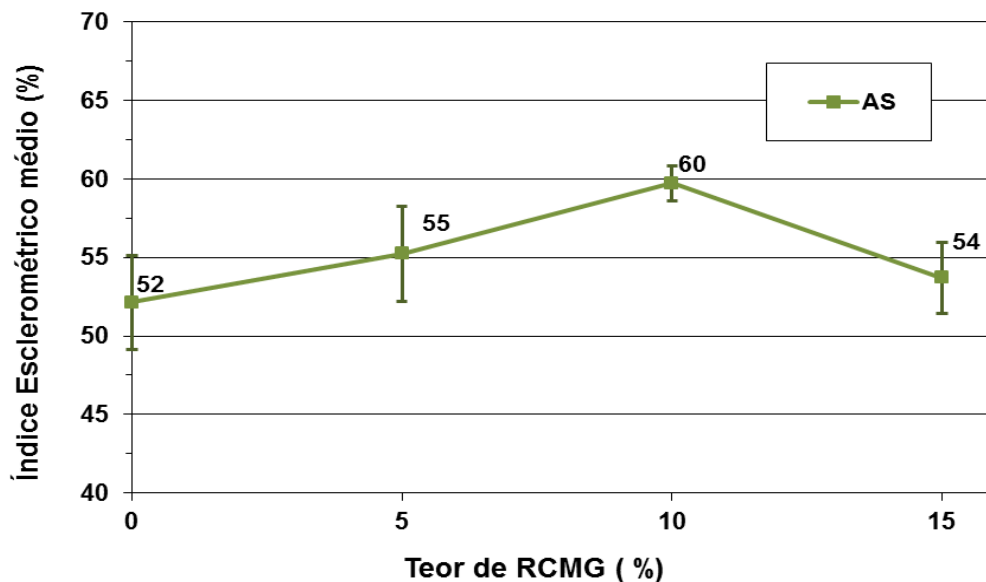
### 4.2.3 Caracterização das argamassas simples (AS) no estado aplicado

A argamassa simples foi aplicada em camada única sobre painéis constituídos por blocos cerâmicos e chapisco, sendo avaliadas aos 28 dias. Vale ressaltar que as argamassas simples não foram específicas para revestimento, mas mesmo assim foram avaliadas.

#### 4.2.3.1 Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão das argamassas simples (AS)

Através da dureza superficial dos revestimentos é possível avaliar a densidade e homogeneidade das argamassas, mediante os resultados apresentados pelo índice esclerométrico. A Figura 57 mostra os resultados do índice esclerométrico médio das argamassas simples (AS).

Figura 57: Índice esclerométrico médio, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

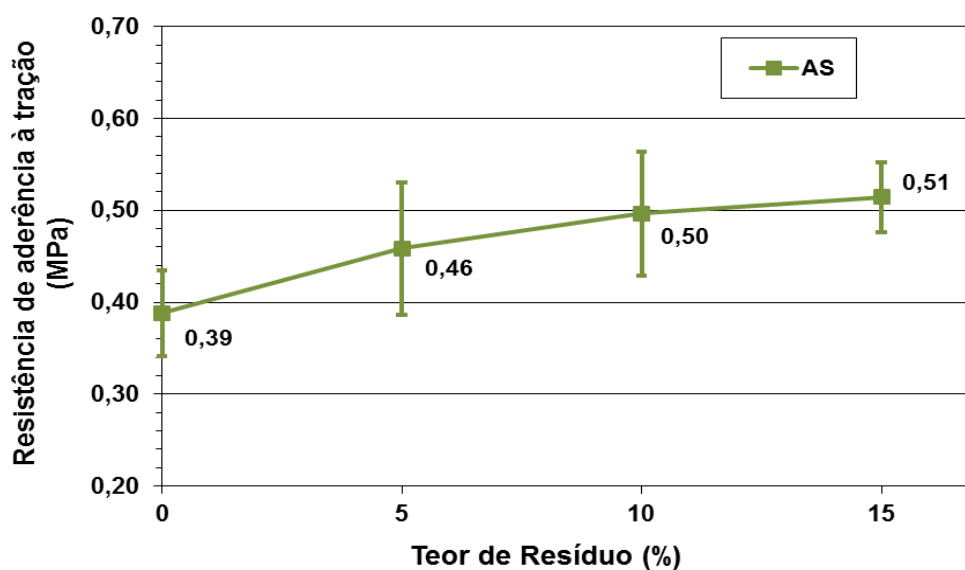
Observa-se que nas argamassas simples, a adição com 10% de RCMG proporcionou um aumento de 15,38% na dureza superficial do painel em relação à argamassa de referência. Atribui-se isso à elevada finura do resíduo,

que ao preencher a estrutura dos poros, densifica a mistura tornando-a mais homogênea, refletindo no aumento do índice esclerométrico (IE). Adições acima deste valor podem contribuir para a formação de aglomerados que devido à sua dispersão inadequada levam a uma absorção excessiva de água de mistura, dificultando o empacotamento e prejudicando a reologia da argamassa e consequentemente diminuindo a resistência das mesmas (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009). Observa-se que na resistência à compressão axial das AS, o teor de 15% de RCMG diminuiu, assim como o IE.

#### 4.2.3.2 Resistência de aderência à tração das argamassas simples (AS)

Quanto aos revestimentos de argamassa, o estudo da aderência é de fundamental importância para manter a qualidade e garantir sua eficiência ao longo dos anos, evitando os problemas relacionados ao descolamento de revestimento, que podem causar eventuais acidentes. Os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração das argamassas simples (AS) estão apresentados na Figura 58.

Figura 58: Resistência de aderência à tração, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

As argamassas simples apresentaram valores de resistência de aderência à tração superiores ao especificado pela NBR 13749/1996, que estabelece o mínimo de 0,3 MPa e tiveram um aumento da aderência, conforme se acrescentou o RCMG. A adição de 5% de RCMG obteve um aumento de 15%, enquanto que os teores de 10% e 15% de RCMG tiveram um acréscimo de aproximadamente 27% em relação a AS de referência. Além da presença do RCMG fazer com que haja o melhor empacotamento das partículas, como observado por Gonçalves (2000).

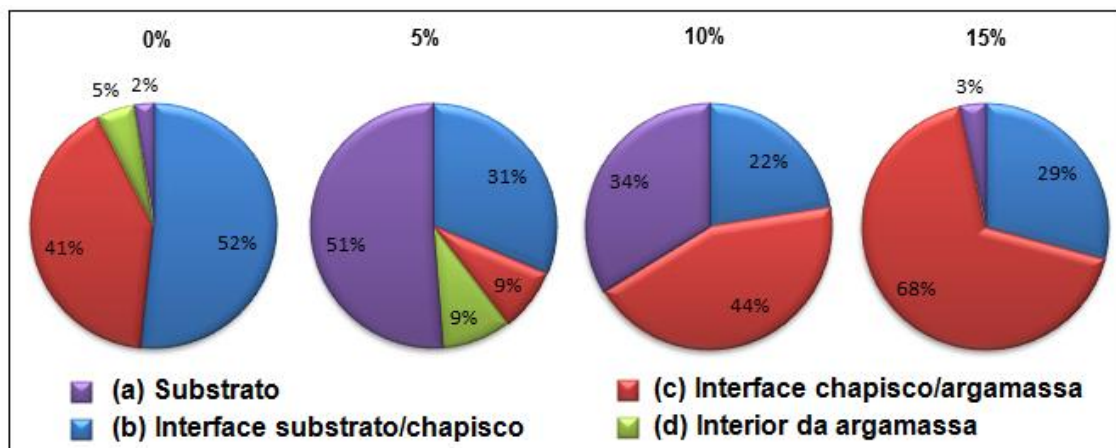
Nos estudos realizados por Carasek (1996), foi verificado que, entre os parâmetros estudados nas argamassas de cimento e industrializadas, o cimento exerceu maior influência na aderência, pois, quanto maior a quantidade de cimento nas argamassas, maiores eram os valores de aderência, atribuindo este benefício ao aumento da coesão interna da argamassa, devido às forças de Van der Waals, assim como a maior quantidade de cristais de etringita produzidos na interface argamassa/chapisco.

Os estudos de resistência de aderência à tração são complementados pela análise das formas de ruptura apresentadas pelos respectivos corpos de prova retirados do painel. A avaliação da ruptura é um pouco subjetiva, sendo de forma visual, indicando a porcentagem de ocorrência apresentada junto com o respectivo valor de resistência de aderência. De acordo com a NBR 13528:2010, foram apresentadas quatro formas de ruptura nas argamassas simples (AS), conforme ilustrado pela Figura 59. Quanto mais profundo for o arrancamento, mais homogênea é a argamassa, portanto, a melhor condição de ruptura ocorre no substrato (a), seguido da ruptura na interface substrato/chapisco (b), depois a ruptura na interface chapisco/argamassa (c) e por fim, as piores condições de rupturas acontecem no interior das argamassas (d), indicando que essas não estão coesas.

Observa-se que os resultados apresentaram melhor coesão na mistura quando houve o acréscimo do RCMG, devido ao aumento da proporção de finos e melhor empacotamento das partículas, pois, as AS com de 5% de RCMG, mesmo apresentando baixas rupturas em seu interior, obtiveram 82% de rupturas distribuídas entre o substrato e a interface substrato/chapisco, tipo

(a) e (b), respectivamente. Com o acréscimo de 10% e 15% de RCMG, a pior das opções deixou de existir, a ruptura do tipo (d), no interior da argamassa.

Figura 59: Incidência das formas de ruptura observadas após o ensaio de resistência de aderência à tração em função dos teores de RCMG adicionados das argamassas simples



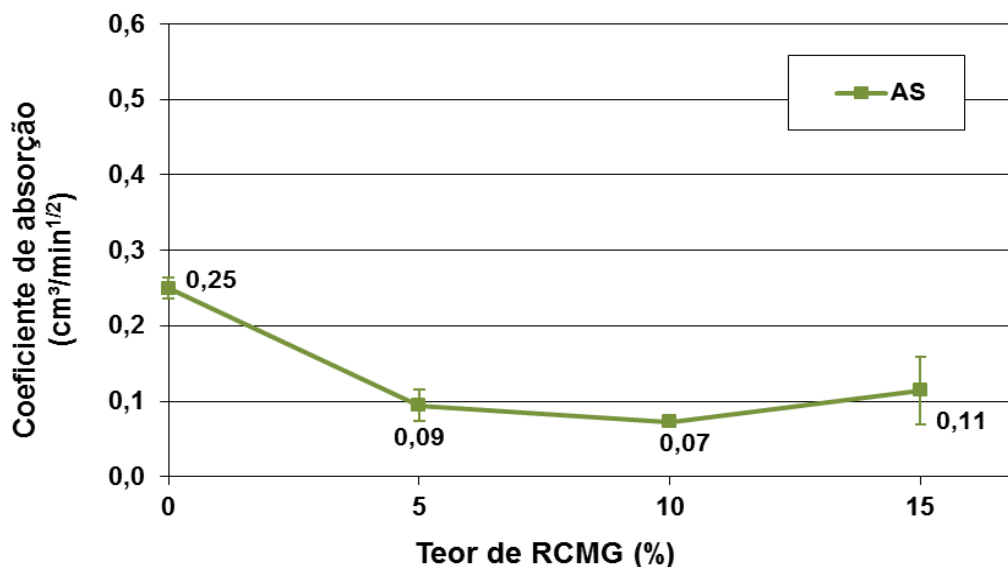
Fonte: A autora, 2013.

Carasek (1996) afirma que a aderência é um fenômeno mecânico decorrente do intertravamento de cristais de etringita no interior dos poros do substrato. Em seu estudo, a argamassa foi aplicada diretamente sobre o substrato e quando as rupturas ocorreram na interface entre a argamassa e o substrato, foi decorrente da falta de aderência. Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar que o descolamento na interface não aconteceu na região rica em etringita e sim no interior da argamassa, em uma camada muito próxima ao substrato, afastada cerca de 50 a 200  $\mu\text{m}$ , caracterizando, assim, falha por coesão da argamassa próxima à região de contato. Pelo estudo não foi possível explicar a causa da ruptura, pois não foi constatada a presença de microfissuras e nada que pudesse induzir a fratura naquele plano e a autora acredita que a baixa resistência nesta região pode ser atribuída ao aumento da porosidade da pasta aglomerante, mesmo sem ter sido avaliado esta questão.

#### 4.2.3.3 Absorção de água sob baixa pressão (RILEM) nas argamassas simples (AS)

Os resultados de absorção de água obtidos pelas argamassas simples (AS) estão ilustrados na Figura 60.

Figura 60: Coeficiente de absorção, aos 28 dias, da argamassa simples (AS), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que após 60 minutos, as AS com a adição do RCMG apresentaram coeficiente de absorção menor do que as AS de referência (0% de RCMG), indicando que o resíduo promoveu um tamponamento dos poros, devido as suas propriedades como *filler* inerte, diminuindo assim, as possibilidades de haver percolação da água.

#### 4.2.4 Considerações sobre as argamassas simples (AS)

As argamassas simples (AS) que tiveram o acréscimo de RCMG, no geral, apresentaram melhoras em seu desempenho em relação à argamassa sem resíduo, pois, no estado fresco, as argamassas com RCMG apresentaram maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado. Quanto à reologia,



as AS com 10% de RCMG obtiveram melhor fluidez e maior plasticidade devido a maior distância interpartículas, resultando na diminuição do atrito entre elas e favorecendo a trabalhabilidade.

Com a avaliação da tensão de escoamento e da viscosidade das argamassas ao longo do tempo, foi possível observar que, mesmo com o aumento da água para realização dos ensaios, as argamassas com RCMG apresentaram uma diminuição inicial nos valores de  $g$  (proporcionais à tensão de escoamento) e um aumento gradual após 15 minutos de ensaio, pois no início, a água de mistura estava favorecendo o escoamento dos grãos e após este período, as reações de hidratação do cimento prevaleceram, e por conta disso, os valores de  $h$  (proporcionais à viscosidade) foram decrescentes no início e depois aumentaram ao longo do tempo.

No estado endurecido, houve um aumento na resistência mecânica. Aos 28 dias, a argamassa com o acréscimo de 5% de RCMG obteve um aumento de 10,62% na resistência à tração na flexão, em relação à argamassa de referência (AS sem RCMG) e um aumento de 10,55% na resistência à compressão axial. Com relação à resistência à compressão diametral, aos 28 dias, a argamassa com 15% de RCMG, obteve um aumento de 15,97% em relação a AS de referência. Além disso, as argamassas com 15% de RCMG apresentaram maior velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e maior módulo de elasticidade dinâmico, em relação à AS de referência.

Assim, devido à atuação do RCMG como *filler*, houve a melhora no empacotamento das partículas, refletindo no aumento da resistência mecânica.

No estado aplicado, as argamassas com RCMG apresentaram maior dureza superficial, maior resistência de aderência à tração e, por conseguinte, menor coeficiente de absorção, demonstrando que a finura do RCMG favorece a coesão da mistura e melhora o empacotamento das partículas.

