

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

**Influência da cal hidratada no comportamento de
argamassas mistas**

Caroline Giordani

Porto Alegre

julho 2017

CAROLINE GIORDANI

**INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS MISTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

julho 2017

CAROLINE GIORDANI

**INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS MISTAS**

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

Porto Alegre, 21 de julho de 2017

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Mauricio Mancio (UNISINOS)
Dr. pela Universidade da Califórnia, Berkeley, Estados Unidos

Dedico este trabalho a todos que, de alguma forma,
acreditaram nele e contribuíram para ele.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio incondicional, compreensão e carinho ao longo destes dois anos, agradeço a meus pais, Valdéris e Airton, a meus dindos, Áurea e Décio, e ao Nando, Rafa e Miria.

À professora Angela sou muito grata pela orientação desta dissertação, bem como pela atenção, paciência e amizade. Aos membros da banca avaliadora, Ana Paula, Daniel e Maurício, agradeço pela disponibilidade de participação e pelas contribuições sugeridas e incorporadas ao trabalho.

Aos professores da área de materiais de construção, Ana Paula, Bonin, Daniel, Denise e João, agradeço pela colaboração em diversos aspectos desta pesquisa, bem como por todas as palavras de apoio ao longo do processo. Sou muito grata pelo companheirismo, pelas discussões sobre o trabalho, pela parceria e motivação diária de todos os colegas do NORIE e agregados, antigos e atuais: Ana Maran (obrigada pelas revisões de formatação e português!), Anderson Müller (com quem sigo aprendendo muito até hoje), Bruno Antonini, Camila Zanini, Carina (origem deste trabalho), Cláudia Poli, Dóris, Erich, Gabriela, Giselle, Gustavo Moraga (obrigada pela companhia para impressão do trabalho para a banca!), Laís, Maria, Márlon, Mascolo, Mauro e Mayara, Mônica, Muriel, Natália e Fábio, Pablo, Priscila, Sílvia, Thaís, Thiago e Vanessa. Merecem um agradecimento especial as colegas e grandes amigas Fernanda e Rafaela, que foram companheiras e incentivadoras diárias, desde cedo de manhã até tarde da noite, auxiliando nas etapas finais de revisão e finalização deste trabalho, sempre com muita disposição e humor.

Agradeço muito por toda a ajuda e companheirismo dos laboratoristas do LAMTAC: Airton, Gilmar, Demétrius e Rafael. Serei eternamente grata aos alunos de iniciação científica Anna Carolina, César, Emili, Guilherme, Júlia, Taíse e Yasmim, tanto pela disposição em auxiliar nos ensaios realizados, quanto pela parceria e amizade. Além deles, agradeço pelo apoio e coleguismo dos alunos Alessandro, Henrique, João Mérico, Lucas, Maurício, Ricardo e Vanessa.

Agradeço à prestatividade do LACER/UFRGS na realização dos ensaios químicos e físicos, principalmente à professora Annelise, à Márcia, à Fabiana, à Sabrina e ao Paulo; e também à disposição da Bárbara, integrante da QuimLabor Jr.

Por fim, sou muito grata pela oportunidade de ter sido aluna do NORIE e do PPGEC/UFRGS, bem como pela bolsa de estudo das agências de fomento CAPES e CNPq, a qual possibilitou total dedicação a este trabalho por dois anos.

'Cause nothin' lasts forever
Even cold November rain.

Guns N' Roses

RESUMO

GIORDANI, C. Influência da cal hidratada no comportamento de argamassas mistas. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A argamassa consiste em um material utilizado no sistema de vedação vertical de alvenaria, tanto no assentamento quanto no revestimento, conferindo proteção e estética para as edificações. Para seu bom desempenho, é muito importante o conhecimento das propriedades dos materiais e sua interação. Dentro deste contexto, se enquadram argamassas mistas de cimento e cal, as quais possuem propriedades que agregam as características complementares de ambos aglomerantes. A cal, mais especificamente, influencia principalmente no estado fresco. Entretanto, ainda nos dias de hoje, não se tem conhecimento do impacto de algumas de suas características nas propriedades das argamassas. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes tipos e teores de cal hidratada nas propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas. Para a avaliação, dosaram-se argamassas com três relações aglomerante:agregado (1:2,5, 1:3 e 1:3,5, em volume, areia úmida), quatro proporções entre cimento:cal hidratada (1:0,5, 1:1, 1:1,5, em volume), três relações água/aglomerante; dois tipos de cal hidratada CH I (cálcica e magnésiana) e duas composições granulométricas do agregado miúdo (CG25 e CG10, com porcentagens retidas de 25-25-25-25 e de 10-40-40-10 nas peneiras com abertura de malha de 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm, respectivamente). Estas misturas foram submetidas aos ensaios de índice de consistência, reometria rotacional e densidade de massa no estado fresco; além da avaliação no estado endurecido. O aumento do volume de cal ou do volume de agregado resultaram na redução do índice de consistência e no aumento da tensão de cisalhamento inicial quando mantida a mesma relação água/aglomerante. Argamassas com cal magnésiana ou com a CG10 apresentaram, em geral, menores índices de consistência e maiores valores de tensão de cisalhamento inicial do que aquelas com cal cálcica ou com a CG25. Com relação aos demais ensaios, na maioria dos casos, pôde-se observar uma tendência de redução nos valores de densidade de massa no estado fresco e endurecido, no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência à tração na flexão e compressão; e aumento do coeficiente de capilaridade das argamassas, conforme o aumento do teor de cal hidratada. Verificou-se que, quanto ao tipo de cal, sua influência foi significativa principalmente nas propriedades do estado fresco avaliadas neste trabalho.

Palavras-chave: cal hidratada, composição granulométrica do agregado, argamassa mista, reologia de argamassas, propriedades das argamassas.

ABSTRACT

GIORDANI, C. Influence of hydrated lime on the properties of blended mortars. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Mortar is a material used for masonry and rendering/plastering systems, which one provides protection and aesthetically pleasing appearance for buildings. For its adequate performance, the knowledge of the materials properties and their interaction is required. In this context, lime and cement mortar properties have complementary characteristics of both binders. Lime, specifically, influences mainly in the fresh state. However, the impact that some characteristics have on mortar properties are still unknown. Thereby, this research aims to evaluate the influence of the different types and contents of hydrated lime in the properties of the fresh and hardened state of the mortars. For this evaluation, mortars with three binder:aggregate ratios (1:2,5; 1:3 and 1:3,5; by volume, wet sand), four ratios of cement:hydrated lime (1:0,5; 1:1; 1:1,5, by volume), three water/binder ratios; two hydrated limes type CH I (high calcium and magnesian) and two fine aggregate granulometric compositions (CG25 and CG10, with retained percentages of 25-25-25-25 and 10-40-40-10 in the mesh sieves with aperture of 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm and 0,15mm, respectively) were dosed. These mixtures were submitted to consistency index test, rotational rheometry and fresh mass density, beyond the characterization of samples in the hardened state. The increase of hydrated lime and aggregate volume resulted in a consistency index reduction and the increase of the initial shear stress, when the water/binder ratio was the same. Magnesian hydrated lime or CG10 mortars showed, in general, lower consistency indexes and higher initial shear stress values as compared to high calcium hydrated lime or CG25 mortars. Considering the other tests, in most cases, could be observed a tendency of reduction in the values of mass density in the fresh and hardened state, dynamic modulus of elasticity, and flexural and compressive strength; and an increase in the capillary coefficient of mortars, as the hydrated lime content increases. Was verified that the influence of the type of lime was significant mainly in the fresh state properties evaluated in this research.

Keywords: hydrated lime, granulometric composition of the aggregate, blended mortar, rheology of mortars, properties of mortars.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 ORIGEM DO TRABALHO	21
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	24
2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	24
2.1.1 Objetivo principal	24
2.1.2 Objetivos específicos	24
2.2 DELIMITAÇÕES	24
2.3 LIMITAÇÕES	25
3 ARGAMASSAS	26
3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES	27
3.1.1 Cal	27
3.1.1.1 Rocha de origem	27
3.1.1.2 Cal Virgem	28
3.1.1.3 Cal Hidratada	29
3.1.1.4 Carbonatação	30
3.1.1.5 Classificação da cal	31
3.1.2 Agregado Miúdo	31
3.1.2.1 Caracterização	32
3.1.3 Água	33
3.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	33
4 REOLOGIA	37
4.1 CONCEITOS IMPORTANTES EM REOLOGIA	37
4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS VISCOSOS	39
4.2.1 Reologia das argamassas	41
4.2.1.1 Propriedades que influenciam a reologia das argamassas	42
4.2.1.2 Ensaio relacionados com a reologia das argamassas	44
4.2.1.2.1 <i>Índice de consistência</i>	44
4.2.1.2.2 <i>Squeeze flow</i>	45
4.2.1.2.3 <i>Reometria rotacional</i>	45
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
5.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS	48
5.1.1 Variáveis controláveis	48
5.1.2 Variáveis não controladas	50
5.1.3 Fatores fixos	50
5.1.4 Variáveis de resposta	50
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS	50
5.2.1 Ensaio de caracterização dos aglomerantes	50
5.2.1.1 Granulometria à laser	51
5.2.1.2 Área superficial específica – BET	51
5.2.1.3 Finura	52
5.2.1.4 Massa específica e massa unitária	52
5.2.1.5 Plasticidade, incorporação de areia e retenção de água	53
5.2.1.6 Fluorescência de raios X	54
5.2.1.7 Análise termogravimétrica	54
5.2.1.8 Difração de raios X	54

5.2.1.9	Potencial Zeta	54
5.2.1.10	Composição química, umidade e perda ao fogo.....	55
5.2.1.11	Microscopia eletrônica de varredura e EDS	55
5.2.1.12	Resistência à compressão	55
5.2.2	Ensaio de caracterização do agregado miúdo	56
5.2.2.1	Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima	56
5.2.2.2	Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade	57
5.2.2.3	Massa específica e unitária, absorção de água e volume de vazios	57
5.2.2.4	Imagens em lupa estereoscópica	57
5.2.3	Dosagem e preparo das argamassas.....	57
5.2.4	Ensaio do estado fresco	61
5.2.4.1	Índice de consistência	61
5.2.4.2	Reometria rotacional	61
5.2.4.3	Densidade de massa no estado fresco	67
5.2.5	Ensaio do estado endurecido	67
5.2.5.1	Densidade de massa no estado endurecido.....	67
5.2.5.2	Absorção de água por capilaridade	67
5.2.5.3	Módulo de elasticidade dinâmico	68
5.2.5.4	Resistência à Tração na Flexão e à Compressão	68
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	69
6.1.1	Caracterização do cimento	69
6.1.1.1	BET, granulometria a laser e finura	69
6.1.1.2	Massa específica e massa unitária.....	70
6.1.1.3	TGA, FRX e DRX.....	70
6.1.1.4	Potencial Zeta	73
6.1.1.5	Microscopia eletrônica de varredura e EDS	74
6.1.1.6	Resistência à compressão	76
6.1.2	Caracterização das cales hidratadas	76
6.1.2.1	BET, granulometria a laser e finura	77
6.1.2.2	Plasticidade, incorporação de areia e retenção de água	79
6.1.2.3	Massa específica e massa unitária.....	80
6.1.2.4	TGA, FRX e DRX	80
6.1.2.5	Composição química, umidade e perda ao fogo.....	83
6.1.2.6	Potencial Zeta	83
6.1.2.7	Exigências químicas	83
6.1.2.8	Microscopia eletrônica de varredura e EDS	84
6.1.2.9	Caracterização dos fabricantes	87
6.1.3	Caracterização do agregado miúdo	88
6.1.3.1	Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima	88
6.1.3.2	Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade	90
6.1.3.3	Massa específica e unitária, absorção de água e volume de vazios.....	90
6.1.3.4	Imagens em lupa estereoscópica	91
6.1.4	Resumo dos ensaios de caracterização	95
6.2	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	96
6.2.1	Índice de consistência.....	96
6.2.2	Reometria rotacional	100
6.2.2.1	Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração	101

6.2.2.2	Tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$	110
6.2.2.3	Tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na desaceleração	113
6.2.2.4	Área de histerese	116
6.2.2.5	Situações observadas no ensaio.....	118
6.2.3	Índice de consistência e tensão de cisalhamento.....	118
6.2.4	Densidade de massa no estado fresco	121
6.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	123
6.3.1	Tração na flexão e resistência à compressão	123
6.3.2	Absorção de água por capilaridade	128
6.3.3	Densidade de massa aparente no estado endurecido	131
6.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico.....	135
6.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS ARGAMASSAS	138
6.4.1	Observações quanto a variações nos resultados	138
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
APÊNDICE A – CURVAS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO E DA VISCOSIDADE APARENTE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO DAS ARGAMASSAS.....		151
APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO		161
APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PELO TESTE DE DUNCAN DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE $20S^{-1}$ NA ACELERAÇÃO		171

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viscosidade aparente máxima (Pa.s) e tensão de cisalhamento máxima (Pa) de argamassas com traço A3, A6, A9 e composições granulométricas CG1, CG2, CG3.....	22
Figura 2 – Representação do perfil de velocidade e da tensão cisalhante de um fluido viscoso quando aplicada força na placa superior.....	37
Figura 3 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento da curva de fluxo	39
Figura 4 – Relação entre as propriedades que influenciam na trabalhabilidade das argamassas.....	43
Figura 5 – Efeitos dos materiais sobre o comportamento reológico de argamassas	46
Figura 6 – Fluxograma do programa experimental, contendo variáveis controláveis e variáveis de resposta da pesquisa.....	47
Figura 7 – Variáveis controláveis e correspondente codificação.....	48
Figura 8 – Procedimento para determinação da massa unitária do cimento e das cales: a) peneiramento do material em pó sobre o recipiente com volume calibrado; b) aspecto final do recipiente preenchido; c) nivelamento do excedente com vidro e d) pesagem do recipiente	53
Figura 9 – Caracterização física das cales: a) plasticidade e b) incorporação de areia.....	53
Figura 10 – Proporcionamento em volume (areia úmida) das argamassas.....	58
Figura 11 – Proporcionamento em massa e materiais secos das argamassas	59
Figura 12 – Ensaio de consistência: a) moldagem e b) espalhamento da argamassa	61
Figura 13 – Ensaio de reometria rotacional: a) moldagem da argamassa no béquer, b) reômetro rotacional Brookfield R/S Plus e c) <i>spindle</i> Vane V30X15.....	62
Figura 14 – Dimensões mínimas do recipiente de ensaio	64
Figura 15 – Rotina de ensaio no reômetro rotacional Brookfield R/S Plus	66
Figura 16 – Curvas granulométricas do cimento CP II F 32, após diferentes tempos de ultrassom.....	70
Figura 17 – Análise termogravimétrica do cimento CP II F 32.....	71
Figura 18 – Difrátograma de raios X do cimento CP II F 32	73
Figura 19 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do cimento CP II F 32: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes.....	74
Figura 20 – Local de realização do EDS no cimento CP II F 32: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos	75
Figura 21 – Imagem da jazida de calcário cálcico.....	76
Figura 22 – Curvas granulométricas das cales cálcica e magnesiânica, após diferentes tempos de ultrassom.....	79
Figura 23 – Curvas granulométricas do cimento, e das duas cales, após 180 segundos de ultrassom.....	79
Figura 24 – Análises termogravimétricas das cales hidratadas: (a) cálcica e (b) magnesiânica	81
Figura 25 – Difrátogramas de raios X das cales hidratadas	82
Figura 26 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cal cálcica: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes.....	84
Figura 27 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cal magnesiânica: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes.....	85
Figura 28 – Local de realização do EDS na cal cálcica: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos.....	85

Figura 29 – Local de realização do EDS na cal magnesiana: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos	86
Figura 30 – Curvas granulométricas, teóricas e reais, das duas composições de agregados miúdos	90
Figura 31 – Imagens em lupa estereoscópica das composições do agregado miúdo, com aumento de 20x0,65: a) CG 10; b) CG 10; c) CG 25; d) CG 25	91
Figura 32 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras, com aumento de 20x0,65: a) e b) 2,4mm; c) e d) 1,7mm; e) e f) 1,2mm.....	92
Figura 33 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a) e b) 0,85mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6 c) e d) 0,6mm, com aumento de 20x0,65 e 20x1,6.....	93
Figura 34 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a) e b) 0,42mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6 c) e d) 0,3mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6.....	93
Figura 35 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a), b) e c) 0,215mm, com aumento de 20x0,65, de 20x1,6 e de 20x5; d), e) e f) 0,15mm, com aumento de 20x0,65, de 20x1,6 e de 20x5	94
Figura 31 – Relação do índice de consistência com a água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5.....	98
Figura 32 – Variação do índice de consistência em relação à água/aglomerante das argamassas com relação cimento:cal de: a) 1:0,5; b) 1:1,0 e c) 1:1,5.....	99
Figura 33 – Modelos de curvas de tensão de cisalhamento e de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento aplicada	100
Figura 34 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5.....	103
Figura 35 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação cimento:cal de: a) 1:0,5; b) 1:1,0 e c) 1:1,5	104
Figura 36 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração (Pa) relacionada com o tipo de cal das argamassas T2,5 A1,0, LS Means	106
Figura 37 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração (Pa) relacionada com a composição granulométrica das argamassas T2,5 A1,0, LS Means	107
Figura 38 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração (Pa) relacionada com a água/aglomerante das argamassas T2,5 A1,0, LS Means	108
Figura 39 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração relacionada com o traço aglomerante:agregado das argamassas, LS Means: a) A0,5 H0,7 e b) A0,5 H0,9.....	109
Figura 40 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração (Pa) relacionada com o teor de cimento:cal das argamassas T2,5 H0,9, LS Means	110
Figura 41 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 100s ⁻¹ em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5.....	112
Figura 42 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na desaceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5.....	115
Figura 43 – Variação da área de histerese em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	117

Figura 44 – Situações observadas no ensaio: a) exsudação no entorno da haste; b) diferenciação da área na região do giro e c) acúmulo de agregados graúdos no entorno da área de giro do <i>spindle</i> Vane	118
Figura 46 – Índice de consistência em relação à: a) tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração; b) tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$; c) tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na desaceleração e d) área de histerese	119
Figura 47 – Densidade de massa no estado fresco em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	122
Figura 48 – Resistência à tração na flexão em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	124
Figura 49 – Resistência à compressão em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	126
Figura 50 – Coeficiente de capilaridade em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	130
Figura 51 – Densidade de massa aparente no estado endurecido em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	133
Figura 52 – Módulo de elasticidade dinâmico em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5	136
Figura 54 – Argamassas T2,5 A1,0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,7, 0,8 e 0,9, respectivamente	153
Figura 55 – Argamassas T2,5 A1,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,8, 0,9 e 1,0, respectivamente	154
Figura 56 – Argamassas T3,0 A0,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	155
Figura 57 – Argamassas T3,0 A1,0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	156
Figura 58 – Argamassas T3,0 A1,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	157
Figura 59 – Argamassas T3,5 A0,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	158
Figura 60 – Argamassas T3,5 A1,0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	159
Figura 61 – Argamassas T3,5 A1,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	160
Figura 71 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:2,5	172
Figura 72 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:3,0	173
Figura 73 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:3,5	174