### **4.3 Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI)**

Depois de observada a influência do RCMG nas matrizes cimentícias, estudaram-se argamassas mistas (contendo cal) e industrializadas, buscando uma aplicação mais próxima a real.

#### **4.3.1 Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado fresco**

Os resultados das argamassas mistas e industrializadas serão apresentados em um mesmo gráfico, porque ambas são destinadas para revestimento. A argamassa mista (AM) de referência, sem RCMG, é composta por cimento, areia, cal e aditivo incorporador de ar e as outras AM tiveram 5%, 10% e 15% de adição de RCMG em relação à massa de cimento.

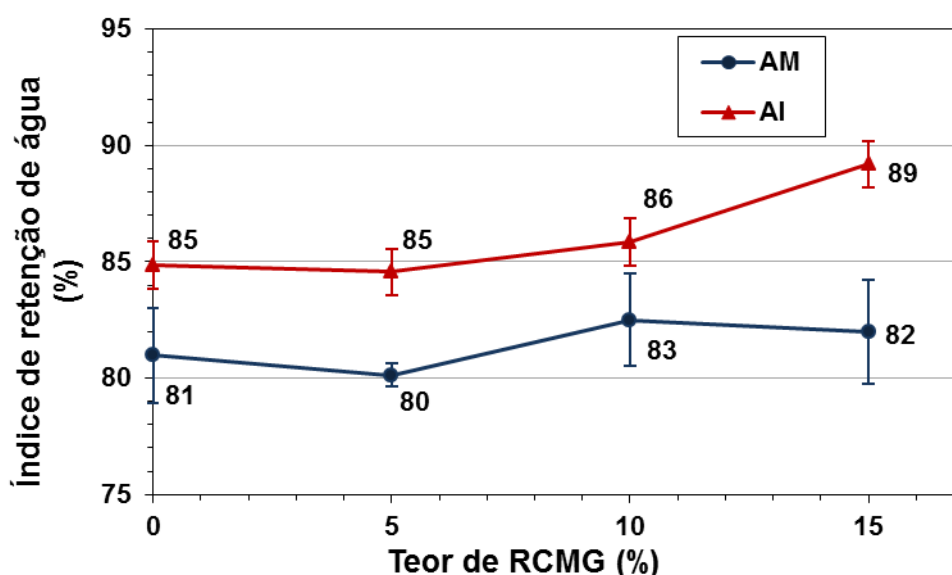
As argamassas industrializadas (AI), pelo fato de já estarem prontas para o uso, o acréscimo do RCMG foi realizado em relação à massa de materiais secos. Para encontrar um teor de adição aproximado aos 5%, 10% e 15% utilizados nas argamassas simples, foi somada a quantidade de areia e cimento utilizada nas AS e a partir da quantidade de RCMG adicionado em cada teor, verificou-se a proporção em relação à massa de materiais secos. Portanto, as argamassas industrializadas tiveram um acréscimo de RCMG de 1,4%, 2,8%, 4,2% em relação à massa de materiais secos. Esses valores são equivalentes ao acréscimo de 5%, 10% e 15% em relação à massa de cimento ocorrido nas AS.

O índice de espalhamento foi de  $260 \pm 10$  mm, tanto para as argamassas mistas (AM), quanto para as argamassas industrializadas (AI) e os gráficos se apresentam a seguir, estão padronizados com teores de 5%, 10% e 15% de adição de RCMG, porém, é importante ressaltar que as misturas das argamassas industrializadas tiveram teores de adição de RCMG de 1,4%, 2,8%, 4,2% em relação à massa de materiais secos.

#### 4.3.1.1 Índice de retenção de água das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI)

Os resultados de retenção de água obtidos pelas AM e AI estão descritos na Figura 61, onde se observa que com 5% de RCMG, quase não houve diferença para ambas as argamassas e a partir deste valor, torna-se crescente a retenção de água nas argamassas industrializadas, entretanto, a tendência de crescimento seria natural também para a AM com 15% de RCMG, pois conforme se aumenta a quantidade de finos nas argamassas, maior é a área superficial dos componentes da mistura, ou seja, maior é a área para que a água livre fique adsorvida nas partículas, mas isso não ocorreu. Sébaïbi *et al.* (2003) estudaram argamassas com diferentes tipos de cales e os autores perceberam que, nas argamassas estudadas, a retenção da água não era dependente apenas da área superficial específica, mas também da morfologia dos poros e da natureza química das cales.

Figura 61: Índice de retenção de água das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado.

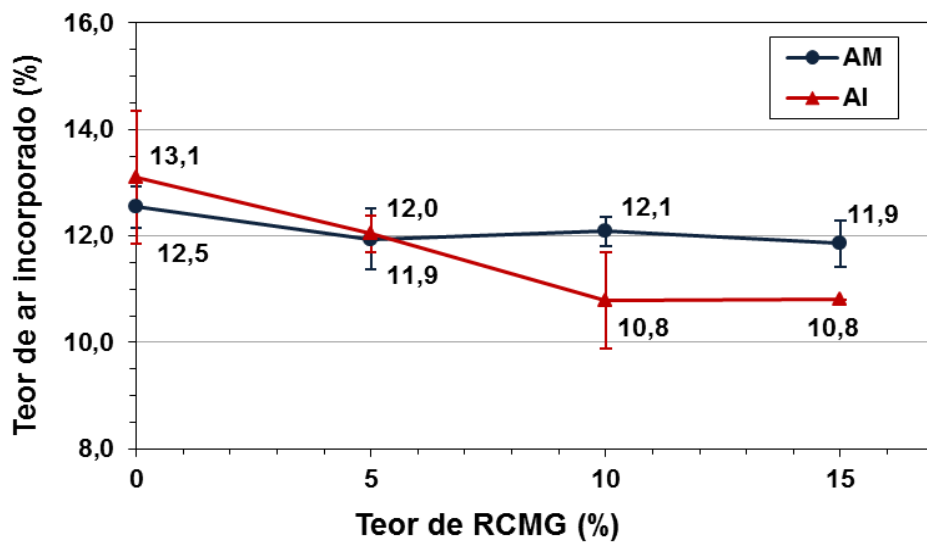


Fonte: A autora, 2013.

#### 4.3.1.2 Teor de ar incorporado e densidade de massa das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI)

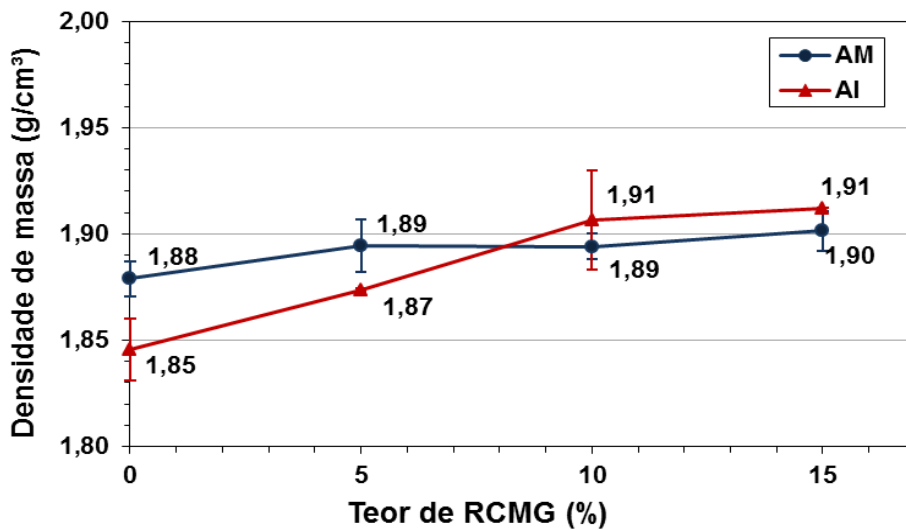
Os resultados de teor de ar incorporado obtidos pelas argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) podem ser observados pela Figura 62 e os resultados de densidade de ambas as argamassas está ilustrado na Figura 63.

Figura 62: Teor de ar incorporado das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Figura 63: Densidade de massa das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado.



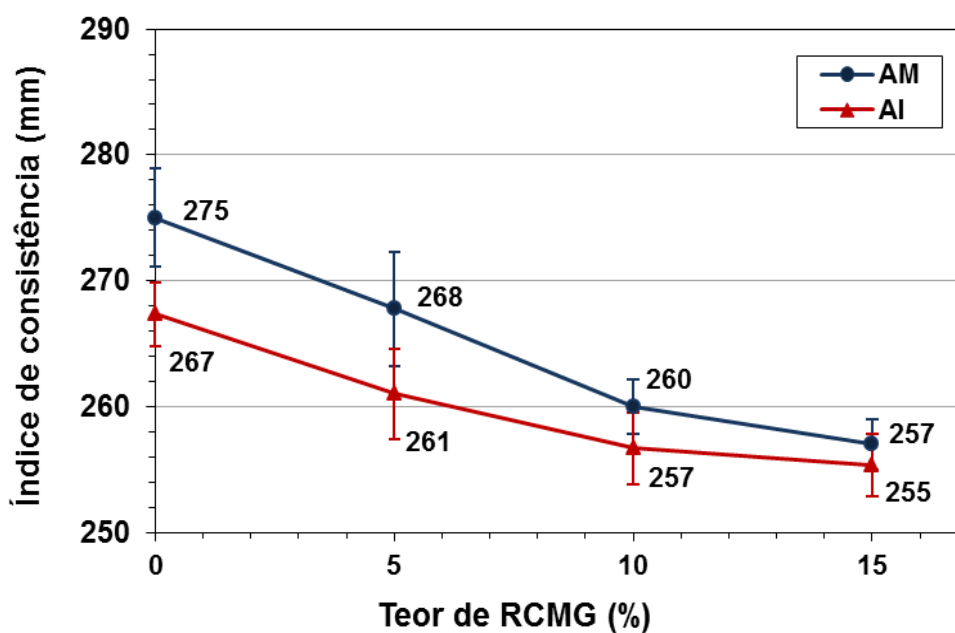
Fonte: A autora, 2013.

O teor de ar incorporado e a densidade são dois fatores que se relacionam nos estudos das argamassas e atuam de forma inversa, como mostram os resultados obtidos pelas argamassas mistas e industrializadas, pois, conforme foi se adicionando RCMG nas argamassas, esses preencheram os poros, reduzindo a quantidade de ar incorporado da mistura e aumentando a densidade. Este efeito foi mais visível nas argamassas industrializadas.

#### 4.3.1.3 Determinação das propriedades reológicas das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI)

Mediante os resultados obtidos pelo espalhamento da mesa de consistência é possível avaliar o efeito da adição do RCMG nas argamassas. Como era de se esperar, conforme se acrescentam os teores de RCMG, esses atuam como material de preenchimento, refinando a estrutura dos poros, alojando-se entre os grãos do agregado e melhorando o empacotamento do sistema. Assim, o espalhamento é reduzido, como mostra a Figura 64.

Figura 64: Índice de consistência das argamassas simples (AS), argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas em função do teor de RCMG adicionado.

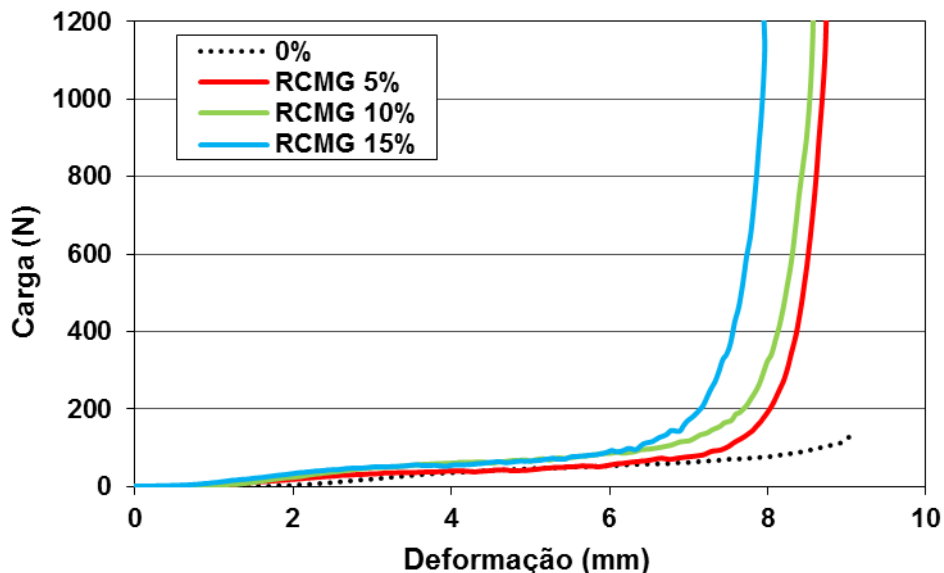


Fonte: A autora, 2013.

Os resultados reológicos das argamassas mistas (AM) pelo método do *squeeze-flow* estão ilustrados na Figura 65, e os resultados das argamassas industrializadas estão relatados na Figura 66.

Observa-se que a AM de referência (sem RCMG) obteve maior plasticidade, pois permaneceu durante mais tempo no estágio II, porém, conforme foi se acrescentando o RCMG, esta plasticidade foi diminuindo, pois o aumento de finos fez com que ocorresse maior aproximação das partículas, podendo ter gerado forças restritivas ao fluxo devido à maior interação, embricamento ou entrelaçamento dos grãos (SANTOS *et al.*, 2013).

Figura 65: Análise reológica das argamassas mistas (AM) pelo método *squeeze-flow*, em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

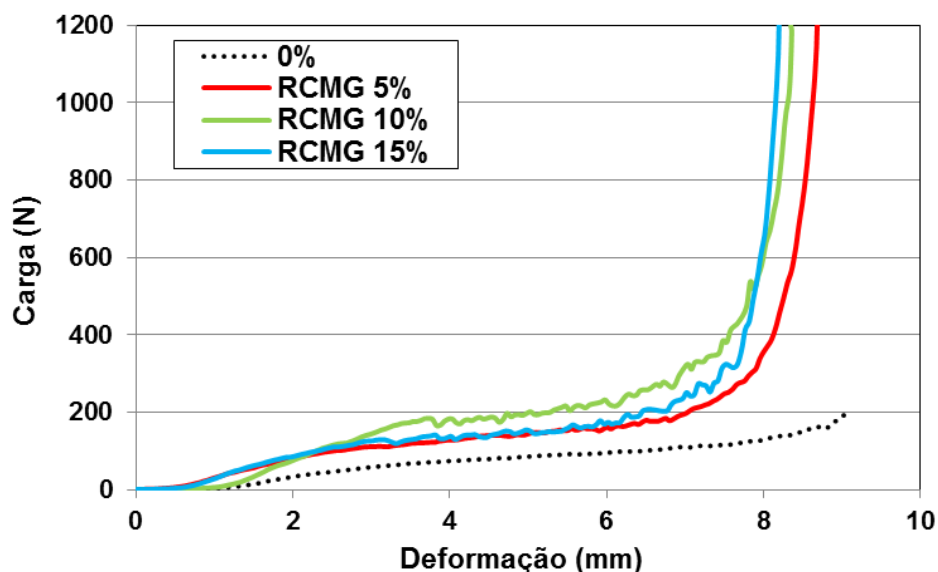
As argamassas industrializadas tiveram um comportamento bem parecido com as argamassas mistas, conforme ilustra a figura 66.

A AI de referência (sem RCMG) obteve maior plasticidade, além disso, esta foi deformada até o limite estabelecido pelo ensaio (9 mm), sem atingir o limite de força (1kN), apresentando um comportamento predominantemente plástico e apenas iniciando o terceiro estágio de deformação ao final do ensaio.

Nas AI com adição do RCMG a plasticidade diminuiu em relação a AI de referência, pois houve o aumento da carga para que ocorresse a deformação e a diminuição do regime plástico (estágio II). Isso indica que o aumento de finos

na mistura dificultou a fluidez das mesmas, pois além de serem compostas por partículas de diâmetro médio igual a 0,015 mm, podem possuir outros tipos de *fillers* em sua constituição (MARTINS, 2010).

Figura 66: Análise reológica das argamassas industrializadas (AI) pelo método do *squeeze-flow* em função do RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013

Observa-se também que houve a presença de oscilações nas AI, durante o estágio II e início do estágio III, principalmente nas AI com adições de 10% e 15% de RCMG, mostrando um fluxo descontínuo e indicando que houve um aumento de atrito interno nas argamassas e este foi superior ao atrito entre a argamassa e as placas, sugerindo a ocorrência de um nível alto de cisalhamento interno no material (CARDOSO, 2009).

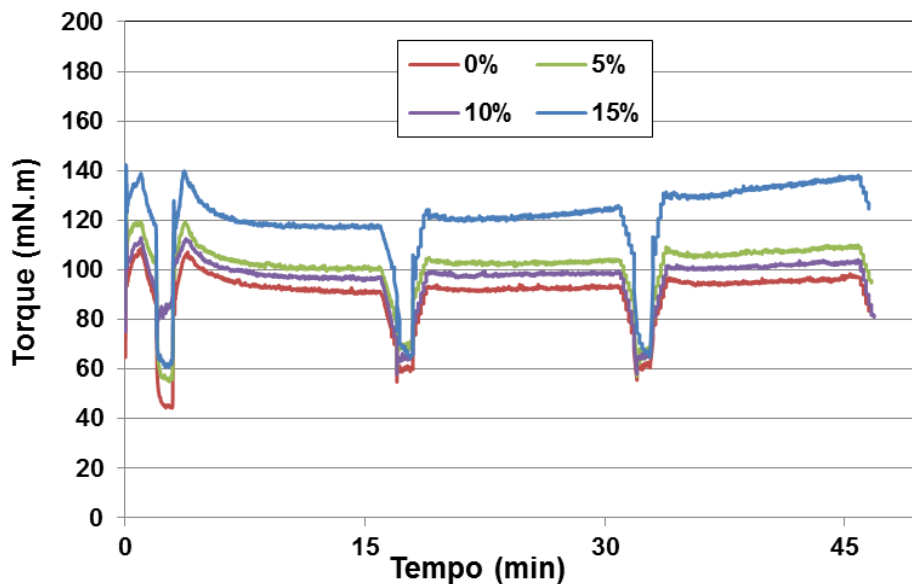
A reologia das AM e AI também foi observada por meio do reômetro, sendo que, para a realização do ensaio, foi necessário adicionar um pouco de água, resultando em um acréscimo de 13% nas argamassas mistas e 8% nas argamassas industrializadas, portanto elas são diferentes das outras argamassas. Os resultados de reologia mediante o torque em função do tempo, das AM e AI, podem ser observados nas Figuras 67 e 68, respectivamente.

Observa-se que, em ambas as argamassas (AM e AI), durante os períodos de pausa na rotina escolhida, ocorre um pico no valor de torque no início do segundo ciclo, e logo após, uma redução, devido aos ajustes iniciais

das partículas em relação ao meio, ou seja, ocorre a melhora na organização espacial dos agregados, fazendo com que as argamassas se adequem às condições de rotação (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

As argamassas mistas (AM) de referência, 5% e 10% de RCMG não demonstraram mudanças significativas no comportamento reológico, além de obterem comportamentos semelhantes entre si. O teor de 15% de adição conduziu a um aumento mais acentuado da resistência ao cisalhamento das argamassas ao fluxo, provocando torques mais elevados.

Figura 67: Reologia das argamassas mistas (AM) avaliadas por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.



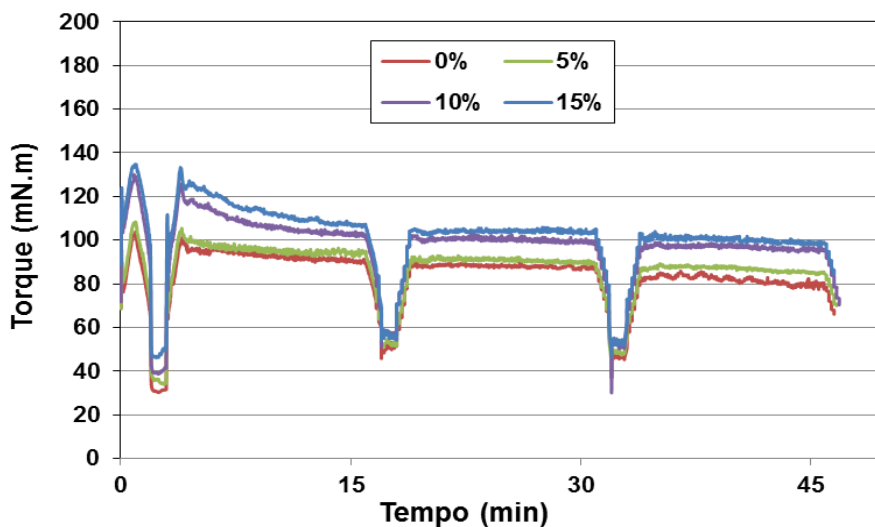
Fonte: A autora, 2013.

Nas argamassas industrializadas (Figura 68), a adição de RCMG acarretou no aumento gradual de resistência ao cisalhamento das mesmas.

No geral, as argamassas mistas tiveram mais resistência ao escoamento, enquanto que as argamassas industrializadas apresentaram um comportamento oposto, podendo ser devido a ação dos aditivos incorporadores de ar presentes na formulação e, podendo ter ainda, a influência de outros componentes da mistura, facilitando o fluxo durante os ciclos (ALVES, 2002).



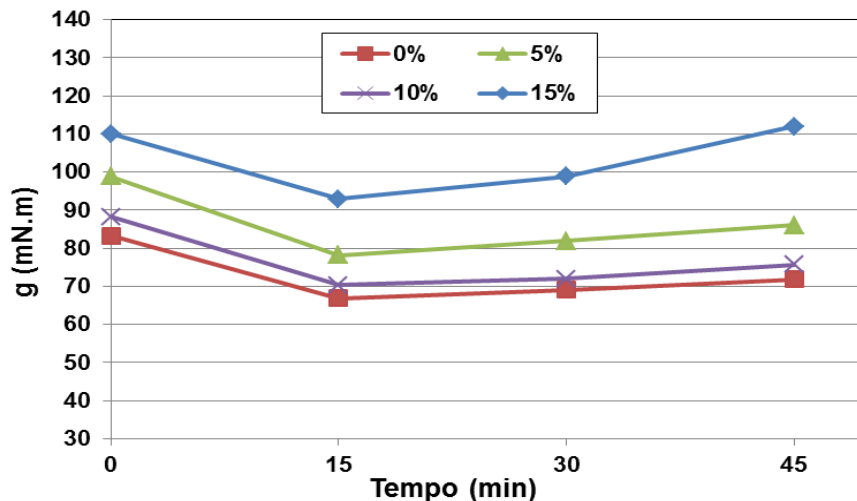
Figura 68: Reologia das argamassas industrializadas (AI) por meio do reômetro, medindo torque em função do tempo.



Fonte: A autora, 2013.

As Figuras 69 e 70 ilustram os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), respectivamente.

Figura 69: Comportamento reológico das argamassas mistas (AM) mediante os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo.



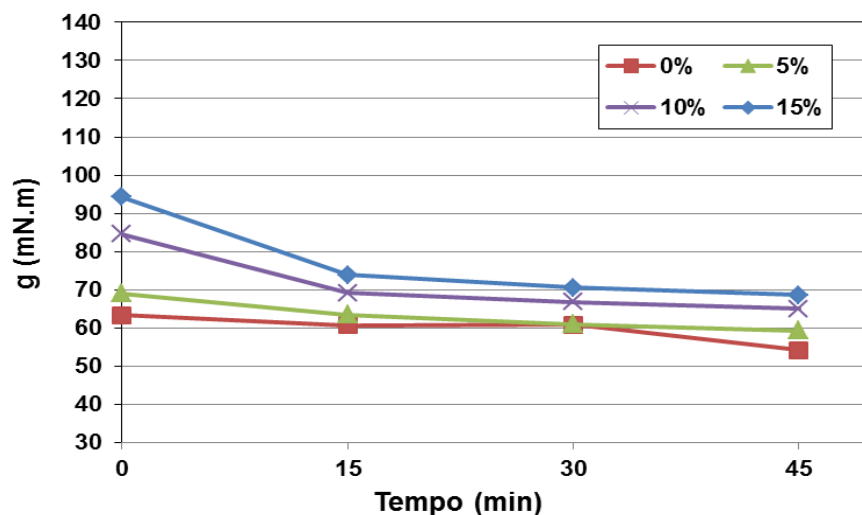
Fonte: A autora, 2013.

Observa-se que em todas as argamassas mistas (figura 69), os primeiros valores de  $g$  (proporcionais à viscosidade plástica), referentes ao início da mistura, foram maiores do que os outros, pois estava prevalecendo o

efeito da organização das partículas, e após este período, com a hidratação do cimento, os valores de  $g$  foram aumentando gradativamente.

Nas argamassas industrializadas (Figura 70), também observa-se que os valores de  $g$  (proporcionais à tensão de escoamento) iniciais foram mais altos, porém foram diminuindo, pois, após a organização das partículas da mistura, provavelmente, os aditivos continuaram reagindo (ALVES, 2002), fazendo com que esse declínio, referente à tensão de escoamento, fosse mais suave, quase não havendo diferença após 30 e 45 minutos nas AI com adições de RCMG.

Figura 70: Comportamento reológico das argamassas industrializadas (AI) mediante os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento, em função do tempo.



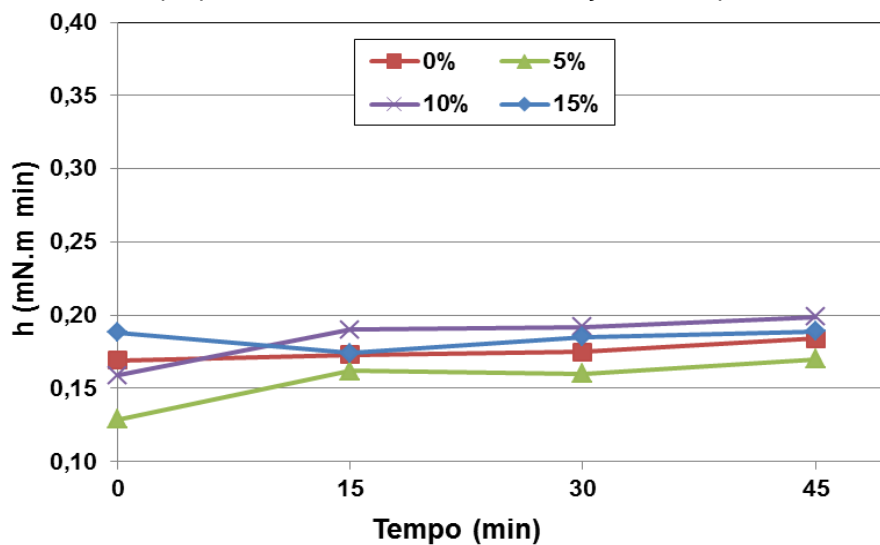
Fonte: A autora, 2013.

Os resultados referentes aos valores de  $h$  (proporcionais à viscosidade), das argamassas mistas e industrializadas estão descritos nas Figuras 71 e 72, respectivamente.

Nas argamassas mistas (Figura 71), observa-se, durante os primeiros 15 minutos, a organização das partículas ao meio e depois os valores de  $h$  permanecem praticamente constantes, com um suave crescimento ao final do ensaio, pois no início, a cal, o aditivo e o RCMG estavam se ajustando ao meio. Após esse período, ocorre a constância nos valores de  $h$ , devido ao estado de coesão da mistura que a cal proporciona em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão às partículas de agregado

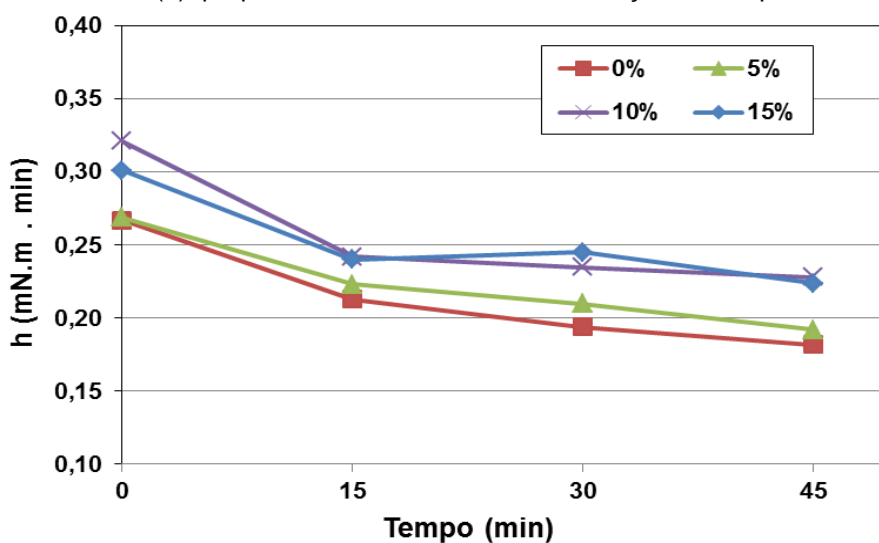
(CINCOTTO *et al.*, 1995). A cal é um aglomerante com área superficial específica 10 vezes maior que a dos cimentos, e devido a esta elevada finura, somada a presença da água, esta age como lubrificante, facilitando o manuseio oferecendo maior plasticidade e trabalhabilidade (GUIMARÃES *et al.*, 2004).

Figura 71: Comportamento reológico das argamassas mistas (AM) mediante os valores de  $h$ , proporcionais à viscosidade, em função do tempo.