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades que influenciam na trabalhabilidade das argamassas	42
Quadro 2 – Ensaio de caracterização do cimento CP II F 32 e das cales hidratadas	51
Quadro 3 – Denominação e definição das frações granulométricas do agregado miúdo	56
Quadro 4 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo	56
Quadro 5 – Fichas dos compostos encontrados na DRX do CP II F 32	73
Quadro 6 – Fichas dos compostos encontrados na DRX das cales hidratadas	83
Quadro 7 – Quadro resumo da influência das variáveis controláveis nas propriedades das argamassas estudadas.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências químicas da cal hidratada	31
Tabela 2 – Exigências físicas da cal hidratada.....	31
Tabela 3 – Massas unitárias consideradas para o proporcionamento.....	58
Tabela 4 – Dimensões do <i>spindle</i> Vane, do recipiente a ser utilizado e fatores associados.	65
Tabela 5 – Dados da rotina de ensaio utilizada no reômetro rotacional	66
Tabela 6 – Caracterização física do cimento CP II F 32 por BET e granulometria a laser....	69
Tabela 7 – Massa específica e unitária do cimento CP II F 32.....	70
Tabela 8 – Composição elementar de óxidos do cimento CP II F 32 por FRX	71
Tabela 9 – Perda de massa do CP II F 32 por ATG.....	72
Tabela 10 – Valores de potencial zeta do cimento CP II F 32.....	73
Tabela 11 – Elementos encontrados na amostra de cimento CP II F 32 por EDS.....	75
Tabela 12 – Resistência à compressão do cimento CP II F 32	76
Tabela 13 – Análise da jazida de calcário que origina a cal hidratada cálcica.....	76
Tabela 14 – Caracterização física das cales por BET, granulometria a laser e finura	78
Tabela 15 – Ensaio físicos de plasticidade, incorporação de areia e retenção de água dos diferentes tipos de cales	80
Tabela 16 – Massa específica e unitária das cales cálcica e magnésiana	80
Tabela 17 – Composição elementar de óxidos das cales hidratadas por FRX.....	80
Tabela 18 – Classificação das cales hidratadas quanto à composição	81
Tabela 19 – Perda de massa das cales hidratadas por ATG	82
Tabela 20 – Caracterização química da cal hidratada cálcica pela NBR 6473 (ABNT, 2003a)	83
Tabela 22 – Valores de potencial zeta das cales hidratadas.....	83
Tabela 21 – Valores calculados das exigências químicas da cal conforme NBR 7175 (ABNT, 2003b)	84
Tabela 23 – Elementos encontrados na amostra de cal cálcica por EDS.....	86
Tabela 24 – Elementos encontrados na amostra de cal magnésiana por EDS	87
Tabela 25 – Caracterização das cales hidratadas segundo fabricantes.....	87
Tabela 26 – Distribuição granulométrica das frações de agregado miúdo em peneiras intermediárias	88
Tabela 27 – Composição granulométrica real dos agregados miúdos, caracterizada com peneiras da série normal e intermediária	89
Tabela 28 – Comparativo entre a composição granulométrica teórica e a real, dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos utilizados	89
Tabela 29 – Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade das composições granulométricas CG 10 e CG 25, real e teórica.....	90
Tabela 30 – Massa específica e absorção de água das areias média e grossa; massa unitária e índice do volume de vazios das composições CG10 e CG25	91
Tabela 31 – Resumo dos ensaios de caracterização dos aglomerantes.....	95
Tabela 32 – Resumo dos ensaios de caracterização dos agregados.....	95
Tabela 33 – Índice de consistência das argamassas confeccionadas com diferentes proporcionamentos, composições granulométricas da areia e tipos de cal hidratada	97
Tabela 34 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração (Pa) e agrupamento das variáveis para realização da análise de variância	102
Tabela 35 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração	105

Tabela 36 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração comparando-se a relação aglomerante:agregado.....	109
Tabela 37 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na aceleração comparando-se a relação aglomerante:agregado.....	110
Tabela 38 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de 100s ⁻¹	111
Tabela 39 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de cisalhamento de 100s ⁻¹	113
Tabela 40 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na desaceleração (Pa).....	114
Tabela 41 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na desaceleração	116
Tabela 42 – Valores de densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	121
Tabela 43 – Valores médios de resistência à tração na flexão (MPa)	123
Tabela 44 – Valores médios de resistência à compressão (MPa).....	125
Tabela 45 – Resultados sintetizados da ANOVA da resistência à tração na flexão das argamassas.....	127
Tabela 46 – Resultados sintetizados da ANOVA da resistência à compressão das argamassas	127
Tabela 47 – Valores médios do coeficiente de capilaridade.....	129
Tabela 48 – Resultados sintetizados da ANOVA do coeficiente de capilaridade das argamassas.....	131
Tabela 49 – Valores médios de densidade de massa aparente no estado endurecido	132
Tabela 50 – Resultados sintetizados da ANOVA da densidade de massa aparente no estado endurecido.....	134
Tabela 51 – Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico	135
Tabela 52 – Resultados sintetizados da ANOVA do módulo de elasticidade dinâmico	137
Tabela 53 – Argamassas T2,5 A0,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente	152
Tabela 54 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T2,5 A0,5	162
Tabela 55 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T2,5 A1,0	162
Tabela 56 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T2,5 A1,5	162
Tabela 57 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,0 A0,5	163
Tabela 58 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,0 A1,0	163
Tabela 59 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,0 A1,5	163
Tabela 60 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,5 A0,5	164
Tabela 61 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,5 A1,0	164
Tabela 62 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ (aceleração) – T3,5 A1,5	164
Tabela 63 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s ⁻¹ – T2,5 A0,5.....	165
Tabela 64 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s ⁻¹ – T2,5, A1,0.....	165

Tabela 65 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T2,5, A1,5.....	165
Tabela 66 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,0, A0,5.....	166
Tabela 67 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,0, A1,0.....	166
Tabela 68 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,0, A1,5.....	166
Tabela 69 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,5, A0,5.....	167
Tabela 70 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,5, A1,0.....	167
Tabela 71 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$ – T3,5, A1,5.....	167
Tabela 72 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T2,5, A0,5	168
Tabela 73 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T2,5, A1,0	168
Tabela 74 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T2,5, A1,5	168
Tabela 75 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,0, A0,5	169
Tabela 76 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,0, A1,0	169
Tabela 77 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,0, A1,5	169
Tabela 78 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,5, A0,5	170
Tabela 79 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,5, A1,0	170
Tabela 80 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ (desaceleração) – T3,5, A1,5	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATG – Análise Termogravimétrica
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia
DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral
DRX – Difração de Raios X
FRX – Fluorescência de Raios X
LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos
NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
QuimLabor Jr. – Empresa Júnior do curso de Química da UFRGS
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

CG10 – Composição granulométrica com a porcentagem (10-40-40-10) das frações de agregado miúdo #1,2mm, #0,6mm, #0,3mm e #0,15mm, respectivamente
CG25 – Composição granulométrica com a porcentagem (25-25-25-25) das frações de agregado miúdo #1,2mm, #0,6mm, #0,3mm e #0,15mm, respectivamente
CC – Cal hidratada cálcica
CM – Cal hidratada magnesiana
T – Relação entre aglomerantes e agregados
A – Relação entre os aglomerantes cimento e cal hidratada
H – Relação água/aglomerante

1 INTRODUÇÃO

As argamassas são amplamente utilizadas nas edificações, tanto no sistema de assentamento de blocos, quanto no sistema de revestimento interno e externo. Para o bom desempenho deste material, é importante que todas as etapas do processo sejam realizadas com base no conhecimento técnico, como o projeto (detalhes construtivos, especificação de materiais, dosagem), a execução (armazenamento, mistura, aplicação e processos auxiliares), bem como o uso e manutenção. A ocorrência de falhas nessas etapas pode ocasionar diversas manifestações patológicas, tais quais descolamento, deslocamento, fissuras, eflorescência, deterioração química e manchamento.

Recena (2012, p.124-125) comenta: “Infelizmente embora a argamassa seja um material muito antigo, seu estudo sempre foi relegado a um segundo plano, e ainda nos dias de hoje a comunidade técnica carece de dados e parâmetros de referência para o julgamento de sua qualidade.”. Especificamente no caso do estudo de argamassas mistas de cimento e cal hidratada, Sébaïbi *et al.* (2006) relatam que existem poucos trabalhos sobre o assunto. Os autores comentam que ênfase especial foi dada a trabalhos com outras adições minerais ao cimento, mas que a cal hidratada frequentemente não é estudada como tal. Rodriguez-Navarro *et al.* (2005) complementam que, embora o hidróxido de cálcio seja um material de construção muito antigo, suas características nanoestruturais e coloidais que influenciam nas propriedades de pastas e argamassas são ainda pouco conhecidas.

A cal hidratada cálcica constitui-se primordialmente de hidróxido de cálcio, enquanto que as magnesianas e dolomíticas possuem teores crescentes de hidróxido de magnésio. A rocha de origem, o processo de calcinação e de hidratação influenciam nas propriedades finais destes compostos. Caracterizam-se por serem materiais de elevada superfície específica e com elevado potencial de aglomeração. Carbonatam na reação com o dióxido de carbono, e endurecem, acrescentando resistência mecânica ao conjunto.

A adição deste material em argamassas de assentamento e revestimento constituídas apenas de cimento acrescenta importantes propriedades. No estado fresco, a trabalhabilidade e a retenção de água são melhoradas e, no endurecido, o módulo de elasticidade. Embora as resistências mecânicas sejam menores, são apropriadas às suas funções (GUIMARÃES, 1998).

No presente trabalho, as argamassas mistas de cimento e cal serão avaliadas variando-se o proporcionamento entre materiais (relação entre aglomerante e agregado e relação entre cimento e cal), o tipo de cal, a composição granulométrica e a relação água/aglomerante.

Conforme indicado anteriormente, evidencia-se a contribuição da cal na trabalhabilidade das argamassas, sendo importante a medição desta propriedade. Portanto, as argamassas serão

submetidas aos ensaios de consistência e reometria rotacional, sendo que este último resulta na medição dos parâmetros físicos de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente do material. Esta análise está em crescente utilização e, por este motivo, pode contribuir para o desenvolvimento de novos conhecimentos nesta área.

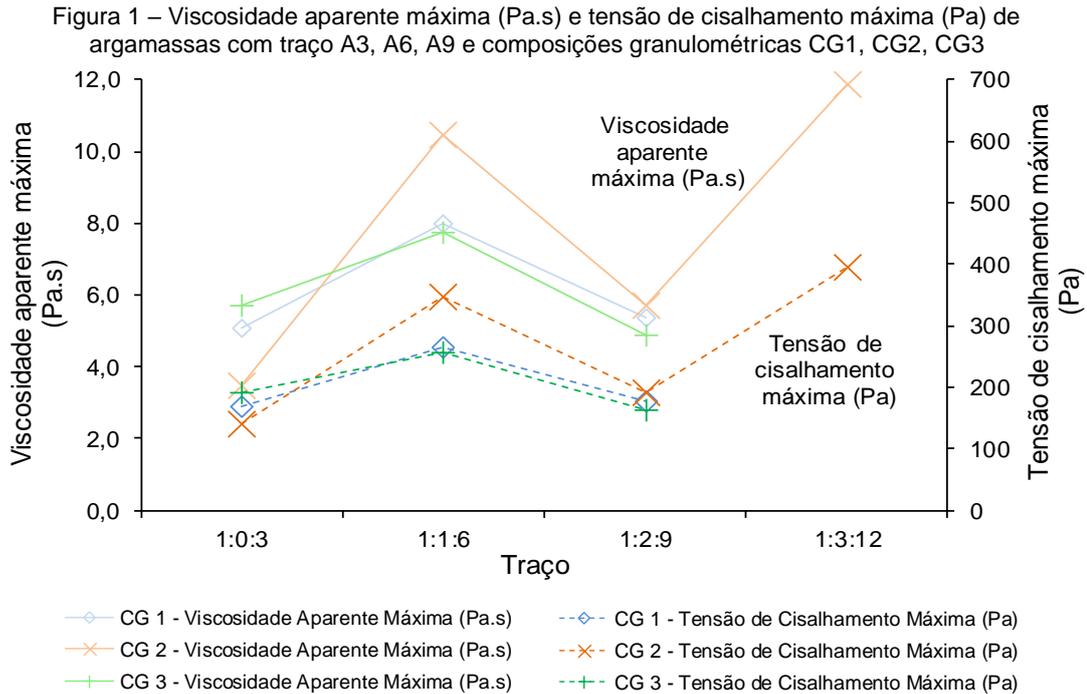
Além da densidade de massa no estado fresco, realizou-se também a avaliação das argamassas quanto aos ensaios de densidade de massa, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade e resistência à tração na flexão e à compressão no estado endurecido.

1.1 ORIGEM DO TRABALHO

O trabalho originou-se principalmente a fim de compreender o efeito da cal sobre a viscosidade de argamassas de revestimento, verificado por Stolz (2015). A autora trabalhou com quatro traços de argamassa (cimento:cal:areia, em volume), sendo eles A3 (1:0:3), A6 (1:1:6), A9 (1:2:9) e A12 (1:3:12), e três composições granulométricas da areia (#1,2mm:#0,6mm:#0,3mm: #0,15mm), sendo elas CG1 (25:25:25:25), CG 2 (10:40:40:10) e CG 3 (40:10:10:40). A consistência foi mantida em 240 ± 10 mm e, por este motivo, a relação água/aglomerante aumentou com a substituição de cimento por cal, e a relação água/materiais secos se manteve muito próxima para todas as composições granulométricas e para todos os traços, com leve aumento entre o traço A6 e A9.

A avaliação da viscosidade aparente máxima e da tensão de cisalhamento máxima destas argamassas resultou em um comportamento divergente do esperado, de tendência linear com o aumento da incorporação de cal. Em um primeiro momento, a substituição de cimento por cal na mistura, passando do traço A3 para o traço A6, resultou no aumento dos parâmetros analisados e, em um segundo momento, para o traço A9, estes parâmetros foram reduzidos e, por fim, para o traço A12, ocorreu novamente um aumento (Figura 1). Este comportamento serviu de base para a definição das variáveis controláveis neste estudo, no qual foram testados diferentes teores de cal hidratada em argamassas mistas de cimento e cal.

A autora verificou que quanto menor a viscosidade aparente da argamassa, a área de contato em substratos de vidro, acrílico e polietileno tende a ser maior. Esta última é uma das propriedades da argamassa que influenciam na aderência entre este material e a base, sendo que uma perda neste fator pode ocasionar manifestações patológicas tais como descolamento (CARASEK, 1996).



(fonte: adaptado de Stolz (2015))

Uma vez que o teor de cal seria estudado, foi proposto avaliar se o tipo de cal também influenciaria nos parâmetros analisados. Desta forma, foi definida a utilização de dois tipos de cal CH I, sendo uma cálcica e outra magnésiana. Esta decisão é corroborada por estudos que identificaram comportamentos diferenciados dependendo do tipo de cal (RAGO; CINCOTTO, 1999; ARIZZI; CULTRONE, 2012; ARIZZI *et al.*, 2012).

Além da observação acerca do teor de cal, verifica-se (Figura 1) que todas argamassas com as composições granulométricas CG1 e CG3 apresentaram comportamentos semelhantes quanto à tensão de cisalhamento inicial. Porém, as argamassas A3 e A6 apresentaram comportamentos distintos com a CG2, sendo que, em um primeiro momento a tensão de cisalhamento inicial é menor do que as demais argamassas e, no segundo, é muito elevado. Stolz (2015) explica que a viscosidade aparente elevada da argamassa com traço A6 e CG2 é resultado de um pior empacotamento, uma vez que este traço apresentou maior viscosidade aparente em todos os casos e esta granulometria era a mais uniforme.

Quanto à granulometria, têm-se também como referência o trabalho de Bonin *et al.* (1999), que estudaram a trabalhabilidade (índice de consistência) da argamassa em função da composição granulométrica do agregado miúdo, do teor de cal e da relação água/aglomerante. Verificou-se que, em geral, argamassas com composições mais uniformes demandam maiores quantidades de água para atingir um mesmo índice de consistência do que aquelas com composições desuniformes. Objetiva-se realizar uma análise comparativa semelhante à deste trabalho, utilizando-se duas composições granulométricas diferentes.

Além das variáveis definidas (teor e tipo de cal, e composição granulométrica da areia), a avaliação foi ampliada para argamassas com diferentes relações entre aglomerante e

agregado, e com três diferentes relações água/aglomerante, as quais foram definidas ao longo de ensaios exploratórios. É importante acrescentar que a escolha das variáveis deste trabalho também foi pautada levando em consideração o que é utilizado nos sistemas construtivos das edificações atualmente, principalmente no Brasil.

Desta forma, os principais fatores influentes no comportamento de argamassas mistas foram analisados, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. Portanto, este estudo justifica-se pela sua aplicabilidade, que visa contribuir para a dosagem de argamassas, as quais são amplamente utilizadas na construção civil brasileira, demonstrando a importância da escolha de seus constituintes e do proporcionamento entre eles.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar a influência da cal hidratada nas propriedades do estado fresco e endurecido de argamassas mistas.

2.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) analisar a influência do tipo de cal (cálcica e magnesiana), do teor de cal (relação entre cimento e cal hidratada), do traço (relação entre aglomerantes e agregado miúdo), da composição granulométrica (CG10 e CG25) e da relação água/aglomerante:
 - nos parâmetros de índice de consistência, tensão de cisalhamento e viscosidade aparente das argamassas mistas de cimento e cal hidratada;
 - na densidade de massa no estado fresco e endurecido, no coeficiente de capilaridade, no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à tração na flexão e na resistência à compressão das argamassas;
- b) comparar o comportamento reológico das misturas, obtidos nos ensaios de reometria rotacional e índice de consistência.

2.2 DELIMITAÇÕES

Os seguintes aspectos apresentam delimitações nesta pesquisa:

- a) foram avaliadas três relações aglomerante:agregado, de 1:2,5, 1:3 e 1:3,5 (em volume e agregado miúdo úmido), com 3 diferentes relações entre cimento e cal hidratada, de 1:0,5, 1:1 e 1:1,5 (em volume);
- b) utilizaram-se três relações água/aglomerante para cada proporcionamento (definidas para cada caso);
- c) apenas o tipo de cimento CP II - F foi utilizado para compor as argamassas mistas;
- d) dois tipos de cal hidratada CHI foram empregadas, uma cálcica e outra magnesiana;

- e) duas diferentes distribuições granulométricas do agregado miúdo foram analisadas;
- f) a avaliação do comportamento reológico foi realizada no Reômetro Brookfield R/S Plus, com palheta do tipo Vane 30x15 mm, com igual rotina de ensaio para todas as amostras.