Fonte: A autora, 2013.

Figura 72: Comportamento reológico das argamassas industrializadas (AI) mediante os valores de  $h$ , proporcionais à viscosidade, em função do tempo.

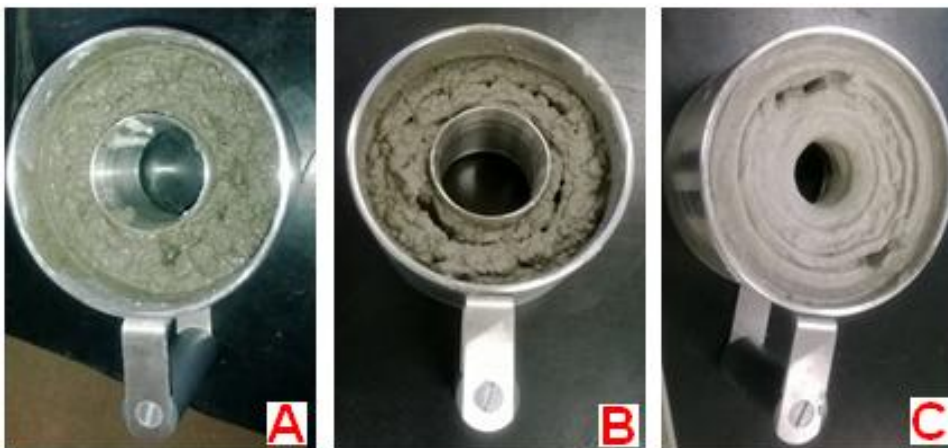


Fonte: A autora, 2013.

Nas argamassas industrializadas (Figura 72), observa-se que houve a diminuição acentuada nos valores de  $h$  (proporcionais à viscosidade), nos primeiros 15 minutos, após este período, continuou havendo um declínio, porém, mais suave, pois provavelmente, como as partículas já estavam organizadas após os minutos iniciais, os aditivos continuaram reagindo, como aconteceu com os valores de  $g$ , proporcionais à tensão de escoamento (ALVES, 2002).

A Figura 73 mostra como as argamassas se apresentaram após o ensaio por meio do reômetro. Como as argamassas contêm componentes diferentes, a aparência de cada uma apresentou características peculiares.

Figura 73: Argamassas após o ensaio de reologia, A) Argamassa simples; B) Argamassa mista; C) Argamassa industrializada.



Fonte: A autora, 2013.

#### **4.3.2 Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado endurecido**

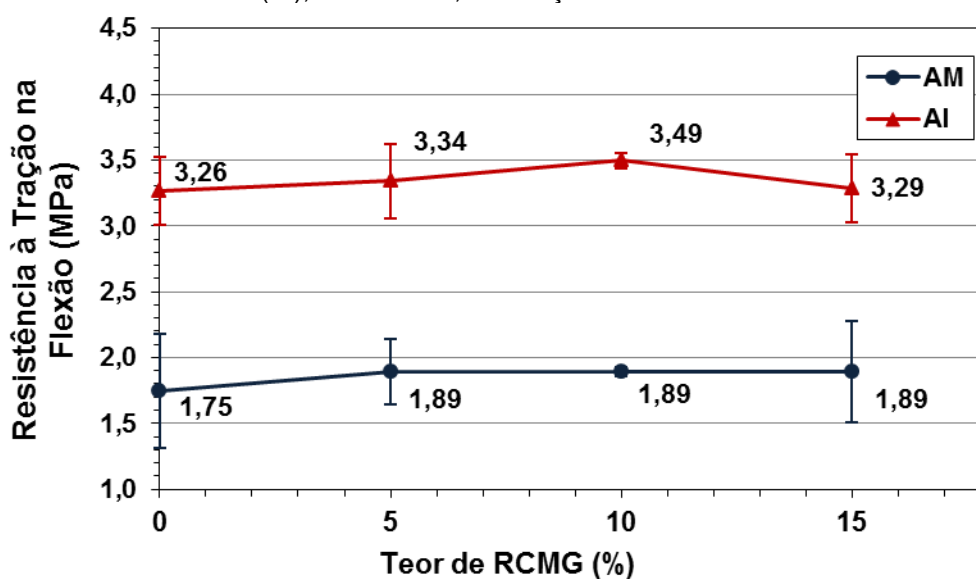
##### **4.3.2.1 Caracterização Mecânica das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI)**

Os ensaios mecânicos, de resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral das argamassas mistas e industrializadas foram realizados aos 28 dias.

O resultado de resistência à tração na flexão das argamassas mistas e industrializadas estão ilustrados na Figura 74, onde se observa que houve um aumento na resistência à tração na flexão em ambas as argamassas.

As argamassas mistas, com 5%, 10% e 15% de adição de RCMG, tiveram um aumento de 8% em relação a AM de referência (0% de RCMG). Nas argamassas industrializadas, a adição de 10% de RCMG obteve o maior aumento, de 7%, em relação a AI de referência. Isso evidencia que o RCMG melhora a resistência à tração devido ao efeito *filler*, pois, a elevada finura, aumentam-se os sítios de nucleação, acelerando a cinética das reações, proporcionando maior quantidade de produtos hidratados e melhorando a hidratação do cimento.

Figura 74: Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.



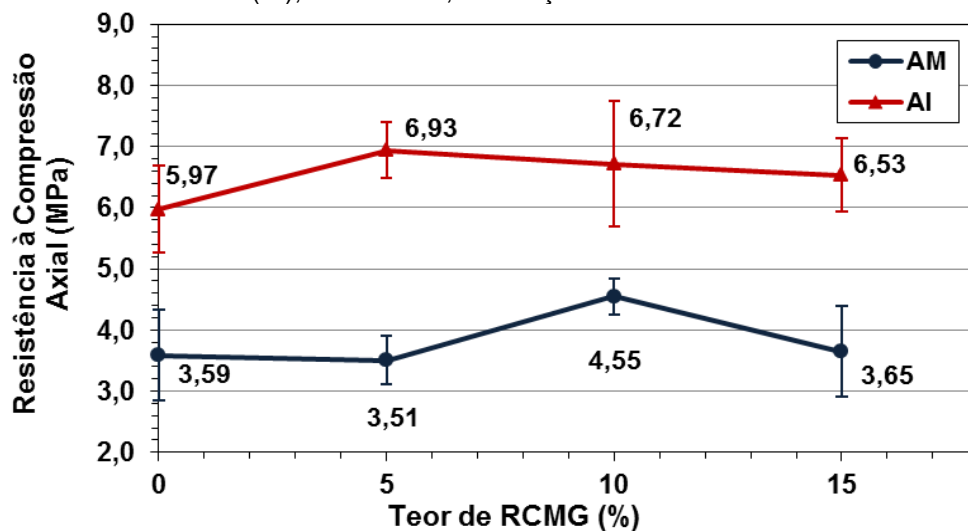
Fonte: A autora, 2013.

A Figura 75 ilustra os resultados de resistência à compressão axial, obtida aos 28 dias, pelas argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI).

No geral, observa-se que todas as argamassas que tiveram adição do RCMG apresentaram resultados superiores às respectivas argamassas de referência. A argamassa mista com 10% de RCMG obteve um aumento na resistência à compressão axial de 26,74% e a AI com 5% de RCMG, obteve um aumento de 16,08%. Isso mostra que, com o acréscimo do resíduo, ocorre

a melhora da resistência à tração na flexão e à compressão axial, pois, como verificado por diversos autores, partículas finas inertes atuam como pontos de nucleação, provocando a precipitação de produtos hidratados, ativando a hidratação do cimento. Este maior empacotamento das partículas faz com que a mistura se torne mais homogênea e compacta, fornecendo maior resistência (GONÇALVES, 2000; MORAES, 2001; SILVA & CAMPITELLI, 2006; KRSTULOVIĆ *et al.*, 1994; BENACHOUR *et al.*, 2008).

Figura 75: Resultados de resistência à compressão axial, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.



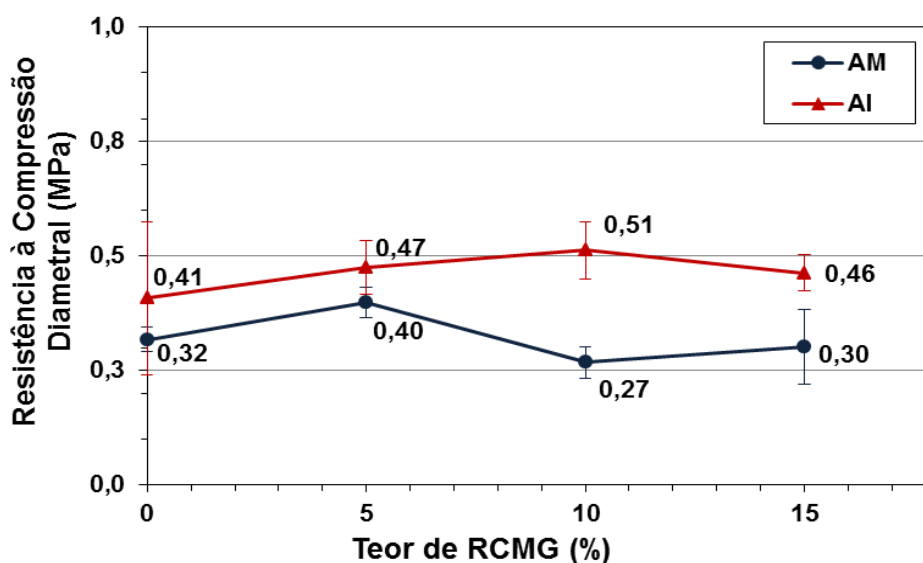
Fonte: A autora, 2013.

A Figura 76 ilustra os resultados de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI).

A argamassa mista (AM) apresentou melhoras, em torno de 25%, para o teor de 5% de RCMG e a argamassa industrializada (AI) teve este mesmo aumento na resistência para as argamassas contendo 10% de RCMG.

Gonçalves (2000) também verificou um aumento na resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova de concreto, contendo adição de 10% e 20% de resíduo de corte de granito (RCG). As amostras com 10% de RCG tiveram um aumento de 7,2%, enquanto que as amostras com 20% de RCG tiveram um decréscimo de 5,8%. Isso mostra que as partículas finas favorecem ao aumento da resistência à tração por compressão diametral.

Figura 76: Resultados de resistência à compressão diametral, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), aos 28 dias, em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

#### 4.3.2.2 Caracterização Física das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI)

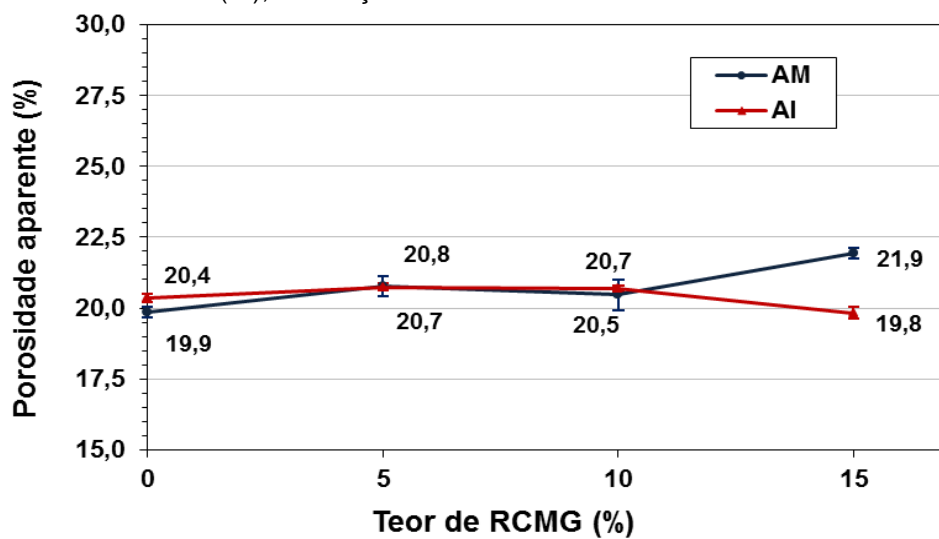
##### a) Índice de vazios, porosidade e densidade aparentes das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI)

A partir do índice de vazios e da massa específica é possível observar a evolução da porosidade e da densidade aparentes nas argamassas. Conforme o aumento da porosidade, a tendência é que ocorra a diminuição da densidade, pois existe grande quantidade de vazios. No entanto, isso não ocorreu com as argamassas mistas e nem com as argamassas industrializadas, como pode ser observado pelas Figuras 77 e 78, onde ilustram os resultados, realizados aos 28 dias, da porosidade e da densidade aparentes das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), respectivamente.

Nas argamassas mistas (AM), observa-se que, conforme foi se adicionando o RCMG, a porosidade aumentou de 4,5%, 5,5% e 10%, respectivamente, em relação à AM de referência (sem RCMG).

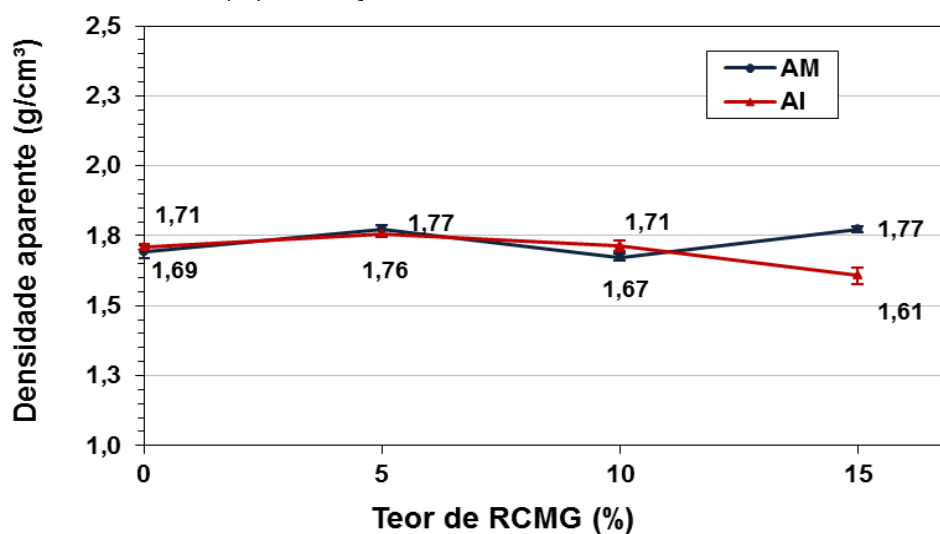
Nas argamassas industrializadas (AI), houve uma pequena oscilação na porosidade com relação a AI de referência, pois houve um aumento na porosidade, menor do que 2%, para os índices de 5% e 10% de adição de RCMG e um decréscimo, de 3%, nas AI com 15% de RCMG. Ou seja, pode-se observar que o RCMG não influenciou muito nos resultados de porosidade das argamassas industrializadas (AI).

Figura 77: Porosidade aparente das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Figura 78: Densidade aparente das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI) em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.



Quanto à densidade aparente (Figura 78), esta tem a tendência a aumentar, conforme há o acréscimo de RCMG, pois, as partículas finas preenchem os espaços vazios favorecendo o tamponamento dos poros. No entanto, esse resultado não foi observado nas argamassas mistas, que tiveram um aumento na densidade, de 4,7%, para os teores de 5% e 15% de RCMG e um decréscimo de 1,18% para o teor de 10% de RCMG.

Como as argamassas mistas tiveram a presença da cal e do aditivo incorporador de ar, esses componentes podem ter influenciado no aumento da porosidade, pois, nos estudos de Mattana & Costa (2012), ao compararem dois traços de argamassas com cal, 1:1:6 e 1:2:9 (cimento: cal: areia), por meio de microtomografia de raios-x (micro-CT), os autores observaram que a porosidade total da argamassa com maior teor de cal aumentou 71% em relação a argamassa com menos quantidade de cal. Em outro estudo, Silva & Campitelli (2006-a) também verificaram o aumento da porosidade em argamassas com cal. Além disso, outro fator que pode ter levado ao aumento da porosidade, foi o uso de aditivos incorporadores de ar, pois dependendo dos tipos de aditivos, esses podem introduzir bolhas de ar que variam de 40 e 320 $\mu$ m (CARASEK *et al.*, 2001) e com o acréscimo do RCMG, provavelmente houve a diminuição de bolhas maiores e o aumento das bolhas menores, refletindo no aumento da porosidade.

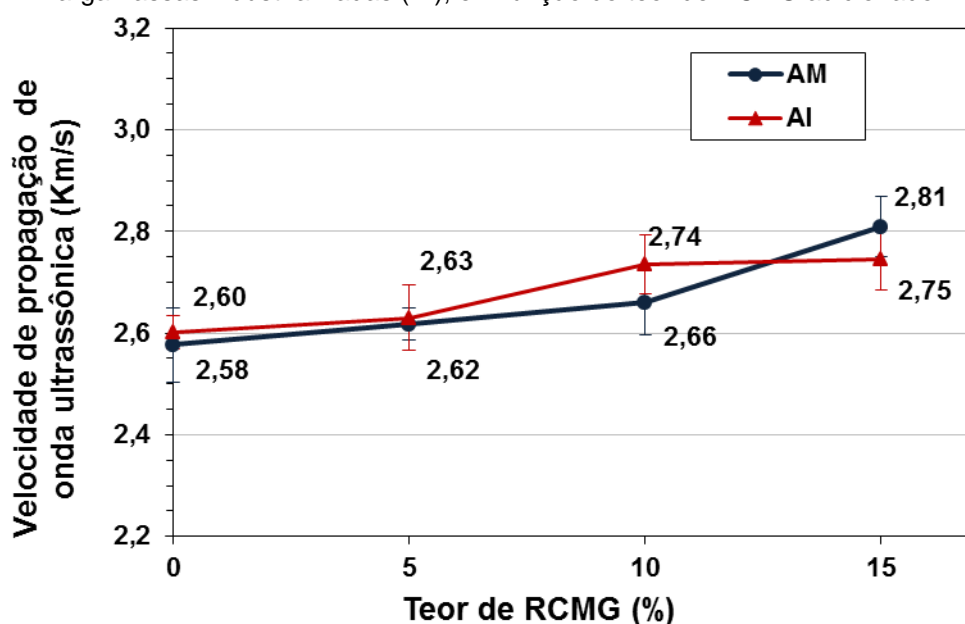
As argamassas industrializadas (AI) tiveram a presença de aditivos e de outros componentes, apresentando um comportamento parecido com as AM. Porém, com o acréscimo de 15% de RCMG, fez com que preenchesse maior parte dos poros, fazendo com que a porosidade diminuísse.

#### b) Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI).

Os resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e do módulo de elasticidade dinâmico, das argamassas mistas e industrializadas, estão ilustrados nas Figuras 79 e 80, respectivamente.

Observa-se que houve um aumento na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e no módulo de elasticidade, em ambas as argamassas, conforme houve o acréscimo de RCMG. Isso mostra a indicação da atuação do resíduo como *filler*, de preenchimento dos espaços vazios, melhorando o empacotamento das partículas, no entanto, esse resultado não se apresentou na densidade das AM com 10% de RCMG e nem nas AI com 15% de RCMG.

Figura 79: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.

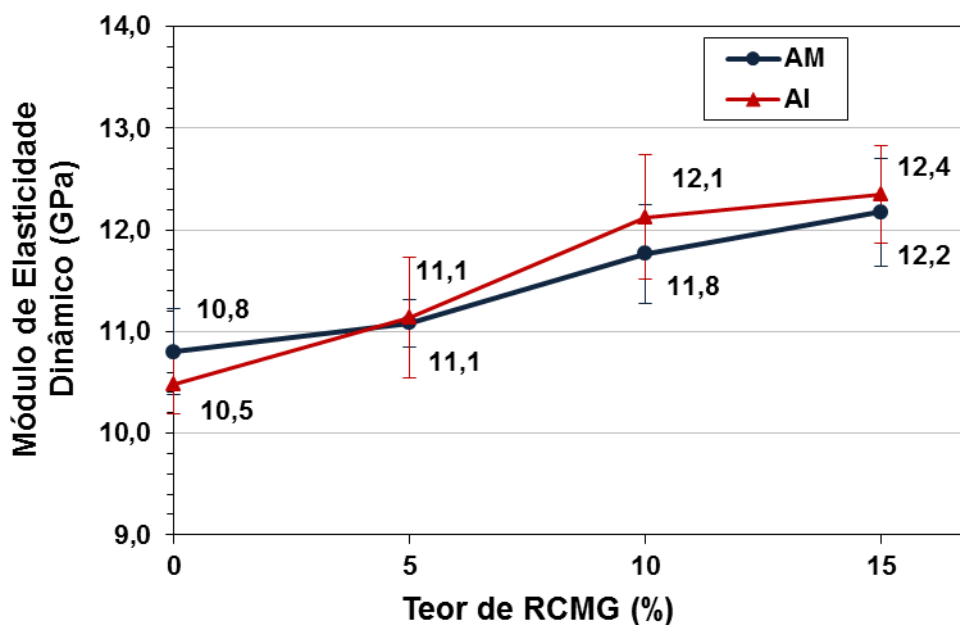


Fonte: A autora, 2013.

O aumento no módulo de elasticidade também foi observado por outros autores. Benachour *et al.* (2008) verificaram que a substituição de 15% de areia por *filler* de rocha calcária em argamassas, resultou em um aumento do módulo de elasticidade, também de 15%, no entanto, em proporções maiores de substituição (de 15% a 45%), o módulo de elasticidade diminuiu em 23%. Os autores concluíram que as adições de finos atuam como *filler*, acelerando a hidratação do cimento e distribuindo de forma mais homogênea os pequenos cristais de C-S-H, reforçando assim toda a estrutura das argamassas. Cruz *et al.* (2003) apud Reis & Tristão (2007) produziram argamassas com a substituição parcial da areia pelo resíduo de rochas ornamentais, em teores de 5% a 20% e foi constatado que o módulo de elasticidade das argamassas

aumentou para teores com até 15% de substituição, e acima disso, houve um decréscimo.

Figura 80: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

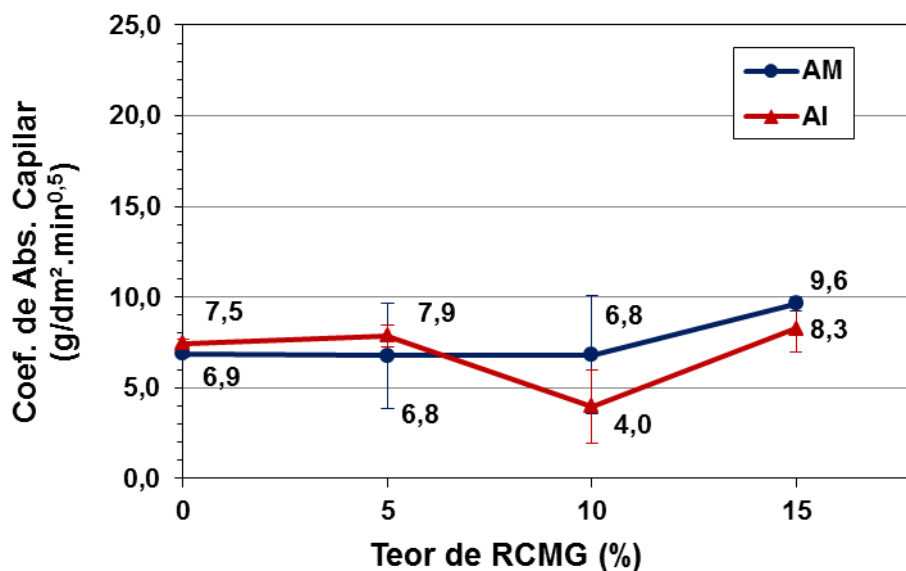
### c) Absorção de água por capilaridade das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI)

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade, realizado aos 28 dias, para as argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) podem ser observados na Figura 81. Observa-se que nas argamassas mistas, o coeficiente de absorção capilar permanece constante até 10% de RCMG e com 15% de RCMG, a absorvidade aumentou. Nas argamassas industrializadas, o comportamento foi quase o mesmo, no entanto, houve uma diminuição na absorvidade para os teores com 10% de RCMG.

Com o acréscimo de RCMG, esse tende a preencher os espaços vazios, diminuindo o diâmetro dos poros, aumentando assim, a absorção capilar. Este efeito também foi verificado por Benachour *et al.*, (2008), que mediante a análise de porosimetria por intrusão de mercúrio puderam observar que, com o

enchimento de partículas finas nas argamassas, houve a diminuição do tamanho dos poros, passando a ter mais poros com diâmetros menores que  $0,1\mu\text{m}$ , aumentando assim a absorção por capilaridade. Esta medida é bem aproximada à granulometria do RCMG. Silva (2006) afirma que a Lei de Jurin relaciona a altura da penetração da água nos capilares da argamassa ao inverso dos raios dos capilares, ou seja, quanto menor os raios capilares, maior a ascensão da água nos corpos de prova.

Figura 81: Coeficiente de absorção capilar das argamassas mistas (AM) e argamassas industrializadas (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

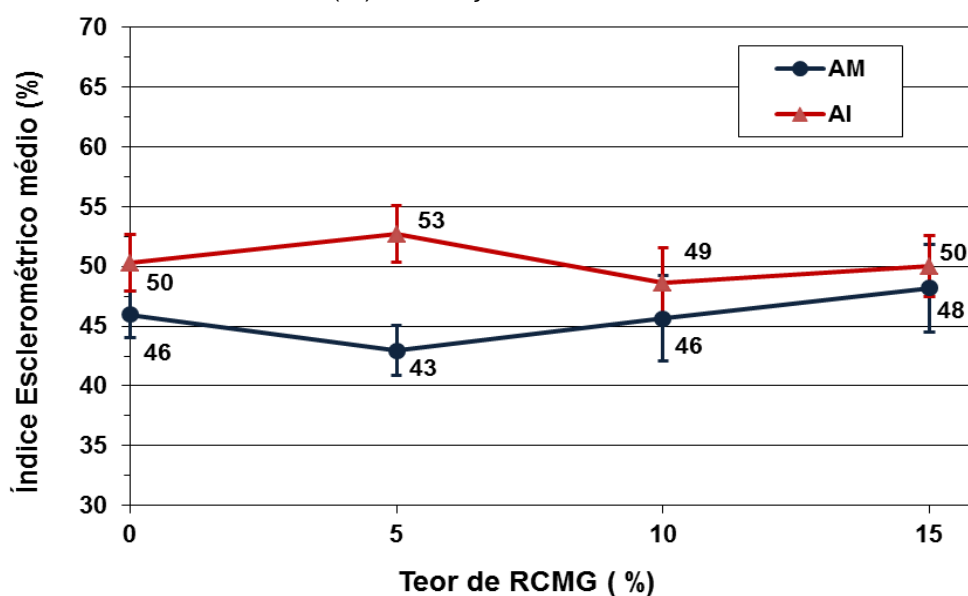
#### 4.3.3 Caracterização das argamassas mistas e industrializadas (AM e AI) no estado aplicado

Assim como a argamassa simples, as argamassas de revestimento (AM e AI) foram aplicadas em camada única sobre painéis constituídos por blocos cerâmicos e chapisco, sendo avaliadas aos 28 dias.

#### 4.3.3.1 Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI)

Os resultados apresentados pelo índice esclerométrico das AM e AI estão ilustrados na Figura 82.

Figura 82: Índice esclerométrico médio, aos 28 dias, da argamassa mista (AM) e argamassa industrializada (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Nas argamassas mistas, o índice esclerométrico (IE) teve pouca variação em relação à referência, pois reduziu em 6,52% para a adição de 5% de RCMG, permaneceu o mesmo valor para as argamassas com 10% de RCMG e aumentou para o teor de 15% de RCMG em 4,34%, mostrando que com maior quantidade de RCMG, tende a melhorar o empacotamento das partículas, refletindo na resistência, o que pode ser observado na resistência de compressão axial, onde os teores de 10% e 15% tiveram os maiores resultados (Fig.75), assim como foram crescentes, a velocidade de onda ultrassônica e o módulo de elasticidade, conforme se adicionava o RCMG (Fig. 79 e 80, respectivamente).

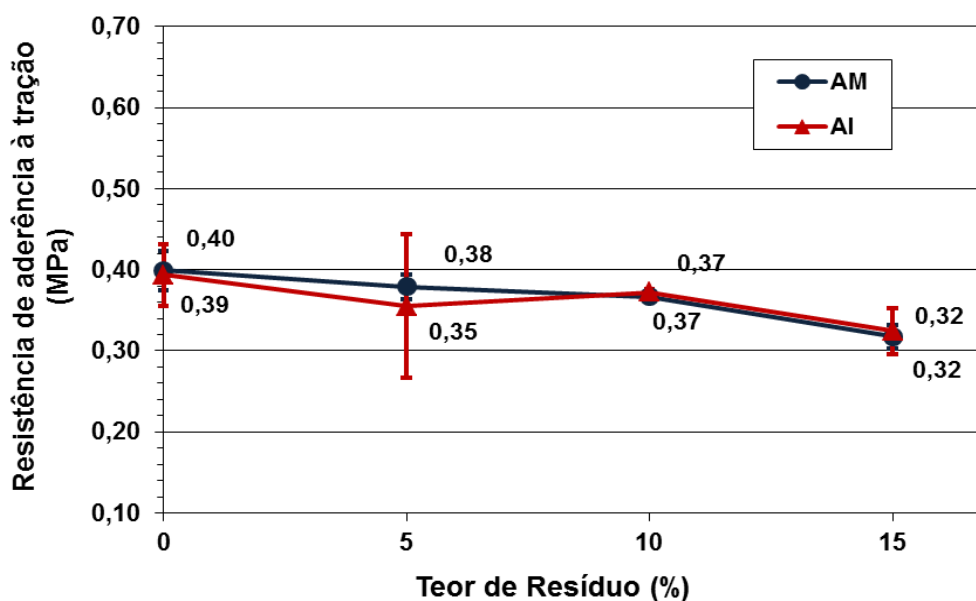
Os resultados das argamassas industrializadas mostraram um aumento no IE com a adição de 5% de RCMG e para os teores de 10% e 15% de RCMG houve uma redução, chegando ao mesmo patamar da AI de referência. Isso

mostra que, provavelmente a AI já possui maior quantidade de finos em sua constituição e com o acréscimo do RCMG, passa a ter uma quantidade de finos em excesso, prejudicando a resistência. Isso pode ser percebido também quanto à resistência à compressão axial (Fig.75), que obteve uma melhora com acréscimo de 10% de RCMG e depois diminuiu, indicando que com 15% de RCMG ocorre a redução no comportamento das argamassas.