2.3 LIMITAÇÕES

Não foi possível controlar a temperatura e umidade relativa do ambiente onde foi realizado o ensaio para determinação do índice de consistência.

3 ARGAMASSAS

O revestimento de argamassa de paredes e tetos possui diversas funções, dentre elas de proteger a estrutura e elementos de vedação frente à ação de agentes agressivos; contribuir na estanqueidade à água, isolamento termoacústico e resistência ao desgaste e ao fogo; e regularizar a envoltória da edificação para fins estéticos, capaz de constituir o revestimento final ou de receber outros acabamentos decorativos (BAÍA; SABBATINI, 2002; CARASEK, 2007). Recena (2012) acrescenta como atribuição do revestimento de argamassa a capacidade de absorver as deformações inerentes às quais a estrutura está submetida. Por sua vez, a argamassa de assentamento auxilia para a distribuição de cargas entre a alvenaria, união destes componentes, estanqueidade das juntas e absorção de deformações da estrutura (CARASEK, 2007).

Na NBR 13749 (ABNT, 2013b) são apresentadas as especificações necessárias das argamassas e do revestimento correspondente, porém, de forma bastante simplificada. No caso das argamassas constituintes dos revestimentos, é dito que “[...] os materiais e as respectivas proporções de dosagem devem ser compatíveis com o acabamento e as condições de exposição previstas [...]” (ABNT, 2013b, p. 2). Porém, a NBR 7200 (ABNT, 1998), NBR 13749 (ABNT, 2013b) e NBR 13281 (ABNT, 2005e), referentes, respectivamente, ao procedimento de execução de revestimentos, às especificações e aos requisitos das argamassas de assentamento e de revestimentos, não estabelecem relações mais precisas entre as condições em que a argamassa está submetida com o desempenho mínimo requerido pelo revestimento na situação em questão. Carasek (2007) indica que uma das exceções é a resistência potencial de aderência, a qual possui valor mínimo de desempenho definido por Norma, mas somente em função da localização do revestimento (externo ou interno, de teto ou parede).

Essa falta de associação entre os requisitos e o desempenho nas normativas pode ser um fator prejudicial para os revestimentos de argamassa. Recena (2012) indica que a inadequação na escolha dos materiais constituintes, na dosagem, no projeto, na execução e na manutenção está relacionada com a ocorrência de falhas nos revestimentos de argamassa. Segundo a NBR 13749 (ABNT, 2013b), são consideradas manifestações patológicas do revestimento de argamassa as fissuras (mapeadas ou geométricas), as vesículas, a pulverulência, o empolamento, e a expansão e descolamento. Tais ocorrências influenciam negativamente no desempenho do revestimento e na sua durabilidade. Desta forma, tornam-se muito importantes os estudos das argamassas quanto aos seus materiais constituintes, quanto a suas propriedades e quanto ao seu desempenho na aplicação e em uso, de forma a contribuir para melhores especificações acerca deste componente da edificação.

3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

As argamassas de revestimento são compostas por um ou mais aglomerantes, agregado miúdo, água e, facultativamente, aditivos e adições (NBR 13529, ABNT, 2013a). Segundo Pinto (1996), o conhecimento destes materiais de forma individual é importante, pois possuem diferentes características, as quais contribuem nas propriedades da mistura final, da argamassa. O enfoque será dado principalmente para a cal e agregados, uma vez que pretende-se avaliar a influência destes nas argamassas mistas.

3.1.1 Cal

A cal é um aglomerante aéreo, com características diferentes do cimento. A facilidade na produção da cal proporcionou sua utilização por muito tempo durante a história, e, de forma a melhorar propriedades como permeabilidade e resistência, outros materiais eram incorporados à mistura (SÉBAÏBI *et al.*, 2004). Os mesmos autores acrescentam que, a partir da metade do século 19, a produção e utilização dos ligantes hidráulicos passaram a crescer devido à urbanização, sendo observada a redução do consumo da cal. Porém, acrescentam que, devido à preocupação crescente com os recursos energéticos e o meio ambiente, bem como com a conservação de prédios históricos, o interesse neste material foi retomado, para uso em argamassas de assentamento e revestimento.

3.1.1.1 Rocha de origem

Conforme o anuário mineral brasileiro de 2009 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2010), o Brasil possui reserva de calcário medida de 53 bilhões de toneladas e, de dolomito e magnesita, de 6,9 bilhões de toneladas, sendo estas as rochas de origem da cal. A quantidade lavrável é indicada como pouco menos da metade destes valores. As jazidas lavráveis de calcário são encontradas principalmente nos estados de Minas Gerais (com 5,7 bilhões de toneladas), Goiás, Paraná, Mato Grosso, São Paulo, Ceará e Mato Grosso do Sul. Por sua vez, as jazidas lavráveis de dolomito e magnesita são encontradas principalmente em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. O Rio Grande do Sul possui reserva medida de 244 milhões de toneladas de calcário, sendo a maior parte desta lavrável, e 23 milhões de toneladas de dolomito e magnesita. Grande parte destas duas jazidas está localizada na cidade de Caçapava do Sul.

Ainda no ano de 2009, considerando-se apenas o calcário, a produção do mineral bruto foi de 16 milhões de toneladas, e a produção beneficiada, de 97 milhões de toneladas. Grande parte desse material é destinado para a produção de cimento (39,6% da quantidade total), extração e beneficiamento de minerais (14,3%), correção dos solos (11,33%), siderurgia (4,21%), construção civil (3,10%), produção de cal (2,06%), argamassa para construção (0,22%), entre outros (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2010).

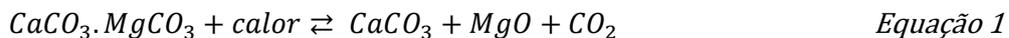
Em 2014, a produção de cal virgem e cal hidratada mundial foi calculada em 360 milhões de toneladas. Somente a China foi responsável por 230 milhões de toneladas, seguida pelos Estados Unidos, Índia, Rússia e Brasil. Embora esteja entre os cinco maiores produtores, em 2014, o Brasil produziu 8,3 milhões de toneladas, correspondente a apenas 2,3% da produção mundial (CORATHERS, 2016).

Dentre os carbonatos, os minerais do tipo cálcio-magnesianos utilizados para a produção de cal são a calcita e a dolomita. A calcita (carbonato de cálcio, CaCO_3) é originada, principalmente, da deposição de esqueletos e carapaças de animais marinhos, que resultou em rochas sedimentares (calcita) ou metamórficas (mármore). Este mineral possui formato hexagonal; dureza 3; densidade de 2,71; aspecto incolor a branco, dentre outros. A dolomita (carbonato de cálcio e magnésio, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), por sua vez, supõe-se que seja secundária, originada da substituição parcial de cálcio por magnésio na calcita, formando o calcário dolomítico ou o mármore dolomítico. Também possui formato hexagonal; dureza 3,5 a 4; densidade de 2,85; com tonalidade rosada, em geral (KLEIN; HURLBUT JR., 1997).

Os fatores influentes na qualidade da cal hidratada são relativos à rocha de origem e aos processos de produção. Com relação à rocha, é importante o conhecimento da composição química e mineralógica, bem como a pureza (CINCOTTO *et al.*, 2007). Argilominerais contendo alumina e sílica, quando calcinados, podem contribuir para a hidraulicidade da cal; enquanto que elementos silicosos reduzem o rendimento econômico do material (SAMPAIO; ALMEIDA, 2008).

3.1.1.2 Cal Virgem

A cal virgem ou viva é originada da calcinação das rochas carbonáticas. A dissociação do dolomito ocorre em duas etapas. Primeiramente, entre as temperaturas de 250°C e 380°, é formado o óxido de magnésio (Equação 1) e entre 660°C e 900°C, ocorre a formação do óxido de cálcio (Equação 2). Por sua vez, a dissociação da calcita é análoga à Equação 2 (GUIMARÃES, 1998; CINCOTTO *et al.*, 2007).



Onde:

CaCO_3 : carbonato de cálcio;

MgCO_3 : carbonato de magnésio;

MgO : óxido de magnésio;

CaO : óxido de cálcio;

CO_2 : dióxido de carbono.

A decomposição térmica da dolomita em temperaturas menores que a da calcita resulta em uma supercalcinação do óxido de magnésio e, conseqüentemente, uma menor reatividade no

processo de hidratação. Isto pode levar a uma hidratação retardada deste óxido quando utilizado em argamassas (CINCOTTO *et al.*, 2007).

O processo de calcinação deve ser adequado, sendo importante a definição do tamanho das partículas e o tempo de retenção, em função de cada tipo de forno. Caso a dimensão das partículas for elevada, o patamar de aquecimento deverá durar mais tempo para as decompor integralmente, gerando supercalcinação no seu exterior. Como resultado têm-se materiais mais heterogêneos e menos reativos (CINCOTTO, 1985). Com relação ao tipo de forno, Guimarães (1998) apresenta diversos, como os antigos fornos de alvenaria; os fornos verticais tipo AZBE, de cubas múltiplas e de leito fluidizado; ou ainda os fornos horizontais rotativos, de câmara rotativa, ou câmaras fixas, dentre outros.

Também importante é a liberação do CO₂ de dentro do forno, de modo que o processo de decomposição não seja revertido (CINCOTTO *et al.*, 2007). O resfriamento deve ser brusco, para favorecer a geração de fissuras no cristal recém formado e aumentar sua reatividade (CINCOTTO, 1985).

A maior reatividade da cal virgem está relacionada diretamente com sua maior área específica. Até 900°C, está em processo a fase de dissociação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio, que leva a transformação da estrutura de romboédrica para cúbica, gerando redução no volume e, por este motivo, a formação de poros no material e aumento da área específica dos grãos. A partir de 900°C, inicia-se a fase de recristalização, na qual o formato das partículas e dos poros mudam de arredondados para poligonais. O número de poros menores e a área específica são reduzidos, e a densidade aparente aumenta (CINCOTTO, 1985).

3.1.1.3 Cal Hidratada

Os óxidos de cálcio e de magnésio reagem com a água, formando hidróxido de cálcio e de magnésio, conforme Equação 3 e Equação 4, respectivamente. São importantes no processo de hidratação a dimensão das partículas de cal virgem e a relação entre cal e água (CINCOTTO *et al.*, 2007). O teor de água a ser adicionado para as reações de hidratação varia conforme a composição da cal e tipo de hidratador. Considerando o óxido de cálcio puro, a demanda estequiométrica é por 32,1% de água (GUIMARÃES, 1998). A reação é exotérmica e libera 273cal/g para formação do hidróxido de cálcio, e de 218 a 248 cal/g para o hidróxido de magnésio (NATURAL LIME ASSOCIATION, 2007).



Onde:

H₂O: água;

Ca(OH)₂: hidróxido de cálcio;

Mg(OH)₂: hidróxido de magnésio.

A reação de hidratação provoca uma expansão de 100% do volume do óxido de cálcio e 110% do volume do óxido de magnésio. Do ponto de vista da produção, esta expansão é benéfica, visto que influencia para a desagregação das partículas e, conseqüentemente, para uma maior área específica da cal hidratada (CINCOTTO *et al.*, 2007). Porém, caso a cal hidratada possua óxidos de cálcio e magnésio remanescentes, pode ocorrer a hidratação retardada destes no revestimento de argamassa, com decorrente aumento de volume, surgimento de tensões internas e deformações, resultando em vesículas, fissuras ou até mesmo, deslocamentos (RECENA, 2012).

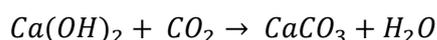
O hidróxido de cálcio cristaliza em placas lamelares ou prismas hexagonais (GUIMARÃES, 1998), que se empilham devido às cargas em sua superfície. “Nas cales dolomíticas, esse empilhamento é menos acentuado podendo-se mesmo distinguir algumas placas.” (CINCOTTO *et al.*, 2007, p. 708).

A cal hidratada apresenta-se como um pó seco e de cor branca, com densidade aparente entre 0,3 a 0,65 (GUIMARÃES, 1998). A massa específica varia de 2,3 a 2,4 (cal hidratada cálcica), 2,4 a 2,6 (dolomítica bem hidratada) e 2,7 a 2,9 (dolomítica normal). À 25°C, a solubilidade de Ca(OH)₂ em água é de 0,159 g/L, e o pH de uma solução saturada é de 12,454. Tanto a solubilidade quanto o pH reduzem com o aumento de temperatura. O Mg(OH)₂ é considerado praticamente insolúvel (NATURAL LIME ASSOCIATION, 2007).

A finura e área superficial da cal hidratada são bastante elevadas, adotados valores de referência entre 10.000 e 20.000 cm²/g, na França (GUIMARÃES, 1998). “As partículas, quanto mais finas, adsorvem maior volume de água, dissolvem-se mais rapidamente, dando à argamassa a consistência plástica que resulta em facilidade de aplicação e maior rendimento de trabalho do oficial pedreiro.” (CINCOTTO *et al.*, 2007, p. 711). Guimarães (1998, p. 126) comenta que a qualidade da cal hidratada é influenciada tanto pela área superficial da partícula quanto pela sua dissolução, sendo ambas interligadas, e acrescenta que “A área superficial tem, para a maioria dos usos da cal hidratada, maior significado que o tamanho das partículas.”.

3.1.1.4 Carbonatação

Aglomerante aéreo, o hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono e forma carbonato de cálcio e água, no processo denominado carbonatação (Equação 5) (PINTO, 1996). O hidróxido de magnésio, por sua vez, reage com o CO₂ e forma carbonatos de magnésio básicos, mais lentamente (GUIMARÃES, 1998).



Equação 5

O endurecimento da pasta de cal ocorre por dois processos. À medida que a água de mistura evapora, aumenta a quantidade e o tamanho dos cristais de hidróxido, os quais se entrelaçam em uma estrutura tipo offítica, que envolve os agregados na argamassa (GUIMARÃES, 1998). A evaporação de água resulta em uma rede de poros interna no material, que permite a

entrada de CO₂ para além da superfície. “Esse gás reage com o óxido substituindo a água de hidratação ao longo do tempo e regenerando o carbonato.” (CINCOTTO *et al.*, 2007, p 703).

3.1.1.5 Classificação da cal

Quanto à composição, as cales virgem e hidratada são divididas em cálcica, dolomítica e magnesiana. A primeira delas caracteriza-se por ser composta por elevada relação CaO/MgO, sendo o teor máximo de MgO de 4%. A dolomítica é composta pela relação teórica de CaO/MgO de 1,38 até 2,5. A cal magnesiana, por sua vez, é composta por uma relação CaO/MgO maior que 2,5 (CINCOTTO *et al.*, 2007).

A NBR 7175 (2003b) apresenta os requisitos químicos e físicos das três diferentes classes de cal hidratada para utilização em argamassa, os quais são apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2. Observa-se que a cal CH I apresenta maiores exigências que as demais, caracterizando-a como o tipo mais puro.

Tabela 1 – Exigências químicas da cal hidratada

Compostos	Limites (%)			
	CH-I	CH-II	CH-III	
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5	≤ 5	≤ 13
	No depósito	≤ 7	≤ 7	≤ 15
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)	≤ 10	≤ 15	≤ 15	
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t + MgO _t)	≥ 90	≥ 88	≥ 88	

(fonte: ABNT, 2003b)

Tabela 2 – Exigências físicas da cal hidratada

Compostos	Limites			
	CH-I	CH-II	CH-III	
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Peneira 0,075 mm	≤ 10	≤ 15	≤ 15
Retenção de água (%)	≥ 75	≥ 75	≥ 70	
Incorporação de areia	≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2	
Estabilidade	Ausência de cavidades ou protuberâncias			
Plasticidade	≥ 110	≥ 110	≥ 110	

(fonte: ABNT, 2003b)

3.1.2 Agregado Miúdo

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define agregado como um material de modo geral inerte, em grãos, com características tais que possa ser utilizado em argamassa e concreto. A areia é um agregado miúdo (o qual possui grãos de dimensões entre 4,75mm e 0,150mm) de origem natural, britada, artificial ou reciclada. Esta caracterização de agregados é complementada pela NBR 7211 (ABNT, 2009b), que trata dos requisitos dos agregados para concreto, os quais devem ser compostos por partículas minerais estáveis, duráveis, limpas, e sem substâncias nocivas que possam vir a interferir nos processos de hidratação, enrijecimento e na durabilidade. Esta norma ainda apresenta os limites da composição granulométrica do agregado miúdo para concretos, caso contrário, devem ser estudados particularmente.

Porém, não existe normativa referente a requisitos dos agregados miúdos constituintes de argamassas.

3.1.2.1 Caracterização

Os agregados são caracterizados, dentre outros aspectos, por sua composição granulométrica, sendo o procedimento determinado pela NBR NM 248 (ABNT, 2001c). A partir da curva obtida, é possível identificar certas características deste agregado, que podem depois ser vinculadas com seu comportamento frente ao uso como, por exemplo, o diâmetro máximo, finura, distribuição uniforme ou não dos grãos, existência de partículas de todas as dimensões, etc.

Na mecânica dos solos, também são definidos o diâmetro efetivo e o coeficiente de uniformidade de solos granulares. O diâmetro efetivo (Equação 6) é correlacionado com o coeficiente de permeabilidade deste material, o qual é menor quanto menor a dimensão das partículas, pois neste caso os vazios serão menores. Por sua vez, o coeficiente de não uniformidade (Equação 7) indica que, quanto maior este valor, mais a areia é bem graduada, o que significa uma distribuição com diversos tamanhos de grão, na qual ocorre preenchimento dos vazios pelos grãos menores, o que influencia para maior resistência e menor compressibilidade (PINTO, 1996). Neste trabalho, o “coeficiente de não-uniformidade” será denominado “coeficiente de uniformidade”, assim como feito por Carneiro e Cincotto (1999, p. 5).

$$D.E. = D_{10\%} \quad \text{Equação 6}$$

$$C.U. = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

D.E.: Diâmetro efetivo;

C.U.: Coeficiente de uniformidade;

D60%: Diâmetro da peneira pela qual 60% do agregado é passante;

D10%: Diâmetro da peneira pela qual 10% do agregado é passante.

No estudo do índice de consistência de argamassas com diferentes proporcionamentos entre os aglomerantes e com diferentes composições granulométricas, Bonin *et al.* (1999) observaram que areias com maior coeficiente de uniformidade e distribuições granulométricas desuniformes resultaram em argamassas com índice de consistência normalmente utilizado com menores relações água/aglomerante, enquanto que areias uniformes e menos compactas necessitaram maiores relações água/aglomerante.