#### 4.3.3.2 Resistência de aderência à tração das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI)

Os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração das AM e AI estão apresentados na figura 83, onde se observa que as argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) tiveram um comportamento bem parecido entre si e que a resistência de aderência à tração foi diminuindo, no entanto não prejudicaram o desempenho, pois todas as argamassas apresentaram valores de resistência de aderência à tração superiores ao especificado pela NBR 13749/1996, que estabelece o mínimo de 0,3 MPa.

Figura 83: Resistência de aderência à tração, aos 28 dias, das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), em função do RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

Carasek *et al.* (2001), afirmam que os aditivos incorporadores de ar aumentam a retenção de água e reduzem a exsudação, e por conta disso, muitas vezes é empregado como substitutivo da cal. No entanto, Jonh (1993) apud Carasek *et al.* (2001), verificou que os aditivos incorporadores de ar reduzem a resistência de aderência das argamassas, principalmente naquelas que possuem baixos teores de cimento, pois, além de diminuir a quantidade do aglomerante principal da mistura, as bolhas de ar reduzem a superfície de contato na interface entre a argamassa e o substrato.

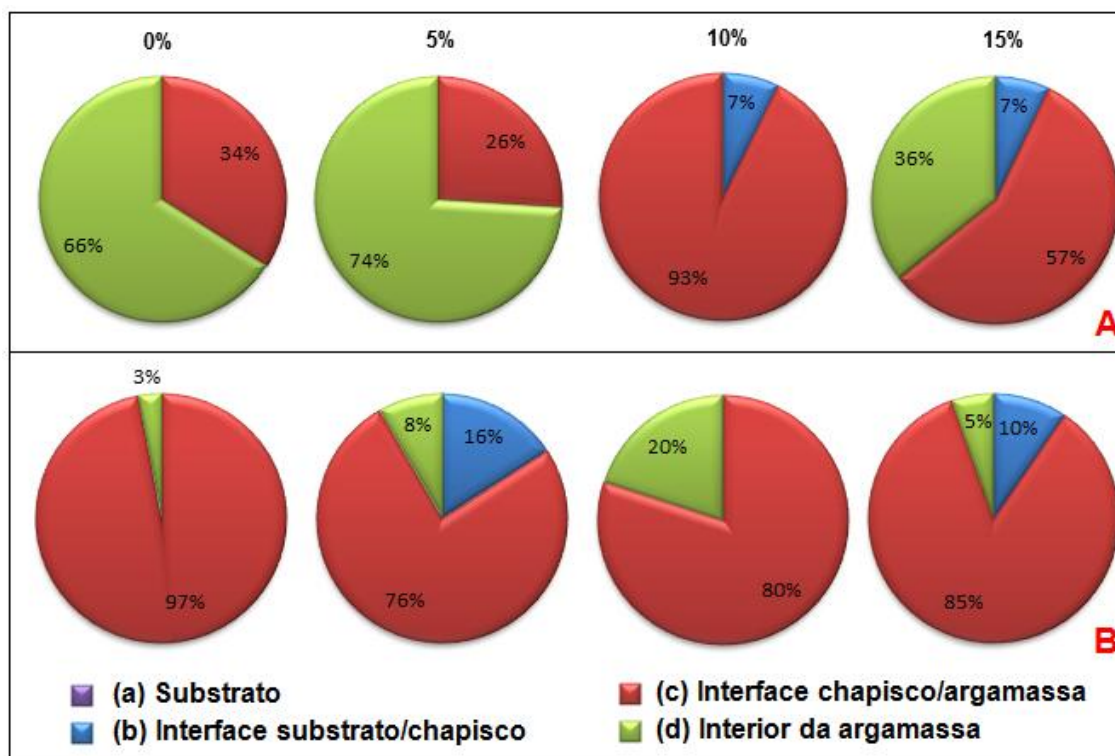
Oppermann & Rudert (1983) apud Carasek *et al.* (2001), afirmam que o mais importante para não prejudicar a aderência, é o tamanho das bolhas de ar existente na mistura, pois as bolhas menores de 100µm podem agir como plastificantes na argamassa fresca, sem prejudicar a aderência.

Para complementar os estudos de aderência é necessário avaliar as formas de ruptura dos corpos de prova retirados do painel. De acordo com a NBR 13528:2010 foram apresentadas quatro formas de ruptura, nas argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI), as mesmas ocorridas com as argamassas simples: rupturas no substrato (a), rupturas na interface substrato/chapisco (b), rupturas na interface chapisco/argamassa (c) rupturas no interior das argamassas (d), que podem ser observadas pela Figura 84.

Observa-se que a maioria das argamassas mistas, Figura 84A, apresentaram muitas rupturas em seu interior, com exceção da AM com 10% de RCMG, que apresentou resultados bem superiores.

Nas argamassas industrializadas, Figura 84B, a ruptura do tipo (c), na interface chapisco/argamassa prevaleceu, contudo observa-se melhora na coesão da mistura nas argamassas com 5% de RCMG, devido ao aumento da ruptura do tipo (b), na interface substrato/chapisco. Pode ser que as rupturas ocorridas nas argamassas industrializadas foram por falta de coesão das argamassas nas paredes formadas entre as bolhas de ar, devido à presença dos aditivos incorporadores de ar. Segundo Carasek (1996), as paredes das bolhas possuem espessura média de 20 e 50µm, enquanto que o diâmetro das bolhas varia entre 40 e 320µm.

Figura 84: Incidência das formas de ruptura observadas após o ensaio de resistência de aderência à tração, em função dos teores de RCMG adicionados às argamassas mistas (A) e industrializadas (B).



Fonte: A autora, 2013.

#### 4.3.3.3 Absorção de água sob baixa pressão (RILEM) nas argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI)

Os resultados do índice de absorção de água das argamassas mistas (AM) e industrializadas (AI) estão ilustrados na Figura 85.

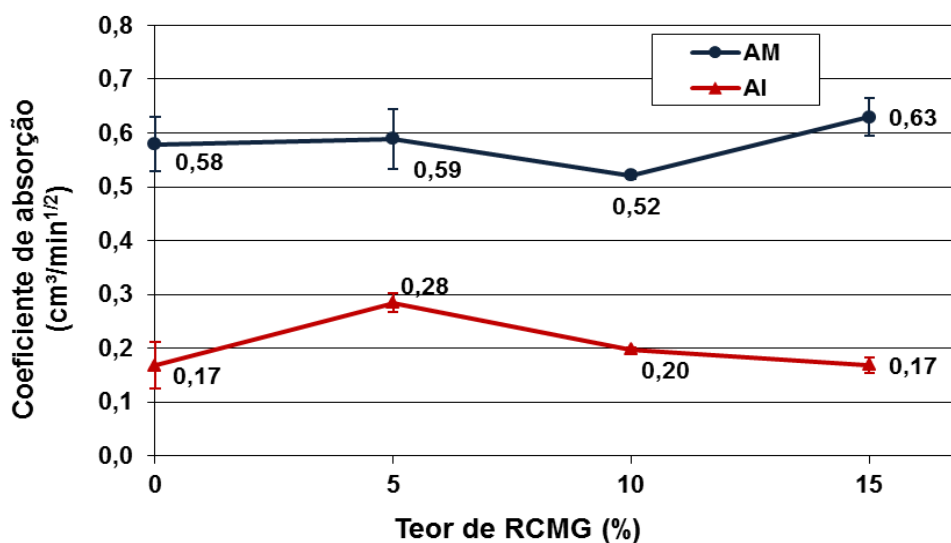
Observa-se que as argamassas mistas (AM) apresentaram os índices mais altos de absorção de água, principalmente a AM com 10% de RCMG. As argamassas industrializadas (AI) tiveram um aumento mais expressivo na absorção com 5% de RCMG e as argamassas simples obtiveram os melhores resultados. A cal e os aditivos incorporadores de ar foram utilizados com o intuito de melhorar a plasticidade e a aderência das argamassas, no entanto, observa-se que essas propriedades, no estado endurecido, apresentaram maior absorção de água, pois o aumento do teor de ar nas argamassas pode ter reduzido os pontos de contato na interface argamassa/chapisco, diminuindo



a resistência de aderência (Figura 83) e aumentando a absorção de água, principalmente pelas argamassas mistas.

Contudo, Silva (2006-a) considera este ensaio muito sensível e recomenda que sejam realizados em maior quantidade, para que haja maior representatividade dos resultados.

Figura 85: Coeficiente de absorção, aos 28 dias, da argamassa mista (AM) e argamassa industrializada (AI), em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

#### 4.4 Avaliação da Durabilidade das Argamassas

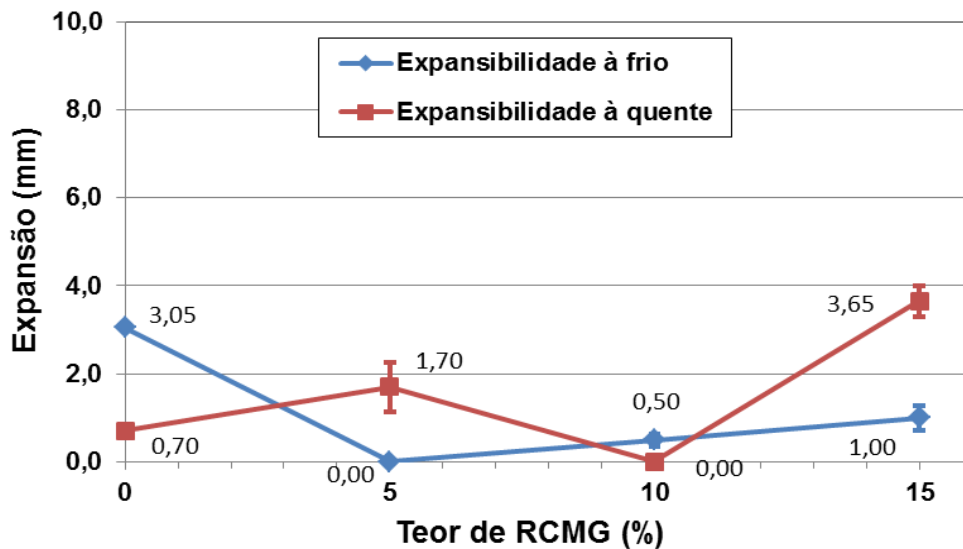
Os ensaios referentes à durabilidade das argamassas são importantes para a obtenção de parâmetros, a fim de se preservar a qualidade dessas ao longo do tempo. Mediante essas estimativas é possível estabelecer critérios para evitar ou minimizar patologias nas construções.

##### 4.4.1 Expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier (NBR 11582:2012)

Os ensaios de expansibilidade foram realizados com o intuito de verificar se o RCMG possui compostos expansivos que possam prejudicar o

comportamento das argamassas, principalmente a quantidade de óxido de magnésio (MgO), determinado pela expansibilidade a frio e de óxido de cálcio (CaO) representado pela expansibilidade a quente (RIBEIRO *et al.*, 2012). O ensaio foi realizado acrescentando-se o RCMG à pasta de cimento e os resultados do ensaio podem ser observados pela Figura 86.

Figura 86: Resultados de expansibilidade a frio e a quente, em função do teor de RCMG adicionado.



Fonte: A autora, 2013.

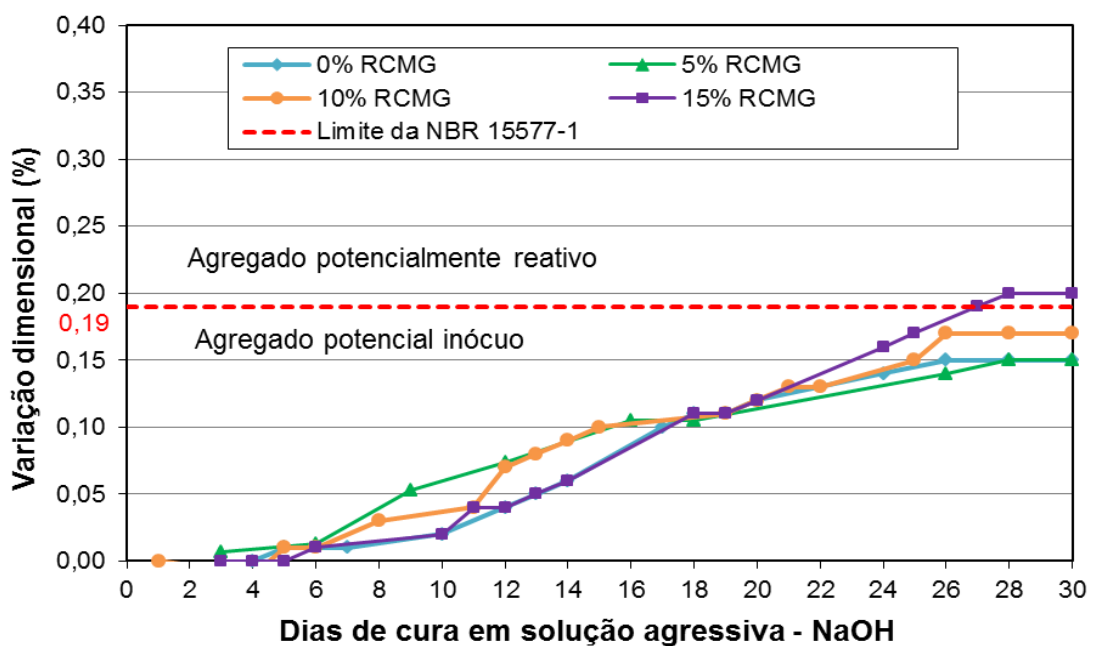
Todas as expansibilidades ocorridas com o RCMG foram dentro do permitido pela norma de cimento Portland, NBR 5732:1991, que deve apresentar no máximo 5 mm de expansão.

Observa-se que a expansibilidade a quente, referente ao CaO, foi mais representativa comparada a expansibilidade a frio (MgO), o que é natural visto que a quantidade de CaO presente no RCMG (17,7%) é mais do que o dobro do MgO (8,21%). Vale ressaltar que a adição de 15% de RCMG houve uma expansão considerável à quente, sendo esta, a mais expressivas de todas, apresentando semelhanças com os ensaios de RAA, descritos à seguir.