Haach *et al.* (2011) verificaram que apenas em argamassas sem cal a variação do agregado miúdo (fino ou grosseiro) exerceu influência. Com a adição de cal, ocorreu aumento da relação água/aglomerante e, conseqüentemente, redução na resistência à compressão, à flexão e no módulo de elasticidade. Apesar de não ter sido observada influência da composição

granulométrica na resistência à compressão, observou-se no módulo de elasticidade, sendo este fator menor para argamassas de grãos mais grosseiros. Pinto (1996) indica que os agregados miúdos, geralmente de origem quartzosa, constituem-se de um material resistente e com alto módulo de elasticidade e que, por existir diferença no comportamento entre estes e os aglomerantes, é importante avaliar o conjunto.

3.1.3 Água

A adsorção da água nos materiais de uma argamassa tem origem química, de ligações iônicas e covalentes, associadas aos aglomerantes, e origem física, de forças de Van Der Waals, que envolvem a superfície das partículas, para suspensão das mesmas ou para conferir plasticidade à mistura (PINTO, 1996). O autor comenta que a adsorção superficial de água nos cristais dos grãos de areia e dos grãos de cal os tornam mais trabalháveis.

Recena (2012, p. 42) indica que a variação do consumo de cimento pouco altera a quantidade de água da mistura pelo fato de que a “[...] a trabalhabilidade é definida por uma quantidade fixa de água sobre o total de materiais secos” e, por este motivo, o aumento do consumo de cimento leva, por consequência, a uma redução na relação água/cimento. O autor diz que, no caso das argamassas mistas, a grande quantidade de água de preparo unida ao baixo teor de cimento explica que a variação na relação a/c pouco afeta a resistência mecânica, somente a partir da adição de grandes quantidades de cimento.

As partículas de areia suspensas em água mantêm-se juntas, mas não necessariamente em contato, e com uma determinada plasticidade, resultado de forças diversas, de atração ou repulsão: força da gravidade, força de atração capilar, forças de Van der Waals e forças de repulsão devido à eletrostática (PINTO, 1996). O autor indica que o arraste de uma partícula de agregado miúdo em relação à movimentação de outra depende da viscosidade do fluido existente entre elas e de sua dimensão, e a oposição à movimentação inicial da primeira partícula está vinculada com a coesão, a qual é modificada mediante a aplicação de um esforço cortante (por exemplo, o desempenho). Por fim, este mesmo autor coloca que a energia para vencer a resistência ao movimento, fator relacionado com a trabalhabilidade, é maior nos casos em que a relação água/aglomerante é menor, quando a superfície dos grãos de areia é maior (ou seja, quando os grãos são menores), e quando a compacidade é maior.

3.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

Para desempenhar suas funções de modo adequado, é necessário que os revestimentos de argamassa apresentem determinadas propriedades, e que o entendimento destas e de sua origem possibilite identificar o comportamento do revestimento frente ao uso (BAÍA; SABBATINI, 2002).

No estado fresco, são importantes a trabalhabilidade, a massa específica, o teor de ar, a retenção de água, a aderência inicial e a retração na secagem. No estado endurecidos, são importantes a aderência, a resistência mecânica e ao desgaste, a capacidade de absorver deformações, a permeabilidade à água, a estabilidade química e a durabilidade (BAÍA; SABBATINI, 2002; CARASEK, 2007; RECENA, 2012).

A NBR 13281 (ABNT, 2005e), embora tenha como objetivo apresentar os requisitos das argamassas de revestimentos de teto e parede, constitui-se apenas em uma classificação das mesmas, de acordo com suas propriedades no estado fresco (densidade de massa e retenção de água) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e à tração na flexão, resistência de aderência à tração e coeficiente de capilaridade). A Norma citada, inclusive, não apresenta classificação para as outras importantes propriedades das argamassas mencionadas anteriormente, tais como a trabalhabilidade.

Alguns estudos sobre as propriedades de argamassas de cimento, de cal hidratada, ou destes aglomerantes em conjunto, são apresentados a seguir.

Para Pinto (1996), a presença de cal na mistura com agregado miúdo e água resulta em um produto com melhor incorporação de areia, maior plasticidade, retenção de água e estabilidade volumétrica. O autor comenta que a primeira característica está relacionada com à pequena dimensão das partículas de cal, as quais se acomodam entre a areia, aumentando a compacidade sem reduzir a plasticidade; relaciona a plasticidade com a água adsorvida nos grãos de cal, que também possuem dimensões reduzidas; e a retenção de água com a área superficial elevada do hidróxido e carbonato de cálcio.

Da mesma forma, Guimarães (1998, p. 176) apresenta que a presença de cal nas argamassas melhora sua plasticidade e aumenta a retenção de água no estado fresco, e complementa que “[...] nas argamassas, a cal forma com a água e os inertes que a encorpam, uma mistura pastosa que penetra nas reentrâncias e vazios dos blocos construtivos [...]”.

Mais especificamente, no estudo da reologia de argamassas de cimento e cal hidratada com mesmo traço e relação água/cimento, modificando-se apenas a porcentagem substituída de cimento por cal hidratada, Sébaïbi *et al.* (2006) verificaram o aumento da demanda de água conforme a porcentagem de cal era introduzida, devido a sua maior área superficial em comparação à do cimento. Desta maneira, os autores concluíram que a morfologia da cal foi o fator mais influente para a definição da reologia.

Além da avaliação anterior, Sébaïbi *et al.* (2003) verificaram que pequenos teores de cal apresentaram elevada retenção de água; em um determinado teor (10-20%), dependendo do tipo de cal, ocorre uma redução brusca desta retenção; e, por fim, depois deste mínimo, a retenção de água aumenta com o aumento do teor de cal. Na primeira etapa, o comportamento é governado pela composição química da cal, área superficial, e morfologia dos poros. Na última etapa, os autores consideram que o fenômeno é complexo, sendo necessário considerar-se a interação entre cimento, cal e água, não podendo ser explicado

apenas pela composição química e morfologia, mas também pela energia e tensão capilar na superfície das partículas.

Complementarmente, com relação ao tipo de cal, Thomson (1999) verificou que cales hidratadas dolomíticas, em comparação com as cálcicas, apresentaram melhores resultados de plasticidade e retenção de água.

Quanto ao processo de endurecimento, Pinto (1996) explica que a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono (Equação 5) resulta na formação de carbonato de cálcio e água evaporável e um aumento de volume de 11%. Segundo este autor, o produto deposita-se nos poros deixados pela água evaporável e nos pequenos espaços entre a areia, diminuindo a dimensão destes, aumentando a compacidade do material, sem que ocorram grandes alterações de volume. Todos estes fatores auxiliam para uma menor absorção do sistema. Porém, o autor também comenta que o aumento da compacidade e a redução na permeabilidade superficial reduz a penetração de CO₂ e a evaporação de água liberada na reação, diminuindo a velocidade de carbonatação.

No estado endurecido, Recena (2012) aponta que as argamassas de cal possuem baixa resistência à umidade e à compressão, bem como menor rigidez e, conseqüentemente maior capacidade de deformação. Da mesma forma, Guimarães (1998) complementa, indicando que argamassas com cal tendem a apresentar resistência à compressão e à tração mais apropriadas para a função, melhor capacidade para absorver deformações, menor permeabilidade à água pelo menor tamanho das partículas, além de contribuir para a colmatação das fissuras ao longo do tempo.

Aos 28 dias de cura, Arizzi e Cultrone (2012) evidenciaram baixa resistência mecânica de argamassas com cal, devido ao seu reduzido grau de carbonatação. Por sua vez, Moropoulou *et al.* (2005) observou aumento deste fator ao longo do tempo, até 15 meses de ensaio, em estudo de argamassas apenas de cal hidratada.

Com relação ao tipo de cal, Arizzi e Cultrone (2012) identificaram que a utilização de argamassas com cal hidratada dolomítica em áreas secas não é recomendada pela ocorrência de fissuras e baixo desenvolvimento de resistência, e que nestas argamassas ocorreu também a inibição da absorção por capilaridade, devido a existência de poros maiores conectados a menores. As argamassas com cal cálcica, curadas também nesta condição, apresentaram maior carbonatação e maiores resistências. De maneira oposta, Dheilley *et al.* (1999) identificaram que cales dolomíticas, contendo óxido ou hidróxido de magnésio, formaram argamassas com maior resistência mecânica; e a cura em ar atmosférico resultou em resistências menores do que na atmosfera com CO₂, sendo possível observar a formação de hidromagnesita nesta última.

Comparativamente com a cal, o cimento anidro, constituído por silicatos e aluminatos que, reage com a água, resultando na formação de, dentre outros compostos, silicatos de cálcio hidratados e de hidróxido de cálcio, sendo esta reação exotérmica, e com conseqüente ganho

de resistência (NEVILLE, 2013). Como resultado, o cimento Portland confere elevada resistência à umidade, à compressão e elevada rigidez às argamassas, as quais apresentam-se menos deformáveis, e possuem maior tendência à retração e fissuração (RECENA, 2012). Carasek (2007), complementa que argamassas com cimento apresentam resistência de aderência elevada, mas que a fissuração pode comprometer a sua durabilidade.

Por sua vez, em estudo analisando os dois aglomerantes complementares apresentados, Sébaïbi *et al.* (2006) verificaram que a microestrutura da matriz da argamassa até 730 dias de cura não foi modificada com a substituição de pequenas quantidades de cimento por cal hidratada, exceto para dois casos, nos quais as cales possuíam elevada superfície específica, mas diferentes composições, sendo uma cal hidratada magnésiana e outra cálcica. Para adições maiores de 10%, ocorreu modificação da microestrutura, com aparecimento de microfissuras, que resultaram em uma matriz menos densa e com menor módulo de elasticidade dinâmico. Os autores explicam que as argamassas nas quais houve substituição de cimento por cal hidratada e tiveram sua consistência mantida pelo aumento da água apresentaram matrizes menos densas, aumento da porosidade e redução do módulo de elasticidade.

4 REOLOGIA

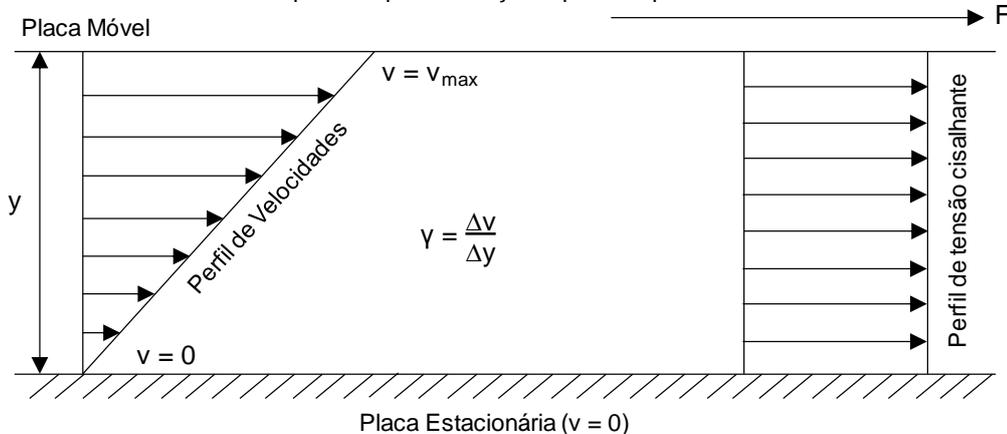
Pelo fato de a cal hidratada exercer elevada influência na trabalhabilidade de argamassas, e de forma a embasar os conceitos relativos a esta propriedade, este capítulo discorrerá sobre a reologia, propriedades no estado fresco da argamassa que influenciam na trabalhabilidade e exemplos de avaliação reológica de argamassas. Não será apresentado um capítulo exclusivo referente ao estado endurecido de argamassas mistas, pois muitas das características importantes já foram identificadas no capítulo 3.

A reologia consiste no estudo (logia) do fluxo e deformação (rheo) da matéria, resultante da aplicação de uma força externa. No caso de sólidos, a deformação é relacionada com alterações no seu volume, forma ou tamanho, enquanto que no caso de fluidos, líquidos ou gasosos, a variação da taxa de deformação é relacionada com as forças aplicadas. A reologia iniciou focada no estudo da deformação de materiais coesos, mas está sendo ampliada para o estudo de sistemas coloidais, fluxo de partículas e fricção entre sólidos (MACHADO, 2002).

4.1 CONCEITOS IMPORTANTES EM REOLOGIA

O corpo elástico ideal, ao ser aplicada uma energia mecânica, possui uma deformação elástica, a qual é reversível e espontânea. Essa energia é recuperada quando a carga deixa de ser aplicada. Neste caso, a deformação é proporcional à tensão aplicada. Por sua vez, em um fluido viscoso ideal, sua deformação é irreversível e contínua, a qual constitui o fluxo ou escoamento. A energia imposta é perdida em forma de calor para manutenção do escoamento. Neste caso, a tensão é relacionada com a taxa de deformação, o que significa que “[...] um fluido sofre um cisalhamento contínuo, isto é, suas camadas escoam com velocidades que variam com a distância entre elas”, conforme pode ser verificado na Figura 2 (MACHADO, 2002, p. 6).

Figura 2 – Representação do perfil de velocidade e da tensão cisalhante de um fluido viscoso quando aplicada força na placa superior



(fonte: MACHADO, 2002)

Para o caso apresentado, de um “[...] fluido newtoniano incompressível em fluxo laminar [...] (CHHABRA, RICHARDSON, 2008, p. 1, tradução nossa), a tensão de cisalhamento é definida na Equação 8, e a taxa de cisalhamento, na Equação 9 (MACHADO, 2002, p. 7).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento [N/m² ou Pa];

F é a força na direção do fluxo;

A é a área superficial que sofre o cisalhamento.

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

γ é a taxa de cisalhamento, taxa de deformação ou gradiente de velocidade [s⁻¹];

Δv é variação de velocidade entre dois planos do fluido, podendo ser calculada como a variação da sua distância percorrida em função da variação do tempo (SPURK; AKSEL, 2008);

Δy é distância entre dois planos do fluido.

A relação entre estes, a tensão e a taxa de cisalhamento, é apresentado na Equação 10, sendo o coeficiente de proporcionalidade denominado viscosidade (CARDOSO *et al.*, 2005; REIS, 2008; SPURK; AKSEL, 2008)

$$\tau = \mu * \gamma \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

μ é a viscosidade dinâmica do fluido, ou viscosidade Newtoniana [Pa.s].

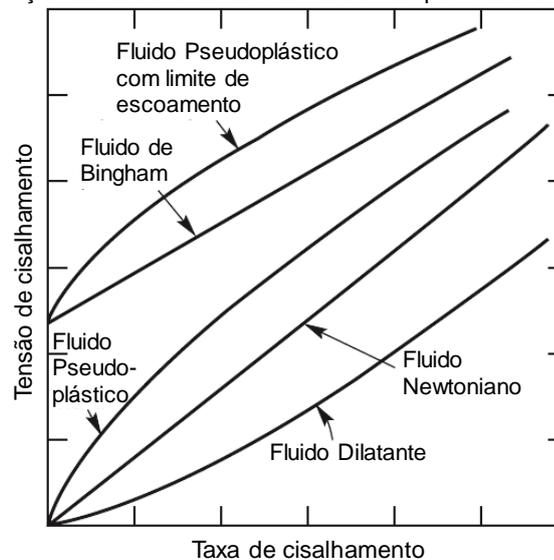
Por sua vez, a viscosidade cinemática [m²/s] é definida como a divisão da viscosidade dinâmica pela massa específica do fluido (MACHADO, 2002; KUNDU *et al.*, 2012).

A viscosidade dinâmica consiste em uma propriedade do fluido, a qual determina a sua resistência de deformar-se, ou seja, de escoar (MACHADO, 2002). Chhabra e Richardson (2008) acrescentam que a viscosidade depende apenas do material e das condições de pressão e temperatura ao qual está submetido. Antman *et al.* (2008) relacionam viscosidade com a fricção interna de um fluido submetido a uma mudança de forma. Machado (2002) e Kiryu (2006) apresentam que a deformação ou escoamento de dois fluidos diferentes submetidos às mesmas condições de tensões será diferente, e dependente de suas viscosidades. São fatores que afetam a viscosidade: “[...] a natureza físico-química do líquido ou composição do sistema, temperatura, pressão, taxa de cisalhamento, tempo e campo elétrico.” (MACHADO, 2002, p. 41).

4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS VISCOSOS

Uma das possíveis classificações dos fluidos é de acordo com o comportamento da tensão de cisalhamento frente a aplicação da taxa de cisalhamento (RAO, 2013; MACHADO, 2002). Esta classificação é iniciada pela divisão entre fluidos newtonianos e não-newtonianos. Dentre os não-newtonianos, são classificados como de fluxo independente do tempo (dilatantes; viscoplástico/de Bingham; pseudoplásticos), dependentes do tempo (tixotrópicos e reopéticos) ou viscoelásticos (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Na Figura 3 são apresentados os principais tipos de fluidos, os quais são descritos a seguir.

Figura 3 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento da curva de fluxo



(fonte: CHHABRA; RICHARDSON, 2008, tradução nossa)

Os fluidos Newtonianos muitas vezes são descritos apenas como aqueles com relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento linear, mas isso também pode acontecer com outros fluidos (SPURK; AKSEL, 2008). Para esse fluido ideal, a curva de fluxo, a qual é linear, também deve intersectar a origem dos eixos. Diz-se que a inclinação desta reta corresponde à viscosidade absoluta e única deste tipo de fluido, sendo esta influenciada apenas pela variação de pressão ou temperatura. Portanto, sua curva de viscosidade é uma reta paralela ao eixo da taxa de cisalhamento (MACHADO, 2002).

Fluidos não-Newtonianos constituem curvas de fluxo que não interceptam a origem ou não são lineares (CHHABRA; RICHARDSON, 2008; RAO, 2013). Dentre os não-newtonianos, os independentes do tempo são aqueles que dependem apenas da taxa de cisalhamento, e não do tempo de ensaio (RAO, 2013). Estes ainda podem ser divididos por apresentarem ou não uma tensão inicial. Aqueles que não possuem esta restrição, iniciam o fluxo sem necessidade da aplicação de uma tensão de cisalhamento, enquanto que os que possuem essa característica necessitam da chamada tensão de escoamento, a mínima para iniciar o fluxo (ALENCAR, 2008). Esta tensão mínima é denominada limite de escoamento real por Machado (2002).

Os fluidos dilatantes possuem aumento da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, e os fluidos pseudoplásticos apresentam redução na viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Os primeiros são pouco frequentes mas podem ocorrer, inclusive, em determinadas pastas de cimento; e têm-se como exemplo de fluidos pseudoplásticos, dispersões argilosas (MACHADO, 2002).

Os fluidos pseudoplásticos tixotrópicos apresentam, para uma taxa de cisalhamento constante, a redução da viscosidade aparente ou da tensão cisalhante conforme o tempo de execução, sendo que a curva de viscosidade descendente se situa abaixo da curva ascendente. Os fluidos reopéticos apresentam comportamento oposto aos tixotrópicos (MACHADO, 2002). O autor indica que a redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento de dispersões resulta da orientação dos componentes da mistura e ruptura de sua estrutura gel, que possui fracas ligações; quando reduzida a taxa de cisalhamento, a viscosidade volta ao comportamento inicial, mas com menor valor. Este comportamento é preferencial em tintas, de forma a permitir seu espalhamento quando aplicadas, e dificultar o escorrimento quando em repouso. Struble e Ji (2001) observaram comportamento tixotrópico em pasta de cimento.

Os fluidos viscoplásticos, também chamados de fluidos de Bingham, necessitam de uma tensão inicial mínima (tensão de escoamento) para iniciar o fluxo; e após, comportam-se como uma reta na curva de fluxo (YAMAGUCHI, 2008). Machado (2002) acrescenta que o comportamento inicial teórico deste fluido é semelhante a um sólido; e que a origem do limite de escoamento é relacionada com as forças atuantes entre as partículas, e a viscosidade plástica é decorrente do atrito entre moléculas do líquido e das partículas suspensas.

Chhabra e Richardson (2008) apresentam que a aplicação da tensão mínima nos fluidos de Bingham é necessária para romper a estrutura rígida interna e tornar o material viscoso, sendo esta ruptura reversível em alguns casos. Afirmam ainda que a curva de fluxo não passa pela origem dos eixos, e que a viscosidade aparente reduz com o aumento da taxa de cisalhamento. A viscosidade aparente deste fluido torna-se a viscosidade plástica quando a taxa de cisalhamento tende ao infinito, sendo o comportamento deste fluido definido pelas Equação 11, Equação 12 e Equação 13 (MACHADO, 2002).

$$\tau = \mu_p \gamma + \tau_L \quad \text{para } \tau > \tau_L \quad \text{Equação 11}$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_L \quad \text{Equação 12}$$

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_L}{\gamma} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

γ = taxa de cisalhamento;

τ = tensão de cisalhamento;

τ_L = limite de escoamento;

μ_p = viscosidade plástica;

μ_a = viscosidade aparente.

São exemplos de fluidos de Bingham, a argila bentonítica e a calcita, dispersas em água. O comportamento de Bingham também é verificado em argamassas (ANTMAN *et al.*, 2008, p.117).

Por fim, alguns materiais são chamados de viscoelásticos por apresentarem comportamento simultâneo de sólidos e fluidos ideais (KUNDU *et al.*, 2012; MACHADO, 2002; YAMAGUCHI, 2008; RAO, 2013), além de uma reversão parcial da deformação (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Machado (2002) comenta que, em alguns casos, em baixas taxas de cisalhamento, as propriedades elásticas prevalecem sobre as viscosas e, quando submetida ao escoamento contínuo, prevalece o efeito da viscosidade.

4.2.1 Reologia das argamassas

A trabalhabilidade das argamassas é considerada uma propriedade subjetiva do estado fresco, e que está relacionada com a facilidade de realizar os processos executivos de mistura, transporte, aplicação, espalhamento, consolidação e acabamento do revestimento de argamassa, de forma homogênea (CARASEK, 2007), de maneira com que este cumpra com sua finalidade com relação à aderência e ao acabamento estabelecidos, além de manter a produtividade e o custo (RECENA, 2012). Mais especificamente, Baía e Sabbatini (2002) definem argamassas trabalháveis como aquelas que possam ser manuseadas e transportadas com a colher de pedreiro, que se espalhem na base e suas saliências, e não enrijeçam rapidamente.

Acrescenta-se que, dependendo do modo de execução, as argamassas devem possuir trabalhabilidades diferentes. Por exemplo, argamassas de revestimento são mais plásticas que as de assentamento, para permitir sua projeção, acabamento e aderência ao substrato. Essa maior plasticidade é decorrente do aumento do volume de pasta pelo aumento da água, considerando como limite a coesão (RECENA, 2012). Inclusive entre as argamassas de revestimento, a consistência e plasticidade deve estar em conformidade com sua aplicação, sendo menos fluida para aplicação manual, e mais fluida para bombeamento e projeção (CARASEK, 2007).

No estado endurecido, a viscosidade das argamassas exerce influência na área de contato desta com o substrato, tendendo a ser maior a área de contato quanto menor a viscosidade (STOLZ, 2015). A relação água/aglomerante e agregado/aglomerante, a granulometria da areia (ROSSELO¹, 1976 apud SELMO, 1989), os aglomerantes e o processo de mistura (IBANEZ², 1986 apud SELMO, 1989) são fatores que influenciam na trabalhabilidade.

¹ ROSSELO, M. T. V. **Morteros de cemento para albanileria**. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1976. 55p.

² IBANEZ, S. R. La trabajabilidad de morteros. In: UNIVERSIDAD DE VALPARAISO – CENTRO TECNOLÓGICO DEL HERMIGON. **IV Jornadas Chilenas del Hermigon**. Valparaiso, Universidad de Valparaiso, 1986.

4.2.1.1 Propriedades que influenciam a reologia das argamassas

A trabalhabilidade é resultado da união de diversas propriedades, conforme apresentado no Quadro 1 (CARASEK, 2007, p. 875). Recena (2012) indica que a trabalhabilidade é relativa aos conceitos de consistência e coesão, e depende da quantidade de finos e de água, os quais devem apresentar-se em quantidade tal que a água seja retida sem segregação, que o volume se mantenha estável e a coesão permita a aderência. O autor acrescenta que, tanto a alta coesão quanto a alta fluidez não são benéficas do ponto de vista da trabalhabilidade.

Quadro 1 – Propriedades que influenciam na trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluida apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato

(fonte: CARASEK, 2007, p. 875)

A consistência das argamassas é influenciada pela quantidade de água na mistura, e pode ser classificada como (ROSELLO³, 1976 apud CARASEK, 2007):

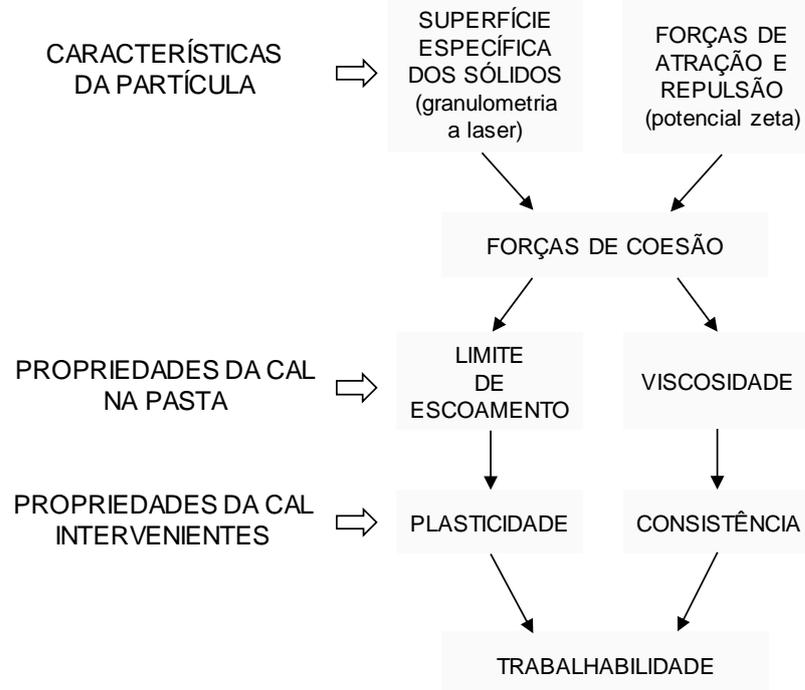
- a) fluida: quando a pasta envolve os agregados mas não apresenta coesão suficiente, podendo ocorrer segregação;
- b) plástica: os agregados estão envoltos por uma fina camada de pasta, o que resulta em adesão entre estas duas fases;
- c) seca: a pasta ocupa os vazios, mas mantém os agregados em contato, em atrito.

Segundo Carasek (2007), os aglomerantes e agregados (quantidade e tipo), a incorporação de aditivos, além do procedimento de mistura (tempo e intensidade) são fatores que influenciam na plasticidade. Baía e Sabbatini (2002, p. 17) acrescentam que “A presença da cal e de aditivos incorporadores de ar, por exemplo, melhoram essa propriedade até um determinado limite.”.

³ ROSSELO, M. T. V. **Morteros de cemento para albanileria**. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1976. 55p.

A relação entre os parâmetros reológicos de tensão de escoamento e viscosidade são relacionados diretamente com a plasticidade e a consistência, conforme demonstrado na Figura 4 (RAGO; CINCOTTO, 1999, p. 11).

Figura 4 – Relação entre as propriedades que influenciam na trabalhabilidade das argamassas



(fonte: RAGO; CINCOTTO, 1999, p. 11)

A plasticidade e consistência muitas vezes são utilizados como sinônimos de trabalhabilidade, pois são consideradas as suas duas principais propriedades (CARASEK, 2007). Porém, esta autora os relaciona de forma diferente da Figura 4, e diz que “[...] argamassas de consistência mais fluidas representam misturas com menores valores de tensão de escoamento [...]” e “[...] a plasticidade está relacionada com a viscosidade da argamassa.” (CARASEK, 2007, p. 877).

A propriedade de retenção de água é importante principalmente para argamassas aplicadas sobre bases muito absorventes ou sujeitas a condições extremas do ponto de vista climático, que provoque elevada evaporação. A retenção de água influencia no estado fresco, nas operações de acabamento e na retração da argamassa no estado plástico; e também no estado endurecido, no ganho de resistência, na capacidade de aderência ao substrato e na durabilidade (CARASEK, 2007; RECENA, 2012).

Baía e Sabbatini (2002) explicam que a retenção de água pela argamassa resulta na hidratação do cimento de forma apropriada e, desta forma, em maior resistência mecânica. Acrescentam que esta propriedade decorre do tipo e quantidade de materiais, podendo ser melhorada com a utilização de cal e aditivos, e que exerce influência também na deformação e estanqueidade do sistema de revestimento.

A massa específica relativa, ou massa unitária, caracteriza-se por ser a relação entre a massa e o volume de material considerando-se os vazios. A densidade de massa é função da massa

específica dos constituintes, em especial do agregado miúdo, e é maior quanto menor o teor de ar incorporado da argamassa. Quanto menor for a densidade de massa, mais leve e mais trabalhável será a argamassa, do ponto de vista do operário. Para isso, pode-se utilizar aditivos incorporadores de ar, a fim de aumentar seu teor e, desta forma reduzir a massa unitária, porém o aumento excessivo do teor de ar pode prejudicar a aderência à base e a resistência (BAÍÁ; SABBATINI, 2002; CARASEK, 2007).

4.2.1.2 Ensaios relacionados com a reologia das argamassas

A trabalhabilidade é uma medida qualitativa, de difícil avaliação, e realizada através de outras propriedades. Existe a necessidade de trocar respostas empíricas por parâmetros físicos que possam ser medidos (como os parâmetros reológicos). A argamassa deve ter viscosidade tal que possa ser aplicada no substrato pelo operário, e que tenha tensão de escoamento tal que consiga manter-se em contato com o substrato, sem escorregar ou descolar (SOUSA; LARA, 2005).

Tattersall⁴ (1976, apud RAGO; CINCOTTO, 1999) também apresenta a trabalhabilidade como qualitativa, e sem possibilidade de quantificação, apenas descrição; o espalhamento, penetração e escoamento são medidas quantitativas empíricas; e a viscosidade, limite de escoamento e fluidez são medidas conceituais quantitativas.

Muitos dos ensaios de trabalhabilidade existentes avaliam apenas uma das propriedades reológicas das argamassas: ou a viscosidade ou a tensão de escoamento (SOUSA; LARA, 2005). Bomble⁵ (1967, apud RAGO; CINCOTTO, 1999) comenta que a coesão, viscosidade e o atrito interno são os principais elementos para caracterizar a reologia dos materiais.

4.2.1.2.1 *Índice de consistência*

O ensaio brasileiro normalizado e amplamente utilizado para a medição da trabalhabilidade é descrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016b). Consiste na colocação e adensamento da argamassa em uma fôrma tronco-cônica, a retirada do molde e posterior aplicação de 30 quedas em 30 segundos da mesa sobre a qual o material foi disposto, de uma altura de 12,5mm. A média de três medidas da abertura do espalhamento da argamassa é definido como o índice de consistência. Sousa e Lara (2005) indicam que esse ensaio não caracteriza a tensão de escoamento, pois as quedas da mesa ultrapassam esta, e que caracteriza a viscosidade de maneira incompleta, pois ela não é medida ao longo do tempo. Cardoso (2009) comenta que os resultados do ensaio apresentam a contribuição tanto da tensão de escoamento quanto da viscosidade, de forma indissociável. Além disso, é um resultado

⁴ TATTERSALL, G. H. **The workability of concrete**. Slough, Viewpoint Publication, 1976.

⁵ BOMBLED, J. P. Comportement rhéologique des pâtes, mortise et betóns: mesure, evolution, influence de certains parameters. **Revue des Matériaux de Construction "Ciments et Betóns"**, n. 617, fev. 1967.

pontual, pois é medido apenas ao fim do ensaio, e que avalia a trabalhabilidade de forma indireta e comparativa entre argamassas, uma vez que não há definição de valores em Norma.

4.2.1.2.2 *Squeeze flow*

O ensaio contemplado para avaliar a reologia de argamassas é o *squeeze flow*, normalizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010), e que consiste na aplicação de carga uniaxial sobre a argamassa fresca, resultando em gráficos de carga (N) x deslocamento (mm) e carga (N) x tempo (s).

Com tais resultados, é possível calcular os parâmetros reológicos das argamassas (CARDOSO *et al.*, 2005). Este ensaio ainda apresenta a vantagem de poder ser realizado em prensas, e poder ser correlacionado com os processos de aplicação da argamassa de espalhamento e aperto (CARDOSO, 2009).

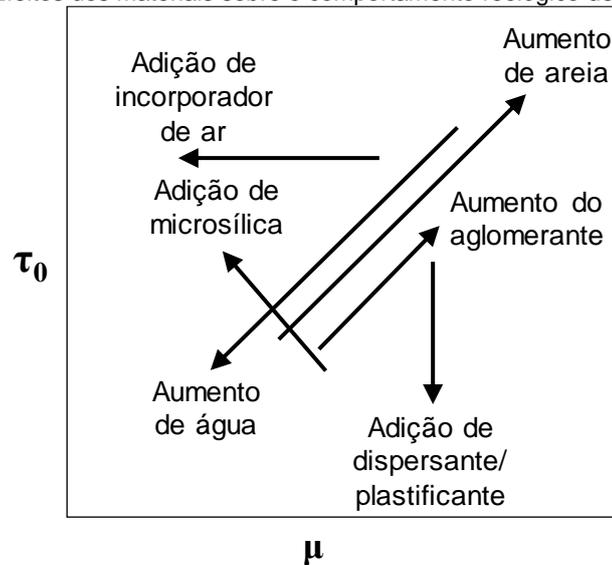
Stolz (2015) verificou que, em comparação com a mesa de consistência, o *squeeze flow* melhor identificou a influência do traço e da granulometria dos agregados nas argamassas; porém, esta avaliação é realizada apenas graficamente. Cabe acrescentar que, assim como para o ensaio de consistência, as normativas brasileiras não apresentam o desempenho esperado nesta propriedade, sendo ele um ensaio comparativo entre argamassas.

4.2.1.2.3 *Reometria rotacional*

O ensaio de reometria rotacional consiste em submeter o fluido a uma taxa de cisalhamento controlada, durante um determinado tempo, resultando na tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento. A partir da reometria, podem ser obtidos os parâmetros reológicos de viscosidade e tensão de escoamento (SOUSA; LARA, 2005). Este ensaio é amplamente utilizado em outras áreas da ciência como na indústria de alimentos, farmacêutica, de metais, polímeros, emulsões e tintas, petróleo e combustíveis, na avaliação de solos e asfalto, etc.

Definidas como um líquido viscoso (pasta) com sólidos em suspensão (agregados), considera-se que as argamassas apresentam o comportamento reológico de um fluido de Bingham, também denominado viscoplástico (SOUSA; LARA, 2005). Na Figura 5, Banfill (2005) apresenta a influência dos materiais no comportamento reológico das argamassas. Este autor comenta que a tensão de escoamento (τ_0) de argamassas situa-se na faixa entre 80 e 400Pa, e a viscosidade plástica (μ), entre 1 e 3Pa.s.

Figura 5 – Efeitos dos materiais sobre o comportamento reológico de argamassas



(fonte: BANFILL, 2005, p. 78, tradução nossa)

Hoppe Filho *et al.* (2006, p. 117) recomenda que a reometria rotacional seja utilizada em paralelo com outros ensaios, visto que pode não caracterizar satisfatoriamente diferentes tipos de argamassas, mas permite:

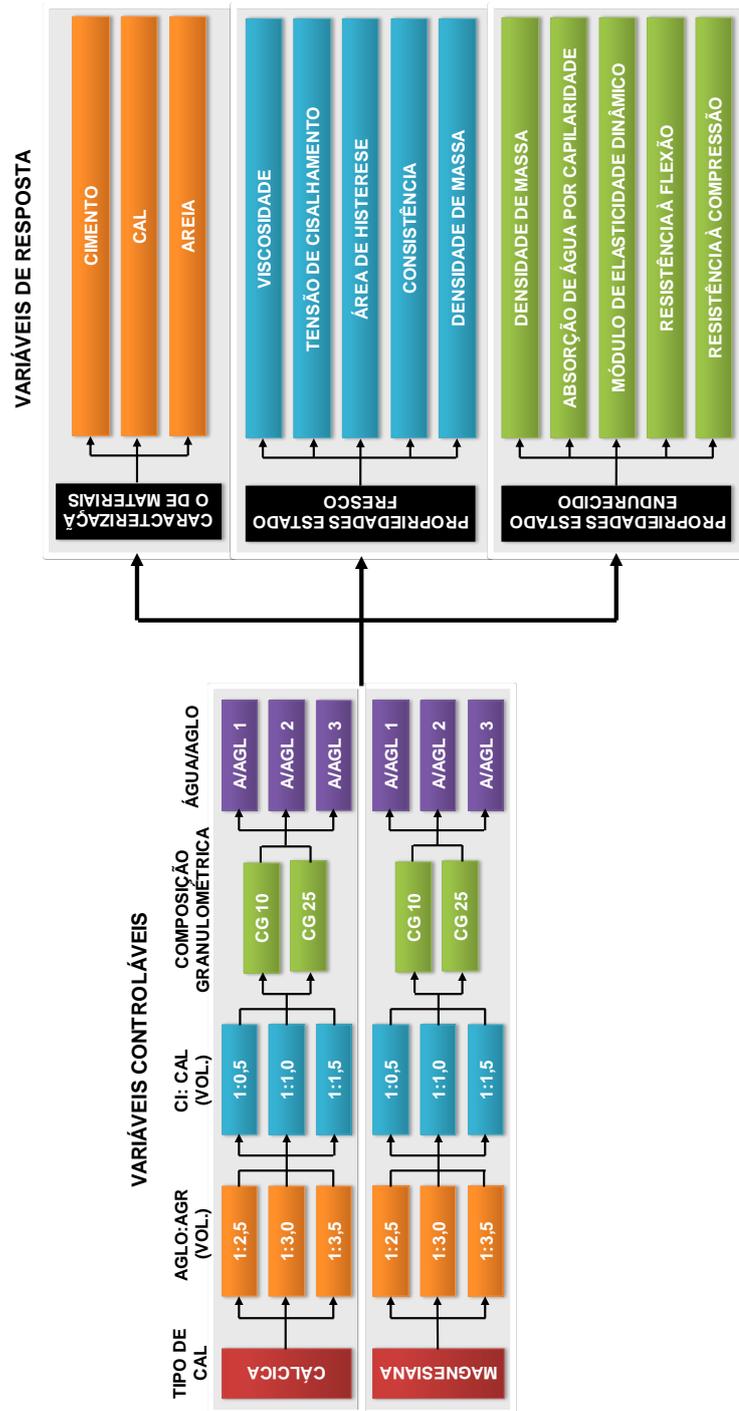
[...] conhecer o seu comportamento quando lançada sobre o substrato, quando está submetida a uma alta taxa de cisalhamento com grande deformação, ou ainda quando está sofrendo acabamento, na condição onde a deformação é pequena e com baixa taxa de cisalhamento.