#### 4.4.2 Avaliação das Reações Álcali-Agregado (RAA)

Os resultados de RAA, prescritos pela NBR 15577-1 (Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto) estão apresentados na Figura 87.

Figura 87: Variação dimensional do RCMG ao longo do tempo em solução agressiva de NaOH.



Fonte: A autora, 2013.

O ensaio de RAA é uma ferramenta valiosa para complementar as análises de expansibilidades de agregados, sendo mais precisa do que as agulhas de Le Chatelier. A partir dos resultados é possível saber o grau de reatividade do agregado, se este é potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

Observa-se que, quando se acrescentou 15% de RCMG na argamassa realizada com cimento padrão, ocorreu expansão igual a 0,19% no 26º dia, classificando-se esta adição como potencialmente reativa, provavelmente devido à presença dos silicatos (reações álcali-silicatos) que reagem tardiamente, visto o RCMG apresentou 37,6% de SiO<sub>2</sub> e, de acordo com a DRX, realizada no mesmo, ocorreu a presença de flogopita (classe dos

filossilicatos), existente no granito, que representa um dos silicatos reativos (NBR 15577-1:2008).

Nogueira (2010) afirma que as fissuras no concreto ocorrem quando a pressão exercida em determinado local pela reação expansiva excede a resistência à tração da partícula de agregado ou da pasta de cimento e a velocidade de expansão varia de acordo com os minerais envolvidos na RAA, ou seja, de acordo com o tipo de reação (álcali-sílica, álcali-silicato ou álcali-carbonato).

Outro tipo de reação que pode ter ocorrido foi a álcali-carbonato (RAC), um tipo de RAA, onde participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos, como é o caso da dolomita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , presente no RCMG originária dos mármore. Vale ressaltar que a maior expansibilidade ocorrida pelas agulhas de Le Chatelier foi a quente, indicando a presença de CaO. Contudo é apenas um indicativo, já que não foram realizados ensaios complementares, como análise petrográfica do RCMG.

A reação álcali-carbonato faz com que ocorra a desdolomitização da rocha e conseqüentemente acarrete no enfraquecimento da ligação pasta-agregado. A desdolomitização não cria um gel expansivo, mas forma compostos cristalinos que expandem, como carbonatos alcalinos, carbonato cálcico, brucita e silicato magnesiano. Como essa reação regenera os compostos cristalinos, a desdolomitização será contínua até que a dolomita tenha reagido por completo ou até que a fonte de álcalis tenha se esgotado (NBR 15577-1: 2008, SABBAG, 2003). Por isso, Hasparyk (1999) apud Sabbag (2003) acredita que o tempo não é um fator determinante para a ocorrência do fenômeno de RAA, pois as expansões ocorrem enquanto os minerais reativos do agregado estão sendo consumidos.

#### **4.5 Considerações finais**

Após a análise dos resultados das argamassas nos estados fresco, endurecido e aplicado, é apresentada uma Tabela resumo, onde estão

marcados apenas os melhores resultados encontrados, servindo apenas como parâmetro, pois, não se pode somá-los porque a avaliação completa depende dos outros teores de adição e da correlação com outros resultados, nem como compará-los, porque as argamassas são diferentes. Além disso, alguns ensaios serviram apenas para verificar a possibilidade de uso do RCMG, como é o caso do ensaio de RAA, que o acréscimo de 15% de RCMG não é recomendado para uso.

Tabela 8: Resumo dos melhores resultados encontrados em cada tipo de argamassa e (AS, AM, AI), respectivamente, simples, mista e industrializada.

Propriedades	AS (%) de RCMG				AM (%) de RCMG				AI (%) de RCMG			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
<b>Estado fresco</b>												
Maior retenção de água	X	X					X					X
Menor teor de ar incorporado		X		X	X				X			
Maior densidade de massa				X				X			X	X
Menor índice de consistência ( <i>flowtable</i> )				X				X				X
Maior plasticidade pelo <i>Squeeze-flow</i>			X		X				X			
Menor tensão de escoamento (reômetro)		X			X				X			
Menor viscosidade (reômetro)			X			X			X			
<b>Estado Endurecido</b>												
Maior resistência à tração na flexão (28 dias)		X				X	X	X				X
Maior resistência à compressão axial (28 dias)		X					X			X		
Maior resistência à compressão diametral (28 dias)				X		X					X	
Menor porosidade aparente				X	X							
Maior densidade aparente				X				X		X		
Maior veloc. de propág. de ondas ultrassônicas				X				X				X
Maior módulo de elasticidade dinâmico				X				X				X
Menor coefic. de absorção de água por capilaridade	X				X		X				X	
<b>Durabilidade</b>												
Menor expansibilidade à frio		X			-	-	-	-	-	-	-	-
Menor expansibilidade à quente			X		-	-	-	-	-	-	-	-
Menor reatividade álcali-agregado (RAA)	X	X			-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Estado Aplicado</b>												
Maior índice esclerométrico			X					X		X		
Maior resistência de aderência à tração				X	X				X			
Maior resistência à rupturas		X					X			X		
Menor coef. de absorção de água sob baixa pressão			X				X		X			X

Fonte: A autora, 2013.



## 5 CONCLUSÕES

Após a grande quantidade de avaliações realizadas em argamassas com adição de RCMG, nos teores de 5%,10%,15%, no estado fresco, endurecido e aplicado, para as condições experimentais adotadas nesta pesquisa, pode-se concluir que:

a) O RCMG é considerado um *filler* que possui elevada finura, e por conta disso, possui um efeito físico de tamponamento dos poros e de complemento da granulometria, atuando como pontos de nucleação que refletem no aumento da resistência mecânica, do módulo de elasticidade e da velocidade do pulso ultrassônico.

b) Adições de 15% de RCMG devem ser evitadas, pois nessas condições o RCMG provocará expansões nas argamassas, por ser considerado potencialmente reativo, comprometendo toda a estrutura. Sempre que for utilizar o RCMG em argamassas, deve-se fazer a análise completa de suas características, pois existe uma variação entre os minerais devido à composição natural das rochas a ao próprio processo de beneficiamento.

c) No estado fresco, as argamassas com RCMG apresentaram maior coesão e consistência. Para a argamassa simples (AS), a plasticidade foi melhorada até certo ponto, depois decresceu devido ao excesso de RCMG provocando pontos de aglomeração, dificultando a trabalhabilidade da mistura. Nas demais argamassas, argamassas industrializadas (AI) e argamassas mistas (AM) não foram observadas melhora nessa propriedade. Durante esta fase, o ponto ótimo de acréscimo de RCMG a ser acrescentado nas AS é de 10% de RCMG e nas AM e AI é de 5% de RCMG.

d) No estado endurecido, com relação às resistências mecânicas, o RCMG proporcionou maior resistência em todas as argamassas, comparado às

respectivas referências, portanto os melhores teores de adição para as AS foi de 5% de RCMG e para as AM e AI foi o teor de 10% de RCMG.

e) No estado aplicado, o RCMG também fez com todas as argamassas estudadas fossem melhores do que as respectivas referências, apresentando como resultado final, o melhor teor de adição para as AS e AM é de 10% de RCMG e o melhor teor de adição para as AI é de 5% de RCMG.

f) Entre todas as etapas analisadas pode-se dizer que os melhores teores de adição para as AS e AM é de 10% de RCMG e para a AI o melhor teor é o de 5% de RCMG. Portanto, o RCMG é uma alternativa viável economicamente, pois reduz os custos das matérias primas e ainda melhora a qualidade das argamassas, além de minimizar a quantidade de resíduos de rochas ornamentais gerados no planeta, contribuindo assim, com a sustentabilidade.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de contribuir com esta pesquisa e dar continuidade aos estudos relacionados ao RCMG, alguns estudos podem ser realizados para promover maior confiabilidade à pesquisa, servindo para explicar melhor os fenômenos e garantir mais eficácia durante a utilização do RCMG, podendo ser:

a) Caracterização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) para o uso em matrizes cimentícias utilizando difração de raios X (DRX), análise química, análise petrográfica por microscopia ótica, coloração seletiva de minerais, análise termodiferencial (ATD), espectroscopia de infravermelho, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de raios X por energia dispersiva (EDX);

b) Avaliação de painéis de revestimentos utilizando o resíduo de corte de mármore e granito por meio do pulso ultrassônico, como alternativa viável e confiável;

c) Logística de reaproveitamento e separação de resíduos de rochas ornamentais nas pedreiras, para o uso em argamassas industrializadas;

d) Análise do ciclo de vida de rochas ornamentais para fins industriais.



## 7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: BAUER, L. A. F. (Coord.). **Materiais de Construção I**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1994. cap.4.

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002, 198p. Dissertação (Engenharia Civil) Universidade de Brasília, UnB., 2002.

ALVES, N.J.D.; DO Ó, S.W. Aditivos incorporadores de ar e retentores de água. In: **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB, Sinduscon, 2005.

ARUNTAŞ, H.; GÜRÜ, M.; DAYI. M.; TEKIN, I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials and Design**, v.31, p.4039-4042, 2010.

ALYAMAÇ, K. E.; INCE, R.; A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction and Building Materials**, v 23, p.1201-2010, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Divisão de Tecnologia do cimento. Departamento de Físico-química. **Curso de microscopia de clínquer de cimento Portland**. São Paulo, 1984. 86p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. (ABIROCHAS). **Situação mundial e posição brasileira no setor de rochas ornamentais em 2008**. Disponível em: <[http://www.ivolution.com.br/news/upload\\_pdf/6661/Situacao\\_Mundial2008.pdf](http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/6661/Situacao_Mundial2008.pdf)>. Acesso em mar. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR NM 45: 2006 Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

\_\_\_\_\_ NBR NM 248: 2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.

\_\_\_\_\_ NBR 5732:1991 Cimento Portland comum.

\_\_\_\_\_ NBR 7175: 2003 - Cal hidratada para argamassas – Requisitos.

\_\_\_\_\_ NBR 7200: 1998 - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento.

\_\_\_\_\_ NBR 7211: 2009 - Agregados para concreto – Especificação.

\_\_\_\_\_ NBR 7215: 1997 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

\_\_\_\_\_ NBR 7222: 2011 - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

\_\_\_\_\_ NBR 7584: 1995 - Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.

\_\_\_\_\_ NBR 8802: 2013 - Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

\_\_\_\_\_ NBR 8522:2008 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

\_\_\_\_\_ NBR 9779: 2012 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

\_\_\_\_\_ NBR 9778: 2009 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

\_\_\_\_\_ NBR 10004: 2004 - Resíduos sólidos: classificação.

\_\_\_\_\_ NBR 10005: 2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.

\_\_\_\_\_ NBR 10006: 2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

\_\_\_\_\_ NBR 11582: 2012 - Cimento Portland -Determinação da expansibilidade Le Chatelier.

\_\_\_\_\_ NBR 11768: 2011 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.

\_\_\_\_\_ NBR 12653: 2012 - Materiais pozolânicos – Requisitos.

\_\_\_\_\_ NBR 13276: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

\_\_\_\_\_ NBR 13277: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.

\_\_\_\_\_ NBR 13278: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

\_\_\_\_\_ NBR 13279: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

\_\_\_\_\_ NBR 13281: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.

\_\_\_\_\_ NBR 13528: 2010 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.

\_\_\_\_\_ NBR 13529:1995 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas.

\_\_\_\_\_ NBR 15630: 2009 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

\_\_\_\_\_ NBR 13749: 1996 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.

\_\_\_\_\_ NBR 15577:2008 - Agregados – Reatividade álcali-agregado.

\_\_\_\_\_ NBR 15839: 2010 - Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*.

ARNOLD, D. C. M.; KAZMIERCZAK, C. S. **Influência da distribuição granulométrica do agregado miúdo e do teor de fíler nas propriedades de argamassas com areia de britagem**. VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – VIII SBTA, 2009.

BANFILL, P.; F.; G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. **11th International Cement Chemistry Congress**, Durban, South Africa, 2003.

BASTOS, P.K.X.; COUTO, M.L. **Influência de condições de produção de argamassa em obra na classificação segundo a NBR 13281**. VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – VII SBTA, 2007.

BASTOS, P. K. X.; NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Ensaio de retração de argamassas nos estados fresco e endurecido – Contribuição para a normalização brasileira. In: 1º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2005, Lisboa. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <[http://www.apfac.pt/congresso\\_2005/comunicacoes/Paper%2048.pdf](http://www.apfac.pt/congresso_2005/comunicacoes/Paper%2048.pdf)>. Acesso em jul. 2013.

BARBHUIYA, S.A.; GBAGBO, J.K.; RUSSELL, M.I.; BASHEER, P.A.M. Properties of Fly Ash Concrete Modified With Hydrated Lime and Silica Fume. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3233-3239, 2009.

BARNES, H. A. Thixotropy - a review. **Journal Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 70, p. 1-33, 1997.

BAUER, E. **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB, Sinduscon, 2005.

BAUER, E. ; PEREIRA, C. H. A. F.; SILVA, L. S. P. **Contribuição das partículas finas para a modificação dos parâmetros reológicos em argamassas**. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – X SBTA, 2013.

BAUER, E.; SOUSA, J. G.G. Materiais constituintes e suas funções. In: **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB, Sinduscon, 2005.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção 1**. 5° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

BENACHOUR, Y., DAVY, C.A., SKOCZYLAS, F., HOUARI H. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 727–736, 2008.

BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. **Scientific Research and Essays**, v. 2, n°9, p. 372-379, 2007.

BINICI, H.; SHAH, T.; AKSOGAN, O.; KAPLAN, H. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. **Journal of Materials Processing Technology** , v. 208, p. 299–308, 2008.

BILGIN, N., YEPREM, H.A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARŞOĞLU, M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 449–457, 2012.

BONAVETTI, V.L.; IRASSAR, E.F. The effect of stone dust content in sand. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n . 3, p. 580-590, 1994.

BOUASKER, M.; MOUNANGA, P.; TURCRY, P.; LOUKILI, A.; KHELIDJ; A. Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. **Cement & Concrete Composites**, v. 30 p. 13–22, 2008.

BRASIL. Portaria n°222, de 23 de junho de 2008. PLANO NACIONAL DE AGREGADOS MINERAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL (PNACC). **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Brasília, DF, 2008.

CALLISTER, Jr., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 7°ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2008.

CAMARINI, Gladis; ISHIKAWA, Paulo Hidemitsu. Propriedade de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO X, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ENTAC, 2004.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: **IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas – IV SBTA**, Brasília, 2001, p.43-60.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. 285p. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-USP, 1996.

CARASEK, H. Argamassas. In: **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. G. C. Isaia. - São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. cap.26, p.863-903.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F. G. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p.79 - 87, 2014.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 748–753, 2009.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de *Squeeze-flow*. **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas - VI SBTA**, Florianópolis, 2005, p. 121-143.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2009. 158p.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 1999. 213p.