Apesar de estar sendo muito utilizada na área de caracterização de materiais cimentícios, não há normativa que especifique o ensaio de reometria rotacional. Existem estudos realizados em pasta, como Rago e Cincotto (1999), Seabra *et al.* (2007), Quarcioni (2008), Arizzi *et al.* (2012), Qian e Kawashima (2016), Ruiz-Agudo e Rodriguez-Navarro (2010); com argamassa, como Cardoso (2009), Bauer *et al.* (2007), Kudo (2012), Giroto (2012), Cardoso *et al.* (2014), Stolz (2015), Petry (2015), Paiva (2005); França (2012) e com concreto, como Castro (2007) e Reis (2008). Porém, os trabalhos apresentam diferentes metodologias de ensaio (tipo de reômetro, geometria da palheta, rotina de ensaio, tipo de material avaliado) e objetivos diversos, o que dificulta a comparação dos resultados.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental do trabalho foi definido inicialmente de uma forma, e adaptado de acordo com as limitações verificadas em ensaios exploratórios. O fluxograma é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do programa experimental, contendo variáveis controláveis e variáveis de resposta da pesquisa



(fonte: a autora)

5.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS

De forma a melhor compreender as definições e objetivos deste trabalho, aqui são apresentadas suas variáveis controláveis e de resposta.

5.1.1 Variáveis controláveis

As variáveis controláveis das argamassas foram definidas de acordo com os objetivos do trabalho, de forma que se possa avaliar sua influência nas variáveis de resposta. Estão divididas com relação ao traço da argamassa, tipo de cal hidratada e à composição do agregado miúdo (Figura 7).

Figura 7 – Variáveis controláveis e correspondente codificação

	VARIÁVEIS CONTROLÁVEIS			CODIFICAÇÃO		
	Proporcionamento da Argamassa			Proporcionamento da Argamassa		
AGLOMERANTE:AGREGADO (em volume)	1:2,5	1:3,0	1:3,5	T2,5	T3,0	T3,5
CIMENTO:CAL (em volume)	1:0,5	1:1,0	1:1,5	A0,5	A1,0	A1,5
ÁGUA/AGLOMERANTE	a/agl 1	a/agl 2	a/agl 3	H0,8	H0,9	H1,0
	Cal Hidratada			Cal Hidratada		
TIPO DE CAL	CÁLCICA		MAGNESIANA	CC	CM	
	Agregado Miúdo			Agregado Miúdo		
GRANULOMETRIA AREIA (% retidas nas peneiras de abertura #1,2mm; #0,6mm; #0,3mm; #0,15mm)	25:25:25:25		10:40:40:10	CG25	CG10	

(fonte: a autora)

A definição do proporcionamento das argamassas foi resultante de um conjunto de ensaios exploratórios no reômetro rotacional, uma vez que o programa experimental proposto deveria ser compatível também com a capacidade de torque do equipamento. Não foi possível analisar argamassas com excessivo teor de agregados ou excessivamente viscosas.

As relações aglomerante:agregado foram definidas inicialmente a partir do estudo de Stolz (2015), que trabalhou com o proporcionamento 1:3 (aglomerante:agregado) em volume, considerando areia seca. Propôs-se, inicialmente, expandir a análise para 1:2 e 1:4. Porém, na conversão destes para massa, observou-se uma excessiva quantidade de agregado miúdo, uma vez que, sendo este considerado em volume seco, não era minorado pelo coeficiente de inchamento da areia. Desta forma, optou-se por utilizar o traço em volume considerando areia úmida. Mesmo com esta correção, identificou-se que as argamassas apresentariam relações água/aglomerante extremas, e que seria necessária uma pré-dosagem. Portanto, optou-se por reduzir a amplitude dos proporcionamentos, em volume e

areia úmida, para 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5, objetivando dosar uma faixa estreita de relações água/aglomerante.

Este último fato também influenciou nas relações cimento:cal, as quais inicialmente seriam de 1:0, 1:1, 1:2 e 0:1. Porém, as argamassas apenas de cimento (1:0) ou apenas de cal (0:1) apresentavam relações água/aglomerante extremas, sendo menores no primeiro caso e maiores no segundo. Por tais motivos, a faixa de análise foi reduzida para as relações, em volume, de 1:0,5, 1:1 e 1:1,5, com valores crescentes de cal hidratada.

Os ajustes no traço realizados anteriormente possibilitaram a dosagem da relação água/aglomerante em uma faixa estreita, centrada nos valores de 0,9 e 1,0, e que variava de 0,6 a 1,3. Porém, ainda assim, nem todas as argamassas puderam apresentar os valores centrais citados, conforme verificado nos ensaios exploratórios, uma vez que ficariam excessivamente viscosas ou fluidas.

Com relação à cal hidratada, foram utilizados os tipos cálcica e magnésiana, classificadas como CH I, de acordo com os fabricantes. A variação deste parâmetro tem como objetivo verificar se as características da rocha de origem exercem influência sobre a caracterização das cales e sobre as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. As duas cales não foram maturadas, para serem utilizadas tal como fornecidas pelos fabricantes, em forma de pó; por ter sido verificado seu elevado teor de óxidos hidratados; e por questões de organização laboratorial. Além disso, a NBR 16541 (ABNT, 2016c), que atualmente trata do procedimento de mistura de argamassas para realização de ensaios, não indica a maturação.

As composições granulométricas do agregado miúdo foram escolhidas com base no trabalho de Bonin *et al.* (1999) e Stolz (2015). No primeiro trabalho foram utilizadas 5 composições e avaliada a consistência destas em argamassas com três diferentes traços. Stolz (2015) utilizou três das cinco composições anteriores, na argamassa traço 1:3, para avaliar a viscosidade no estado fresco e a aderência no estado endurecido. Duas obtiveram comportamentos semelhantes (25-25-25-25 e 40-10-10-40, porcentagens de massa retidas nas peneiras de abertura de malha de 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15mm, respectivamente) quando comparadas com a terceira composição (10-40-40-10), mesmo que o coeficiente de uniformidade calculado seja bem diferente, de 3,95, 6,28, e 2,48, respectivamente.

Para o presente trabalho, escolheu-se avaliar as composições que apresentaram comportamentos distintos, sendo elas a CG 25 (25-25-25-25) e a CG 10 (10-40-40-10). Optou-se por trabalhar com a composição (25-25-25-25) em vez da (40-10-10-40) pelo fato da primeira estar indicada como uma composição padrão, presente em normas brasileiras, tais quais a NBR 7215 (ABNT, 1996a), que define o procedimento de ensaio de resistência à compressão do cimento. Além disso, a CG25 representa uma distribuição contínua, com quantidade igual de grãos presentes em todos as frações. A CG 10, por sua vez, constitui uma distribuição uniforme, similar das areias naturais (BONIN *et al.*, 1999).

5.1.2 Variáveis não controladas

O ambiente de mistura das argamassas e de realização do ensaio de reometria rotacional possuíram temperatura e umidade controlados, enquanto que o mesmo não aconteceu no local de realização do ensaio de consistência, por limitações laboratoriais.

5.1.3 Fatores fixos

As variáveis constantes foram definidas de acordo com o objetivo do trabalho, uma vez que não será avaliada sua influência direta sobre as variáveis de resposta. Foi mantido constante na composição o tipo de cimento, CP II F 32, por ser compatível com a utilização em argamassas e ser mais puro, possuindo uma pequena quantidade de adição de material carbonático. Ademais, foram mantidos os equipamentos utilizados, como argamassadeira, mesa de consistência, reômetro rotacional Brookfield, mesa vibratória e prensa servo-hidráulica; os procedimentos de mistura e de ensaio; e os operadores.

5.1.4 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta são resultantes dos ensaios, no estado fresco, de índice de consistência (medida linear de espalhamento da argamassa), de reometria rotacional (tensão de cisalhamento e viscosidade) e de densidade de massa; e no estado endurecido, de densidade de massa, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão e à compressão. Tais parâmetros serão analisados para identificar o comportamento das argamassas de revestimento frente às variáveis controláveis deste trabalho.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão aqui descritos os ensaios realizados tanto para caracterização dos materiais da mistura quanto para caracterização das argamassas.

5.2.1 Ensaio de caracterização dos aglomerantes

Os aglomerantes utilizados (cimento CP II F 32, cal hidratada cálcica e cal hidratada magnésiana) foram caracterizados em sua forma física, química e mecânica, sendo os ensaios, normas utilizadas e local onde foram realizados sintetizados no Quadro 2. Todos os três materiais foram homogeneizados antes da realização das análises. O cimento foi armazenado em bombona metálica, e a amostragem realizada através de coleta em vários e diferentes pontos da mesma. As cales foram armazenadas dentro de sacos, em baldes fechados, e a amostra foi composta pela coleta do material mais interno de todos os baldes que continham uma mesma cal.

Quadro 2 – Ensaio de caracterização do cimento CP II F 32 e das cales hidratadas

Ensaio	CP II F 32	Cales Hidratadas	Norma	Local de realização	
Análises Físicas	Granulometria a Laser	X	X	-	LACER/UFRGS
	BET	X	X	-	LACER/UFRGS
	Finura Cimento	X	-	NBR 11579 (ABNT, 2012)	LAMTAC/UFRGS
	Finura Cal	-	X	NBR 9289 (2000b)	LAMTAC/UFRGS
	Massa Específica	X	X	NBR NM 23 (ABNT, 2001a)	LAMTAC/UFRGS
	Massa Unitária	X	X	-	LAMTAC/UFRGS
	Potencial Zeta	X	X	-	QUIMLABOR/UFRGS
	Plasticidade	-	X	NBR 9206 (2016a)	CIENTEC
	Incorporação de Areia	-	X	NBR 9207 (2000a)	CIENTEC
Retenção de Água	-	X	NBR 9290 (ABNT, 1996b)	LAMTAC/UFRGS	
Análises Químicas	FRX	X	X	-	LACER/UFRGS
	TGA	X	X	-	DEQUI/UFRGS
	DRX	X	X	-	LACER/UFRGS
	Umidade	-	X	NBR 6473 (ABNT, 2003a)	QUIMLABOR/UFRGS
	CO ₂	-	X	NBR 6473 (ABNT, 2003a)	QUIMLABOR/UFRGS
	Composição Química	-	X	NBR 6473 (ABNT, 2003a)	QUIMLABOR/UFRGS
Análise por Imagem	MEV e EDS	X	X	-	CMM/UFRGS
Análise Mecânica	Resistência à compressão	X	-	NBR 7215 (ABNT, 1996a)	LAMTAC/UFRGS

(fonte: a autora)

5.2.1.1 Granulometria à laser

A granulometria à laser (GL) permite identificar a quantidade de partículas nos diâmetros entre 0,04µm e 2500µm. O preparo consistiu em passar os materiais na peneira de abertura de malha de 300µm, de forma a desaglomerá-los, sendo após armazenados em eppendorfs e encaminhados para análise. O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, com o equipamento Cilas 1180, com os seguintes padrões: solvente: álcool isopropílico; tempo de ultrassom: 60, 120 e 180 segundos; intervalo de análise: 0,04µm a 2500µm; programa de análise: MIE; índice de refração do cimento: 1.70; índice de refração do hidróxido de cálcio: 1.57.

5.2.1.2 Área superficial específica – BET

O ensaio, realizado no equipamento Nova Station A do LACER/UFRGS, permite identificar a área superficial dos grãos do material através do método de BET. Assim como na granulometria a laser, o preparo consistiu na desaglomeração dos materiais através de sua passagem pela peneira de 300µm, e armazenamento em eppendorfs, sendo posteriormente encaminhados para o ensaio.

5.2.1.3 Finura

O ensaio de finura foi realizado conforme as normativas respectivas para cada material. No caso do CP II F 32, a NBR 11579 (ABNT, 2012) prescreve o método de ensaio para a determinação do índice de finura do cimento de acordo com o material retido na peneira de 75 μ m de abertura de malha, após procedimento de agitação deste material seco.

A determinação da finura das cales foi baseada na NBR 9289 (ABNT, 2000b), a qual visa determinar a quantidade de material retido nas peneiras de abertura de malha de 600 μ m e de 75 μ m, após peneiramento por processo úmido. O ensaio não foi realizado com o equipamento indicado na normativa por indisponibilidade do mesmo, sendo a cal umedecida e peneirada com o auxílio de um pisseta com água.

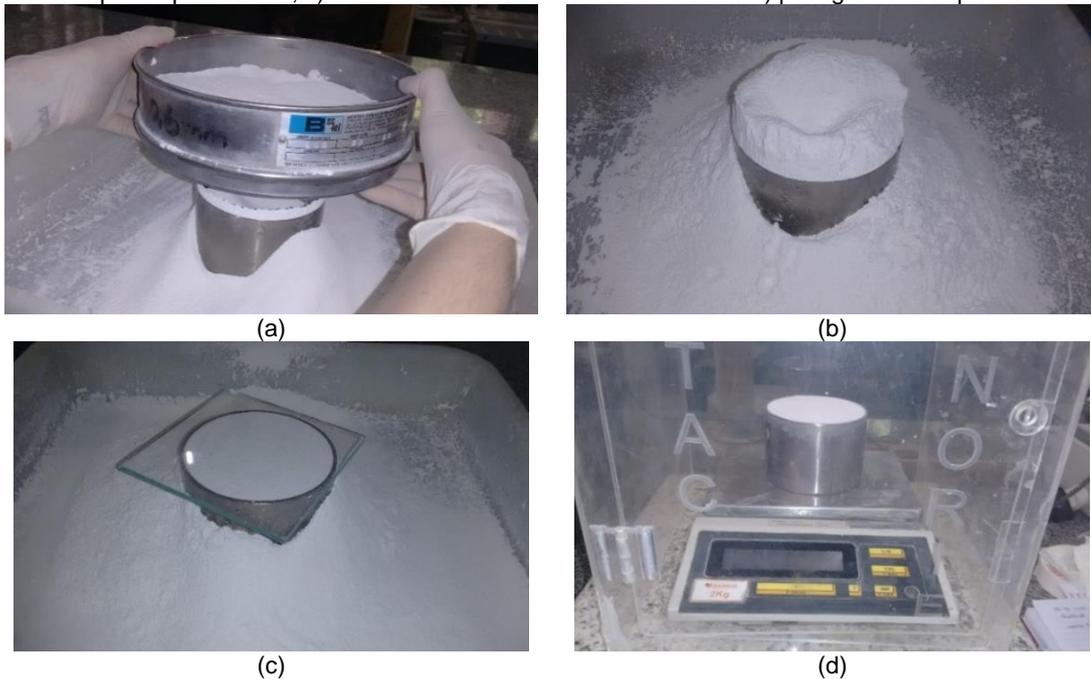
Ambos os ensaios foram realizados no LAMTAC/NORIE/UFRGS.

5.2.1.4 Massa específica e massa unitária

A massa específica, tanto do cimento quanto das cales, foi realizada conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001a).

Não existe norma brasileira para determinação da massa unitária de materiais em pó, tendo sido definido um procedimento padrão para sua definição (Figura 8). A amostra do material em pó primeiramente foi desaglomerada passando-a pela peneira de abertura de malha de 600 μ m. O procedimento consistia em passar o material por esta mesma peneira, de forma que o passante se acomodasse em um recipiente cilíndrico calibrado com volume de 481,88cm³, situado a 5 cm abaixo da peneira. Ao preencher todo o recipiente, o material foi nivelado, deslizando-se um vidro horizontalmente, apoiado nas bordas. Por fim, o conjunto foi limpo e pesado. A massa unitária foi calculada dividindo-se a massa do material pelo volume do recipiente. Foram realizadas 7 determinações em cada caso, e a média foi considerada a massa unitária do aglomerante. Ambos os ensaios foram realizados no LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 8 – Procedimento para determinação da massa unitária do cimento e das cales: a) peneiramento do material em pó sobre o recipiente com volume calibrado; b) aspecto final do recipiente preenchido; c) nivelamento do excedente com vidro e d) pesagem do recipiente

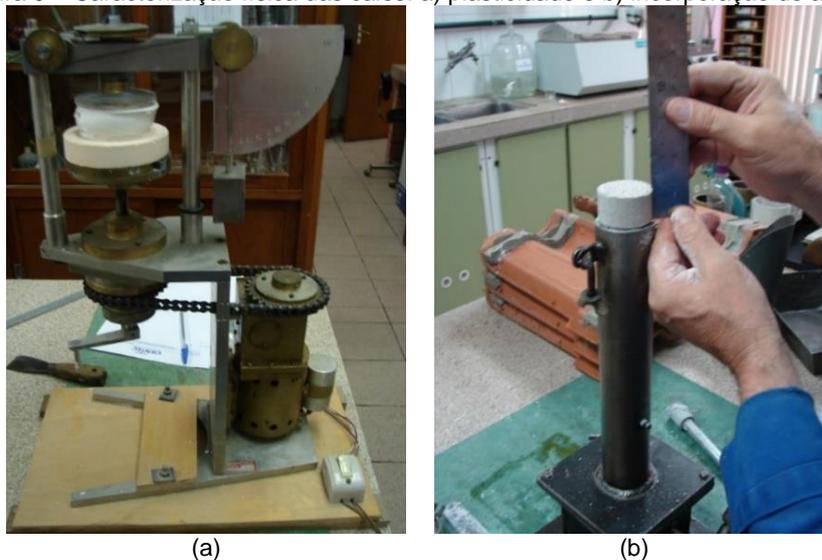


(fonte: a autora)

5.2.1.5 Plasticidade, incorporação de areia e retenção de água

Os ensaios para definição da plasticidade no plasticímetro de Emley e da incorporação de areia no plastômetro de Voss (Figura 9) foram realizados conforme as NBR 9206 (ABNT, 2016a) e NBR 9207 (ABNT, 2000a), respectivamente, pela Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC). A retenção de água, conforme NBR 9290 (ABNT, 1996b) foi determinada no LAMTAC/NORIE/UFRGS. Os três ensaios visavam a caracterização física das cales hidratadas, conforme requisitos da NBR 7175 (ABNT, 2003b).

Figura 9 – Caracterização física das cales: a) plasticidade e b) incorporação de areia



(fonte: CIENTEC, 2017)

5.2.1.6 Fluorescência de raios X

O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) permitiu identificar o percentual de óxidos existentes nos aglomerantes. Amostras dos aglomerantes foram moídas até completa passagem pela peneira de malha 0,053 mm, estocadas em eppendorfs, e encaminhadas para o ensaio. O ensaio foi realizado com o equipamento Shimadzu modelo XRF1800, *standardless* (sem padrão), no LACER/UFRGS.

5.2.1.7 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (ATG) apresenta a perda de massa do material conforme o aumento de temperatura, o que permite identificar os compostos do mesmo. A amostra dos aglomerantes foi preparada da mesma forma que para o ensaio de FRX. Foi realizado na Central Analítica do Departamento de Química (DEQUI) na UFRGS, com o equipamento SDT Q600 - TA Instruments, e os seguintes padrões: massa inicial: aproximadamente 10mg; atmosfera: nitrogênio; intervalo de temperatura: ~25°C até 1000°C; taxa de aquecimento: 10°C/min.

5.2.1.8 Difração de raios X

O ensaio de difração de raios X (DRX) resulta em informações referentes à estrutura cristalina do material. As amostras dos aglomerantes foram preparadas com o mesmo processo descrito para a FRX. Foi executado no LACER/UFRGS, com o Difratorômetro Phillips X'Pert MPD, com tubo cerâmico PW 3373/00 e detector PW 3011/10, utilizando os seguintes parâmetros: intervalo de análise [2 θ]: 5° a 75° (cimento), 5° a 90° (cales); tamanho do passo [2 θ]: 0,05°/1s; fendas: 1/2°; janelas: 20mm; PRS: 0,3mm.

O resultado foi analisado com o software PANalytical X'Pert HighScore Plus, utilizando-se as fichas PDF (*Powder Diffraction Files*).

5.2.1.9 Potencial Zeta

As forças que provocam a atração ou repulsão entre as partículas de misturas dependem de diversas características, como a composição dos materiais, áreas superficiais, cargas eletrostáticas, entre outros. Em um fluido, quando as partículas se movimentam, existe uma distância entre as partículas e a camada do fluido, que pode ser cisalhada. A medida desta distância a partir da superfície da partícula até a camada de fluido denomina-se plano de cisalhamento. O potencial eletrostático neste plano é denominado potencial zeta (ξ). Este potencial é medido em milivolts (mV) e varia de + 100mV a - 100mV. Quando o potencial zeta fica próximo de zero, normalmente valores entre + 10mV e - 10mV, ocorre a floculação. Já entre os valores maiores, acima de + 60mV ou abaixo de - 60mV, remete-se a suspensões em alto grau de defloculação (DINGER, 2006).

O ensaio de potencial zeta para análise das cargas elétricas da superfície dos aglomerantes foi realizado pela QuimLabor Jr., empresa júnior da UFRGS, com equipamento zetaSIZER da

Brookhaven Instrument. As amostras foram dispersas em água deionizada na concentração de 0,05%, de pH 12 e temperatura de 20°C.

5.2.1.10 Composição química, umidade e perda ao fogo

Os ensaios de definição da umidade e perda ao fogo da cal hidratada cálcica foram executados pela QuimLabor Jr., conforme as seções 6.1 e 6.2, respectivamente, da NBR 6473 (ABNT, 2003a). A cal cálcica teve a composição de CaO total, MgO e SO₃ identificadas pela QuimLabor Jr. a partir da NBR 6473 (ABNT, 2003a), conforme as seções 6.6, 6.7 e 6.8, respectivamente.

5.2.1.11 Microscopia eletrônica de varredura e EDS

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e *energy-dispersive spectroscopy* (EDS) foi realizada para caracterização morfológica e química dos três aglomerantes utilizados, no equipamento Zeiss EVO MA10 no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM) da UFRGS. Nos stubs, foi aplicada uma fita de carbono duplamente adesiva. Sobre esta, o material em pó foi depositado e pressionado com auxílio de uma pinça na parte superior e, posteriormente, o material em excesso foi aspergido para a parte inferior da fita com auxílio de uma bomba de ar. Foram utilizados dois stubs para cada aglomerante, sendo um deles metalizado com ouro (Au), e outro com carbono (C).

Na parte inferior dos stubs metalizados com ouro, onde o material estava disperso, foram obtidas as imagens do formato e dimensão das partículas, utilizando-se energia de 8kV e magnitudes que variaram de 2.000 vezes a 15.000 vezes.

Na parte superior dos stubs, no local de maior aglomeração de partículas, foi realizado o ensaio de EDS, uma análise dos elementos existentes. O EDS foi realizado tanto nas amostras com metalização de ouro, em uma linha, quanto naquelas com carbono, em linha e em diversos pontos. A diferença consiste que, no primeiro caso, o elemento ouro pode ser removido da quantificação, pois sabe-se que não está presente na amostra. No entanto, no segundo caso, não se pode excluir o elemento carbono pois está presente na amostra, e, desta forma não se tem certeza da sua real quantificação.

5.2.1.12 Resistência à compressão

A caracterização do cimento quanto à propriedade mecânica de resistência à compressão foi realizada conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996a) no LAMTAC/NORIE/UFRGS. Os resultados foram corrigidos de acordo com a altura do corpo de prova, como indicado na NBR 5739 (ABNT, 2007), que trata da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto.

5.2.2 Ensaios de caracterização do agregado miúdo

Utilizou-se agregado miúdo do tipo quartzoso, originado de leito de rio, de duas granulometrias, uma média e outra grossa. Foi seco em estufa e peneirado, por procedimento mecânico, de forma a se obter quatro frações, conforme Quadro 3 da NBR 7214 (ABNT, 2015). As frações foram homogeneizadas entre si e armazenadas em bombonas. Posteriormente, foram proporcionadas de forma a compor as duas granulometrias definidas no trabalho.

Quadro 3 – Denominação e definição das frações granulométricas do agregado miúdo

Denominação da fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3 mm e 0,15 mm

(fonte: NBR 7214 (ABNT, 2015))

Os ensaios físicos, realizados no LAMTAC/NORIE/UFRGS, são apresentados no Quadro 4, e descritos a seguir:

Quadro 4 – Ensaios de caracterização do agregado miúdo

	Ensaio	Norma	Local de realização
Análises Físicas	Composição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2001c)	LAMTAC/UFRGS
	Módulo de Finura e Dimensão Máxima	NBR NM 248 (ABNT, 2001c)	LAMTAC/UFRGS
	Diâmetro Efetivo e Coeficiente de Uniformidade	-	LAMTAC/UFRGS
	Massa Específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	LAMTAC/UFRGS
	Massa Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	LAMTAC/UFRGS
	Absorção de Água	NBR NM 30 (ABNT, 2001b)	LAMTAC/UFRGS
Análise por imagem	Lupa Estereoscópica	-	LAMTAC/UFRGS

(fonte: a autora)

5.2.2.1 Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima

As frações peneiradas tiveram sua composição granulométrica normal e intermediária caracterizadas, com duas amostras, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2001c). Esta caracterização serviu como controle do processo de peneiramento, sendo permitido um máximo de 10% de erro, ou seja, de material com granulometrias que não aquela correspondente à da fração. Caso este erro fosse maior que 10%, a fração era peneirada e caracterizada novamente.

O proporcionamento destas frações, de acordo com as composições propostas neste trabalho, permitiu comparar as curvas granulométricas teóricas com as reais. A partir destes proporcionamentos também foram definidas as dimensões máximas e calculados os módulos de finura, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2001c).

5.2.2.2 Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade

A partir das curvas granulométricas determinadas anteriormente, foi possível definir o D_{10} e o D_{60} . Com eles, foi possível calcular o diâmetro efetivo e o coeficiente de uniformidade, de acordo com a Equação 6 e a Equação 7, definidas no item 3.1.2.1 deste documento.

5.2.2.3 Massa específica e unitária, absorção de água e volume de vazios

A massa específica do agregado miúdo foi realizada para as areias originais, média e grossa, separadamente, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009a). Para este procedimento, foi necessário atingir a condição do agregado saturado internamente e com superfície seca, o qual foi comparado com o estado completamente seco, resultando na absorção de água, conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001b).

A massa unitária e índice de vazios das duas composições granulométricas, CG10 e CG25 foi realizada conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), de acordo com o “método C”, o qual caracteriza o agregado no estado solto, não compactado. Com esta mesma referência, foi possível calcular o índice de volume de vazios de cada um dos proporcionamentos da areia.

5.2.2.4 Imagens em lupa estereoscópica

A fim de identificar a dimensão, formato, textura e estrutura das partículas do agregado miúdo, foram obtidas imagens, tanto das frações intermediárias dos agregados, quanto das composições granulométricas utilizadas, com o Zeiss Stemi 2000-c Stereomicroscope, o qual possui aumento máximo de 100x.

5.2.3 Dosagem e preparo das argamassas

O proporcionamento da argamassa, desmembrado na Figura 10, está em volume e considerando-se a areia úmida.

Figura 10 – Proporcionamento em volume (areia úmida) das argamassas

		PROPORCIONAMENTO DA ARGAMASSA CIMENTO:CAL:AREIA (EM VOLUME, AREIA ÚMIDA) ÁGUA/AGLOMERANTE (EM MASSA)					
		AGLOMERANTE:AGREGADO (VOLUME)					
		1:2,5		1:3,0		1:3,5	
CIMENTO:CAL (VOLUME)	1:0,5	1:0,5:3,8	a/agl 1	1:0,5:4,5	a/agl 1	1:0,5:5,3	a/agl 1
			a/agl 2		a/agl 2		a/agl 2
			a/agl 3		a/agl 3		a/agl 3
	1:1,0	1:1:5	a/agl 1	1:1:6	a/agl 1	1:1:7	a/agl 1
			a/agl 2		a/agl 2		a/agl 2
			a/agl 3		a/agl 3		a/agl 3
	1:1,5	1:1,5:6,3	a/agl 1	1:1,5:7,5	a/agl 1	1:1,5:8,8	a/agl 1
			a/agl 2		a/agl 2		a/agl 2
			a/agl 3		a/agl 3		a/agl 3

(fonte: a autora)

O proporcionamento anterior foi transformado para um traço em massa, através da média da massa unitária dos materiais secos e do coeficiente de inchamento da areia estimado para os agregados miúdos, obtido no trabalho de Selmo (1989) (Tabela 3). Utilizou-se para tal a Equação 14, Equação 15 e Equação 16, sendo as duas últimas apresentadas também no trabalho de Selmo (1989). Esta conversão foi realizada para manter as massas de materiais constantes nas argamassas com diferentes tipos de cal e diferentes composições granulométricas da areia, a fim de facilitar o procedimento de dosagem e reduzir variabilidades.

Tabela 3 – Massas unitárias consideradas para o proporcionamento

Massa Unitária (g/cm³)		
	Medida	Utilizada
CP II F 32	0.95	0.95
Cal Hidratada Cálcica	0.45	0.45
Cal Hidratada Magnésiana	0.45	
CG25	1.52	
CG10	1.47	1.51
CG40*	1.56	
Coeficiente de Inchamento da Areia		
	Utilizado	1.3

*Granulometria não utilizada no trabalho

(fonte: a autora)

$$M_c = \frac{V_c * MU_c}{MU_c} \quad \text{Equação 14}$$

$$M_{cal} = \frac{V_{cal} * MU_{cal}}{MU_c} \quad \text{Equação 15}$$

$$M_a = \frac{V_a * MU_a}{CI_a * MU_c}$$

Equação 16

Onde:

M: massa;

V: volume;

MU: massa unitária;

CI: coeficiente de inchamento;

c: cimento;

cal: cal;

a: areia.

Após este cálculo, a massa de cal foi arredondada para valores múltiplos de 0,25, o que fez com que as relações cimento:cal em volume aumentassem para 1:0,53, 1:1,06 e 1:1,58. Porém, neste trabalho, continuarão a serem indicadas como 1:0,5, 1:1 e 1:1,5. A areia foi recalculada de modo a manterem-se as proporções em volume aglomerante:agregado de 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5.

O proporcionamento em massa e materiais secos está indicado na Figura 11. Observa-se que o aumento na massa de cal é de 0,25 unidades de massa conforme aumenta-se a relação cimento:cal. E o aumento da areia também é proporcional conforme aumenta a relação cimento:cal (de 0,95, 1,25 e 1,55 unidades de massa) e aglomerante:agregado (de 1,65, 1,95 e 2,25 unidades de massa).

Figura 11 – Proporcionamento em massa e materiais secos das argamassas

		PROPORCIONAMENTO DA ARGAMASSA CIMENTO:CAL:AREIA (EM MASSA, MATERIAIS SECOS) ÁGUA/AGLOMERANTE (EM MASSA)					
		AGLOMERANTE:AGREGADO (VOLUME)					
		1:2,5		1:3,0		1:3,5	
CIMENTO:CAL (VOLUME)	1:0,5	1:0,25:4,65	0,6	1:0,25:5,60	0,7	1:0,25:6,55	0,9
			0,7		0,8		1,0
			0,8		0,9		1,1
	1:1,0	1:0,5:6,3	0,7	1:0,5:7,55	0,9	1:0,5:8,8	1,0
			0,8		1,0		1,1
			0,9		1,1		1,2
	1:1,5	1:0,75:7,95	0,8	1:0,75:9,50	0,9	1:0,75:11,05	1,1
			0,9		1,0		1,2
			1,0		1,1		1,3

(fonte: a autora)

Os traços unitários, apresentados na Figura 11, foram utilizados para calcular a quantidade de cimento, cal e areia, de forma que os materiais secos somassem 2,5Kg para o

procedimento de mistura. Esta massa foi considerada o limite máximo comportado pela cuba da argamassadeira, de forma que o material não fosse expulso do recipiente e que ocorresse uma completa homogeneização, bem como fosse possível a realização dos ensaios principais da pesquisa no estado fresco (necessário 1kg para uma determinação da consistência e 1,5kg para as três reometrias), além de estar preconizado na NBR 16541 (ABNT, 2016c).

A cal e o cimento foram pesados nas quantidades necessárias e armazenados em sacos plásticos, separadamente. As frações de areia foram secas em estufa a 105°C por, no mínimo, 24h. Quando retiradas, aguardava-se esfriarem, e eram pesadas conforme as diferentes composições granulométricas, sendo após armazenadas em sacos plásticos até o momento da moldagem.

Para argamassas mistas de cimento e cal hidratada, a antiga NBR 13276 (ABNT, 2005a) preconizava o procedimento de mistura inicial de cal hidratada, areia e água de 16 a 24 horas antes da mistura final com o cimento. A NBR 16541 (ABNT, 2016c), que trata atualmente do preparo da mistura de argamassa para ensaios de laboratório, não apresenta este processo como um requisito.

Momentos antes da moldagem misturava-se o cimento com a cal a seco e, separadamente, era homogeneizado o agregado miúdo. Com os materiais preparados, iniciava-se o procedimento de mistura. A argamassadeira utilizada, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996a), possuía misturador com giro em torno de seu próprio eixo e em torno do eixo do recipiente, em sentidos contrários. Para definição do procedimento, tempo e velocidade de mistura, foram observadas diversas normativas. A antiga NBR 13276 (ABNT, 2005a) indicava o tempo de mistura final da argamassa de cal hidratada com o cimento de 4 minutos, em velocidade baixa. A NBR 16541 (ABNT, 2016c) modificou o procedimento, recomendando-se a mistura de todos os materiais anidros primeiramente, e a colocação posterior de água, em duas etapas, bem como alternando a velocidade do misturador. No caso da NBR 7200 (ABNT, 1998), que trata do procedimento de execução de argamassas, é recomendado tempo de mistura entre 3 e 5 minutos. Por fim, a NBR 7215 (ABNT, 1996a), embora não trate especificamente de argamassas de revestimento, sugere um procedimento que preconiza a mistura inicial da água com os aglomerantes e, posteriormente, com o agregado miúdo, também alternando a velocidade do misturador.

A partir das normas anteriores, foi estabelecido um procedimento de mistura padrão, que atendesse ao critério de homogeneização da argamassa na seguinte sequência:

- a) primeiramente a água foi despejada dentro da cuba da argamassadeira;
- b) assim que ligada na velocidade baixa, o cimento e a cal, previamente misturados, eram despejados em até 30 segundos;
- c) em seguida, era acrescentado o agregado miúdo, também por 30 segundos. Misturava-se tudo por mais 30 segundos, ainda em velocidade baixa;

- d) por um período de 90 segundos, a argamassadeira era desligada, de modo a ser retirado manualmente o material retido no fundo e nas bordas da cuba, bem como no misturador;
- e) quando ligada novamente, em velocidade baixa, o material era misturado por mais 150 segundos.

O procedimento total durava 5 minutos e 30 segundos, sendo que a mistura mecânica totalizava 4 minutos. A mistura foi realizada em ambiente com temperatura e umidade controlados. Em seguida, a argamassa foi submetida aos ensaios do estado fresco.