CARVALHO, A. L. **Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose**. 2006, 142p. Dissertação (Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, UFBA, 2006.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Controle de produção de argamassas industrializadas em obra empregando o método de penetração do cone**, 2007.

CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L.; PANDOLFELLI V. C. Avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro. **Revista Ibracon de Estrutura e Materiais**, v. 2, nº4, p. 282 – 305, 2009.

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica** v.55, p.18-32, 2009.

CHIODI FILHO, C. **Situação e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais e de revestimento**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS E VI SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. 2007, Natal. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 16-40.

CINCOTTO, M.A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO: Características, propriedades e métodos de ensaio**. Boletim 68. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas –IPT, 1995.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais** – v 1. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 695-726.

COPELAND, L. E., KANTRO, D. L., VERBECK G. **Chemistry of Hydration of Portland Cement**. Monograph 43, Vol. I, Session N, Paper IV-3, 429-465, 1960.

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

COURARD, L. & MICHEL, F. Limestone fillers cement based composites: Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties. **Construction and Building Materials**, v.51, p. 439–445, 2014.

COSTA, Milton. Entenda o que é a tixotropia. In: **Jornal do Conselho Regional de Química IV** – São Paulo: 2006, Ano 15, nº 81 p. 10-11.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v.1, p. 261-310.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1

DECORAMA Mármore e Granitos. In: **Serraria Santa Cecília**, Nazaré Paulista - SP, 2007. Disponível em:< <http://www.decorama.com.br> > Acesso em jul.2013



DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade. **Cerâmica**. v. 57, p. 491-498, 2011.

DORAISWAMY, D. The origins of rheology: a short historical excursion. **Rheology Bulletin**, v.71, nº1, p.1-9, 2002.

DUJAB, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre**. Porto Alegre, 2000. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2000.

ERGÜN, Ali. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 806-812, 2011.

FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DE SÃO PAULO (FECOMERCIO). **Sustentabilidade não é só sobre desmatamento e emissão de poluentes**. Disponível em: <<http://www.fecomercio.com.br/?option=comeventos&view=interna&Itemid=20&id=3363>> Acesso em jul 2012.

FERREIRA, Osny; ROSSIGNOLO, João Adriano; CARAM, Rosana. **Materiais de Construção I (aglomerantes minerais, agregados, argamassas, concretos e dosagem)**. São Carlos, São Paulo, 2008.

FONSECA, G.C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 106p. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2010.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. Rio de Janeiro, 2005. 285p. Tese de doutorado – Programa de pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE - UFRJ, 2005.

FREDRICKSON, A. G. **Principles and Applications of Rheology**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1964.

FREIRE, L. C., QUEIROZ, J. P. C., CARANASSIOS, A. **Utilização de resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos paisagísticos**. XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2009.

GIMENEZ, Alexander, M. S. **Avaliação no comportamento de ondas ultrassônicas no monumento às bandeiras**. São Paulo, 2012. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) Universidade de São Paulo – USP, 2012.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D.; **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994.

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

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Rio de Janeiro, 2005. 292p. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2005.

GRIGOLI, A. S.; HELENE, P. **Comportamento das adições minerais inertes em poros e zona de transição em concretos**. In: II Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá. Maringá, v. 1. p. 02-08, 2001.

GUIMARÃES, J.E.P., GOMES, R.D., SEABRA, M.A. **Guia das argamassas nas construções, construindo para sempre com cal hidratada**. 8ª ed. Associação Brasileira dos produtores de cal, 2004.

GUTTERIDGE, W. A.; DALZIEL, J. A. Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement, Part I. A fine non-hydraulic filler. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.778-782, 1990.

HAGGAR, Salad M. El. Sustainable Industrial Design and Waste Management. In: **Cradle-to-cradle for Sustainable Development**. Chapter 10, p.346-350, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; KRANE, K. S. **Física 2.**, 5ª Ed., Editora LTC, 2003.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.1, p. 357-380, 2011.

HERNANDEZ, M.G.; ANAYA, J.J.; ULLATE, L.G.; CEGARRA, M.; SANCHEZ, T. Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound. **Cement and Concrete Research**, v.36, p. 617–624, 2006.

**INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY – IUPAC**. Compendium of Chemical Terminology - Gold Book, 2012.

JATURAPITAKKUL, C.; TANGPAGASIT, J.; SONGMUE, S.; KIATTIKOMOL, K. Filler effect of fine particle sand on the compressive strength of mortar. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v.18, n°2, p.240-246, 2011.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

KOEHLER, E. P., FOWLER, D. W. **Summary of concrete workability test methods**. International Center for Aggregates Research – ICAR 105-1, Austin, 2003.

KRSTULOVIĆ, P; KAMENK, N.; POPOVID, K. A new approach in evaluation of filler effect in cement I. Effect on strength and workability of mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n<sup>o</sup>. 4, p. 721-727, 1994.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939-1947, 2003.

LEI, Yu; ZHANG, Qiang; NIELSEN Chris; HE, Kebin. An inventory of primary air pollutants and CO<sub>2</sub> emissions from cement production in China, 1990 - 2020. **Atmospheric Environment**, v. 45, p.147-154, 2011.

LERCH, W. Approximate glass content of commercial Portland cement clinker. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v.20, p.77-81, 1938.

LUZ, A. B; LINS, F. A. F. Comunicação Técnica elaborada para o livro rochas minerais industriais: Usos e especificações. Parte 2 – **Rochas e minerais industriais: Usos e especificações**. Rio de Janeiro, 2008, cap. 5, p. 103-123.

MACHADO, Alexandre, T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000, 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) Universidade de São Paulo, USP, 2000.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>> Acesso em mai 2013.

MACHADO J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos, ênfase na indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MACHADO R.B.; RIBEIRO, R.C.C.; ANDRADE F.V. **Utilização de rejeitos oriundos do corte de rochas ornamentais na correção da acidez e da adubação de solos tropicais**. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM. p. 120-126. Rio de Janeiro, 2006.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a Execução de Revestimentos de Argamassa para Paredes de Vedação Internas e Exteriores e Tetos.** São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://pcc2436.pcc.usp.br/Textost%C3%A9nicos/Revestimentos%20verticais/Apostila%20Revestimento%20Maciel%20Barros%20Sabbatini.pdf>> Acesso em 08 dez. 2012.

MARÇAL, Rubens L.S.B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais.** 2011, 79p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Instituto Militar de Engenharia, IME - RJ, Rio de Janeiro, 2011.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: Produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento.** São Paulo, 2001. 174p. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 2001.

MARTINS, M. D. **Aproveitamento do Rejeito das Lavras e Serrarias de Santo Antônio de Pádua (RJ). Estudo de caso: Produção de Argamassa Industrial.** TCC em Geologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 2010.

MATTA, V. R. P. **Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (rcmg) nas propriedades das argamassas de cimento Portland.** TCC em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2013.

MATTANA, A. J; COSTA, M. R. R. N. **Avaliação da porosidade em argamassas por microtomografia de raios-X (micro-CT).** 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, Coimbra, 2012.

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

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 249 p.

MEWIS, J. Thixotropy - a general review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 6 , p.1-20, 1979.

MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Thixotropy. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 147–148, p. 214–227, 2009.

MO, Liwu; DENG, Min; TANG, Mingshu; AL-TABBAA, Abir. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. **Cement and Concrete Research**, v.57, p. 1–12, 2014.

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

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004 (Boletim Técnico, n. 359).

NETO, A. A. B. **A importância do equilíbrio sócio-ambiental na extração do mármore e do granito**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo CEFET – ES, 2006 Disponível em: <ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Metalurgia Materiais/Joseroberto/P%D3S/AULAS/ GRANITO%20AUR%C9LIO.pdf > Acesso em jul. 2013.

NEVILLE, Adam M., **Propriedades do concreto**. 2º ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. 2010, 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2010.

OLIVEIRA, Carlos A.S. **Comportamento físico e avaliação microestrutural de argamassas produzidas a partir da mistura exaurida gerada na indústria de magnésio metálico**. 2004, 148p. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2004.

OLIVEIRA, C. N.; QUEIRÓZ, J.P.C.; RIBEIRO, R.C.C. **Aplicação de Resíduos Oriundos do Corte de Rochas Ornamentais na Produção de Cosméticos**. XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM. p. 123-129. Rio de Janeiro, 2007.

OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas. Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224p.

OURO E PRATA GRANITOS. In: **Serragem do granito**. Cachoeiro de Itapemerim - ES, 2010. Disponível em: < <http://www.ouroepratagranitos.com.br> > Acesso em jul. 2013.

PEDRINI. In: **\*NEW\* PEDRINI SPA Multifilo / Multiwire GS200**. Italy, 2008.

PELLETIER-CHAIGNAT, L.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B.; MÜLLER, C. J. Beneficial use of limestone filler with calcium sulphoaluminate cement. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 619–627, 2012.

PEÑA, M. R. G. **Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas para Reparo em Estruturas de Concreto**. 2004, 120f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa.** 2002, 111f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) Universidade de São Carlos- UFSCar, São Carlos, 2002.

PETTIJOHN, F., J.; POTTER, P., E.; SIEVER, R. **Sand and sandstone.** 2ª ed. New York: Springer-Verlag, 1987, 547p.

PETRUCCI, Eladio G.R. **Concreto de Cimento Portland.** 13º ed. São Paulo: Globo, 1998.

POPPE, Anne-Mieke; SCHUTTER, Geert De. Cement hydration in the presence of high filler contents. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 2290 – 2299, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Concrete Technology.** Disponível em: <[http://www.cement.org/tech/cct\\_port\\_cem\\_prod\\_tech.asp](http://www.cement.org/tech/cct_port_cem_prod_tech.asp)> Acesso em jul. 2013.

RAHHAL, V.; TALERO, R. Early hydration of portland cement with crystalline mineral additions. **Cement and Concrete Research.** v.35, p. 1285 – 1291, 2005.

RAMÉ-HART INSTRUMENT CO. Disponível em:<<http://www.ramehart.com>> Acesso em jul 2013.

REIS, A.S.; TRISTÃO, F.A. **Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais.** In: 2º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2007, Lisboa. Anais eletrônicos. Disponível em: <[http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038\\_07.pdf](http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038_07.pdf)>. Acesso em mar. 2012.

RIBEIRO, D.V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado.** São Carlos, 2010. 260p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, 2010.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M.R. Estudo das reações alalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica**, v. 58, p.90-98, 2012.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M.R. Rheological properties and hydration behavior of Portland cement mortars containing

calcined red mud. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 40, p. 557-566, 2013.

RIBEIRO, Rosemere. Por dentro do cimento. In: **Revista Itambé** / out 2006. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/por-dentro-do-cimento/>> Acesso em out. 2013.

RILEM. - Réunion Internationale dês Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et lês Constructions, **Método 11.4**, France, 1982.

RODRIGUES, G. F.; ALVES, J. O.; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. **Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. São Paulo, v. 8, p. 203-207, 2011.

RODRIGUES, A. F. S.; FONSECA, D. S. **Cimento**. In: Economia Mineral do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2009. p. 636-654.

RODRÍGUEZ, Enrique Ortega. **Movimento de partículas em fluidos**. Notas de aula, TA 631 – Operações Unitárias I, UNICAMP, 2012. Disponível em: <[www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula17\\_MovimentoParticulas.ppt](http://www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula17_MovimentoParticulas.ppt)> Acesso em dez 2013.

RUDUIT, Felipe R. – **Contribuição ao estudo da aderência de revestimentos de argamassa e chapiscos em substrato de concreto**. Porto Alegre, 2009, 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2009.

SABBAG, A.; F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. Curitiba, 2003, 119p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2003.

SANTOS, G. R. S.; APOLINÁRIO, E. C. A.; RIBEIRO, D. ; V. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas. **Periódico eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista – ANAP**, v.9, nº1, 2013.

SCHOON, J.; VERGARI, A.; DE BUYSSER, K.; VAN DRIESSCHE, I., DE BELIE, N. Fines extracted from porphyry and dolomitic limestone aggregates production: MgO as fluxing agent for a sustainable Portland clinker production. **Construction and Building Materials**, v.43, p. 511-522, 2013.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo, Artliber, 2º ed. 2006.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. Study of the water-retention capacity of a lime–sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime. **Cement and Concrete Research**, v. 33 p.689–696, 2003.

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA (SETEC)/ MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (MEC). **Rochas Ornamentais**. Brasília, 2007.

SENEFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Revista Matéria**, v. 15, n° 1, p. 012 – 020; 2010.

SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a Construção Civil. In: RODRIGUES, A. F. S. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília-DF: DNPM, p. 602-635, 2009.

SIMEC. In: **NT100 cutting centre with 100 disks for granite**. Italy, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Press Kit Outubro 2012**. Relatório anual, 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual**, 2010.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006, 180p. Dissertação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2006.

SILVA, F. G. S. **Proposta de metodologias experimentais auxiliares à especificação e controle das propriedades físico-mecânicas dos revestimentos em argamassa**. 2006 (a), 266p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2006 (a).

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído XI ENTAC, Florianópolis, 2006 (a).

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento**. In: II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, Ponta Grossa, 2006.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, v.8, n.4, p.21-35, 2008.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. In: II SUFFIB - Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem. **Anais**. São Paulo: 2005 (a).



SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. **Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas**. *Cerâmica*, v. 51, p. 325-330, 2005.

SILVA, V. S.; LIBÓRIO, J. B. L. Estudo da aderência de argamassas de revestimento e chapiscos em estruturas de concreto armado. In: 44<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte, 2002. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2002.

SILVA, R. D. S. **Avaliação do potencial de reutilização de resíduos refratários em massas refratárias**. Porto Alegre, 2011, Trabalho de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2011.

TOKUDOME, Naguisa. Cimento empedrado pode ser utilizado? In: **Revista Itambé**/ nov. 2009. Disponível em :<<http://www.cimentoitambe.com.br/cimento-empedrado-pode-ser-utilizado/>>. Acesso em out. 2013.

UNGERICHT , A.J. PIOVESAN, A.Z. Influência da cura da argamassa em relação às propriedades mecânicas e absorção de água. **Unoesc & Ciência – ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 75-86, 2011.

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

WALLEVIK, J. E. Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 14-29, 2009.

WANG, Aiqin, ZHANG, Chengzhi, ZHANG, Ningsheng. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement, **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 685-695, 1997.

WOLF, Fabiano G. **Modelagem da interação fluido-sólido para simulação de molhabilidade e capilaridade usando o modelo Lattice-Boltzmann**. Florianópolis. 2006. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Executive brief - March 2012**, 2012.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **The Cement Sustainability Initiative. Cement Industry Energy and CO<sub>2</sub> Performance “Getting the Numbers Right”**, 2009.

YUAN, Y; LI, G; CAI, Y. Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair. **Cement and Concrete Research**, v.33, p. 347-342, 2003.