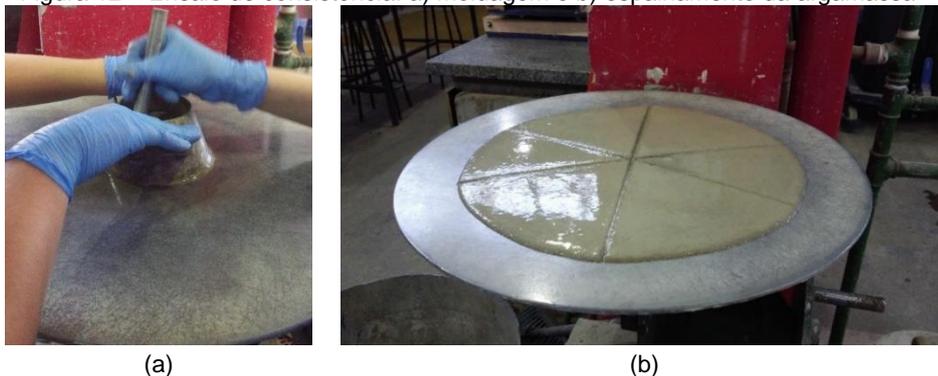
5.2.4 Ensaios do estado fresco

Primeiramente, foi moldada uma amostra de argamassa para o ensaio de reometria rotacional. Em seguida, determinado o índice de consistência sendo que, durante e após este, foram realizadas as outras duas moldagens para o ensaio de reometria rotacional. Após, toda a argamassa foi misturada novamente por 30 segundos em velocidade baixa para realização do ensaio de densidade de massa no estado fresco. Por fim, após mistura de mais 30 segundos em velocidade baixa, a argamassa foi moldada em três corpos de prova de 4x4x16cm, em fôrmas previamente preparadas com uma fina película de desmoldante (na parte inferior e laterais) e com plástico filme (nas duas bases, pois uma destas entraria em contato com a água no ensaio de absorção de água por capilaridade). A moldagem foi realizada em duas camadas e o adensamento ocorreu em mesa vibratória durante 8 segundos cada camada.

5.2.4.1 Índice de consistência

O ensaio de determinação do índice de consistência (Figura 12) foi realizado de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016b). As argamassas foram submetidas a este procedimento logo após a mistura, sendo realizado uma única vez.

Figura 12 – Ensaio de consistência: a) moldagem e b) espalhamento da argamassa



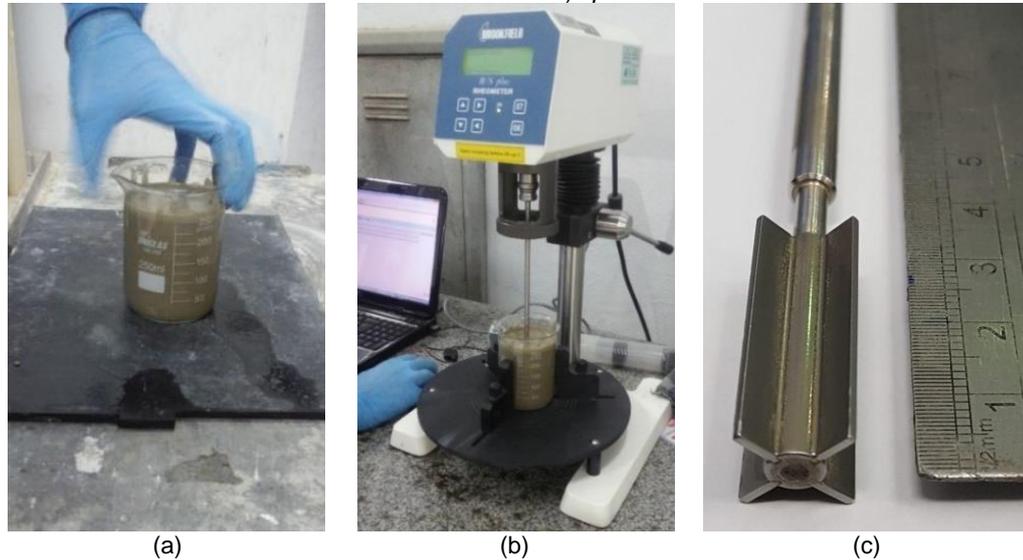
(fonte: a autora)

5.2.4.2 Reometria rotacional

Após a mistura, a argamassa era moldada em um béquer padrão de 250mL, em duas camadas de alturas semelhantes, sendo cada uma delas submetidas a vibração durante 5

segundos em mesa vibratória (Figura 13a). A segunda e terceira amostras eram moldadas durante o ensaio de reometria rotacional das anteriores. Portanto, o volume ensaiado e o procedimento de moldagem foram mantidos sempre iguais.

Figura 13 – Ensaio de reometria rotacional: a) moldagem da argamassa no béquer, b) reômetro rotacional Brookfield R/S Plus e c) *spindle* Vane V30X15



(fonte: a autora)

Em seguida à moldagem, a argamassa era submetida ao ensaio no reômetro rotacional, modelo Brookfield R/S Plus Modelo 4SST 115LS (Figura 13b). Este equipamento atua para rotinas com taxa de cisalhamento controlada, caso deste trabalho, ou tensão de cisalhamento controlada. Possui as seguintes características, sendo as últimas três (e, f e g) dependentes do *spindle*⁶ utilizado (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]a, p. 53):

- a) Intervalo de torque: 1,5 a 50 mNm;
- b) Resolução do torque: 0,1 mNm;
- c) Intervalo de velocidade: 0,1 a 1000 RPM;
- d) Resolução do ângulo: 15,7 μ rad;
- e) Intervalo de taxa de cisalhamento: 0,9 a 4×10^4 s^{-1} ;
- f) Intervalo de tensão de cisalhamento: 0,7 a $3,4 \times 10^4$ Pa;
- g) Intervalo de viscosidade: 1×10^{-3} a 3×10^3 Pa.s.

Utilizou-se o *spindle* tipo Vane de 30 mm de altura e 15 mm de diâmetro – V30X15 (Figura 13c). Este tipo é comumente utilizado em testes de argamassa por autores como Bauer *et al.* (2007), Giroto (2012) e Stolz (2015), cujos resultados se apresentaram confiáveis (ALVES, 2002), além deste consistir em (SOUSA, 2005, p. 73):

⁶*Spindle* é a palheta fixada à haste, utilizada para rotacionar o material no reômetro.

[...] método simples, porém que se mostrou eficiente, para se medir as propriedades de fluidos não-newtonianos que exibem grande efeito de deslizamento em superfícies lisas, comuns aos dispositivos utilizados nos diferentes tipos de reômetros (por exemplo, os reômetros de discos paralelos ou cilindro coaxial).

A geometria do *spindle* foi escolhida de acordo com a disponibilidade, e pelo fato de cada uma das suas quatro abas possuírem largura de 7,5mm, ou seja, 3,15 vezes o diâmetro máximo do agregado miúdo utilizado. Os *spindles* maiores disponíveis, V60X30 e V40X20, foram testados em ensaios preliminares; porém, não executavam o ensaio em argamassas mais viscosas, sendo informado que o torque máximo havia sido atingido. A outra palheta disponível, V20X10, não foi testada, por motivo de possuir a largura das abas de 5mm, apenas 2,10 vezes o diâmetro máximo do agregado miúdo utilizado.

Associado às características do equipamento e à geometria do *spindle* V30X15, o intervalo de medida da tensão de cisalhamento abrangia de 121Pa a 4040Pa (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]a). Dentre este, foi possível caracterizar argamassas mais viscosas e mais fluidas, com índices de consistência entre 180mm e 350mm.

Utilizando-se dimensões do *spindle* escolhido, é possível calcular um primeiro fator de conversão, através da Equação 17. Com este e com o fator BU (Brabender Units), igual a 2 para este caso, é possível realizar a conversão de torque (N.m) para tensão de cisalhamento (Pa) através da Equação 18. Tanto a informações do primeiro quanto do segundo fator já estão inseridos na base de dados do reômetro como parte das configurações do reômetro e da palheta V30X15 (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]a).

$$f_1 = \frac{10^{-4}}{\pi D^3} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)^{-1} \quad \text{Equação 17}$$

$$\tau = T * f_1 * f_2 * 10^5 \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

f_1 é o fator de conversão da tensão de cisalhamento relacionado com o *spindle*;

H é altura do *spindle* vane [m];

D é o diâmetro do *spindle* vane [m];

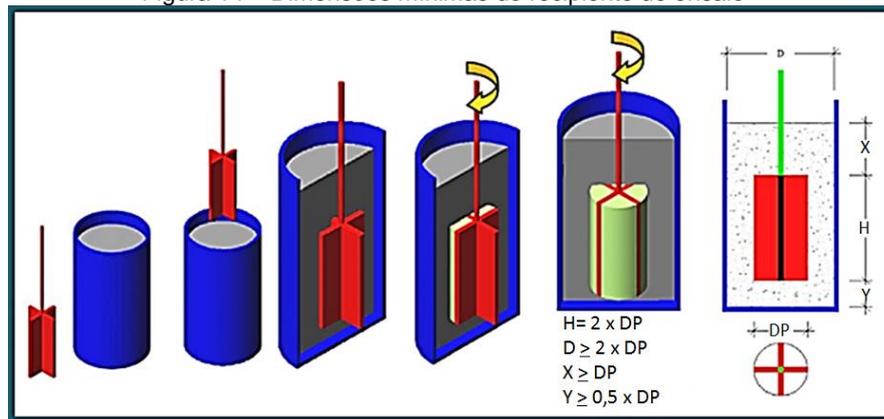
τ é a tensão de cisalhamento [Pa];

T é o torque [N.m];

f_2 é o fator de conversão BU, igual a 2.

A escolha do béquer de capacidade de 250ml foi motivada por suas dimensões, as quais se enquadram nas indicações de Hoppe Filho *et al.* (2006) para execução do Vane Test com este tipo de palheta em viscosímetros (Figura 14). Assim como este autor, o manual do *spindle* Vane (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]b) indica que a relação mínima entre o diâmetro do recipiente e do Vane seja de duas vezes; porém, determina que a distância entre o fundo do recipiente e o final da palheta seja maior ou igual que o diâmetro do Vane.

Figura 14 – Dimensões mínimas do recipiente de ensaio

(fonte: HOPPE FILHO *et al.*, 2006)

Por sua vez, no manual do usuário do Reômetro Brookfield R/S Plus (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]a), é dito que o sistema de medição com o *spindle* do tipo Vane tem melhores resultados quando a relação entre o diâmetro do Vane e do recipiente é menor que 0,75, o que permite uma melhor dispersão das partículas maiores; e sugere a imersão deste *spindle* em recipientes com o dobro de sua altura, de modo que exista uma distância mínima deste ao fundo do recipiente. Este mesmo manual indica a modificação do fator k_{γ} (Equação 19) quando o diâmetro do Vane e do recipiente possuem relação maior que 0,2. Este valor também foi inserido na base de dados do reômetro como parte das configurações da palheta V30X15.

$$k_{\gamma} = \frac{0,2094}{1 - b^2}$$

Equação 19

Onde:

k_{γ} é o fator relacionado à taxa de cisalhamento [min/s];

b é a relação entre o diâmetro do vane e o diâmetro do recipiente [adimensional].

O cálculo das dimensões mínimas do recipiente, conforme autores anteriores, as dimensões do béquer utilizado, e os fatores de correção são apresentadas na Tabela 4. Observa-se que o diâmetro e a altura do béquer atenderam a todas as recomendações.

Para posicionar o Vane no recipiente, primeiramente foi utilizado um gabarito de papel que o centralizava e, posteriormente, este era inserido até que a marcação em sua haste, realizada de acordo com as recomendações, estivesse alinhada com o topo do béquer, indicando que o mesmo se encontrava na profundidade desejada.

Tabela 4 – Dimensões do *spindle Vane*, do recipiente a ser utilizado e fatores associados

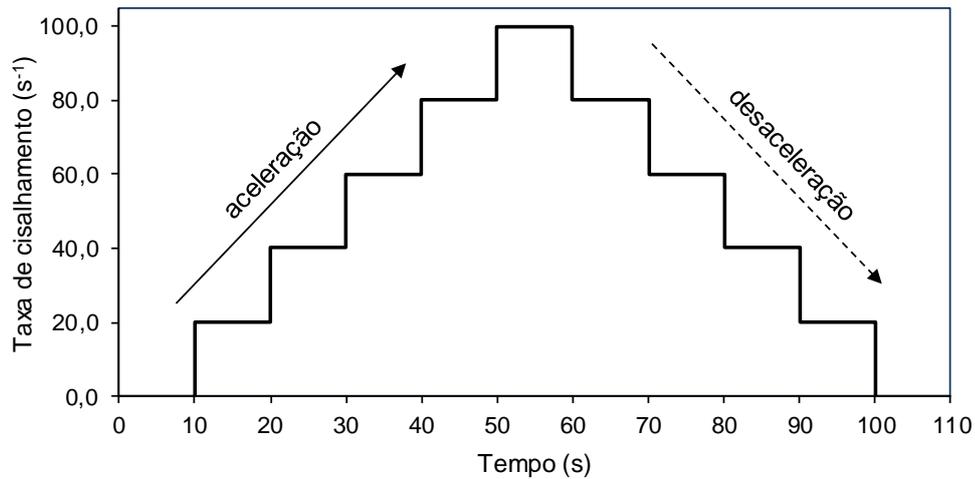
Dados do Spindle Vane		
Diâmetro	$D_V = 15 \text{ mm}$	
Altura	$H_V = 30 \text{ mm}$	
Dimensões recomendadas (HOPPE FILHO <i>et al.</i>, 2006)		
Diâmetro do recipiente	$D_R \geq 2 * D_V$	$D_R \geq 30 \text{ mm}$
Distância ao topo	$X \geq D_V$	$X \geq 15 \text{ mm}$
Distância ao fundo	$Y \geq 0,5 * D_V$	$Y \geq 7,5 \text{ mm}$
Altura do recipiente	$H_R = Y + H_V + X$	$H_R = 52,5 \text{ mm}$
Dimensões recomendadas (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]b)		
Diâmetro do recipiente	$D_R \geq 2 * D_V$	$D_R \geq 30 \text{ mm}$
Distância ao fundo	$Y \geq D_V$	$Y \geq 15 \text{ mm}$
Dimensões recomendadas (BROOKFIELD, [entre 2005 e 2017]a)		
Diâmetro do recipiente	$D_R \geq D_V / 0,75$	$D_R \geq 20 \text{ mm}$
Altura do recipiente	$H_R = 2 * H_V$	$H_R = 60 \text{ mm}$
Dimensões do béquer de 250 mL utilizado		
Diâmetro do recipiente (interno)		$D_R = 66 \text{ mm}$
Altura do recipiente (interno, até marca de 250 mL)		$H_R = 72 \text{ mm}$
Distância ao topo (aprox.)		$X = 21 \text{ mm}$
Distância ao fundo (aprox.)		$Y = 21 \text{ mm}$
Cálculo dos fatores de conversão f1 e f2		
Fator 1	$f1 = ((10^{-4}) / (\pi D^3)) * ((H/D + 1/3)^{-1})$	4.043
Fator 2 (BU)		2
Cálculo do fator ky		
b	$b = D_V / D_R$	$b = 0,2273$
ky	$ky = 0,2094 / (1 - b^2)$	$ky = 0,2208 \text{ min/s}$

(fonte: a autora)

Não existe normativa para o ensaio de reometria rotacional em argamassas. Foi adaptada a rotina de ensaio utilizada por Stolz (2015) e Petry (2015), do tipo taxa de cisalhamento controlado, uma vez que pretendia-se explicar o fenômeno ocorrido no trabalho da primeira autora. Na primeira etapa da rotina, de aceleração, a taxa de cisalhamento aplicada variou de 0 s^{-1} a 100 s^{-1} em patamares, utilizando o mesmo intervalo de medição adotado pela referida autora. Porém ampliou-se o número de patamares, de 3 para 5, e reduziu-se o tempo de cada patamar, de 20 segundos para 10 segundos. Além disto, a rotina descrita foi espelhada, resultando em uma segunda etapa, de desaceleração, onde a taxa de cisalhamento era reduzida de 100 s^{-1} para 0 s^{-1} .

Na Figura 15 e na Tabela 5 são apresentados os dados da rotina utilizada. Como forma de comparação, a argamassadeira normatizada pela NBR 7215 (ABNT, 1996a) possui duas velocidades de rotação em torno do eixo (baixa, de $140 \pm 5 \text{ rpm}$, e alta, de $285 \pm 10 \text{ rpm}$), e duas velocidades do movimento planetário (baixa, de $62 \pm 5 \text{ rpm}$, e alta, de $125 \pm 10 \text{ rpm}$).

Figura 15 – Rotina de ensaio no reômetro rotacional Brookfiel R/S Plus



(fonte: a autora)

Tabela 5 – Dados da rotina de ensaio utilizada no reômetro rotacional

Número	Tempo (s)	Taxa de cisalhamento (s ⁻¹)	Velocidade (min ⁻¹)	Velocidade (s ⁻¹)	Rotações (acumuladas)
1	10	0	0,00	0,000	0
2	20	20	90,59	1,510	15
3	30	40	181,16	3,019	46
4	40	60	271,74	4,529	92
5	50	80	362,32	6,039	153
6	60	100	452,90	7,548	230
7	70	80	362,32	6,039	294
8	80	60	271,74	4,529	341
9	90	40	181,16	3,019	373
10	100	20	90,59	1,510	389
11	110	0	0,00	0,000	389

(fonte: a autora)

A definição desta rotina foi resultado de um conjunto de ensaios exploratórios onde foram testados diferentes números, tempos e taxas de cisalhamento, bem como a taxa de cisalhamento máxima. A rotina em patamares foi definida por já ser utilizada por autores como Stolz (2015) e Petry (2015) neste mesmo reômetro. Foi definida a necessidade de caracterizar o material com uma taxa de cisalhamento inicial menor, de 20s⁻¹, com a qual se pode observar uma maior tensão de cisalhamento e viscosidade aparente do material. O aumento do número de patamares, de forma a serem obtidos um maior número de pontos para caracterização reológica do material, influenciou também para a redução do tempo de aplicação de cada taxa de cisalhamento. Cardoso *et al.* (2014) observaram a incorporação de ar excessiva com patamares de longa duração, e comentaram que podem modificar a homogeneidade do sistema. Paiva (2005) verificou que o perfil em escada melhor caracterizou o material pois desta maneira o valor do torque é estabilizado. A taxa de cisalhamento máxima continuou de 100s⁻¹, a mesma de trabalhos anteriores.

Neste ensaio, a aplicação de cada taxa de cisalhamento (s^{-1}) resultava na medição de um ponto dos parâmetros de tensão de cisalhamento (Pa) e de viscosidade aparente (Pa.s), gerando um total de 11 pontos por ensaio. O procedimento de ensaio e de obtenção de dados foram realizados com auxílio do software Rheo3000 (RHEOTEC, 2008). Com as curvas obtidas foram realizadas análises comparativas entre as argamassas.

5.2.4.3 Densidade de massa no estado fresco

Conforme NBR 13278 (ABNT, 2005b), a argamassa foi caracterizada quanto a sua densidade de massa no estado fresco, utilizando-se um recipiente cilíndrico com volume de $481,88\text{cm}^3$.

5.2.5 Ensaios do estado endurecido

Após moldagem, os corpos de prova das argamassas permaneceram por 2 dias em temperatura ambiente, cobertos com lona plástica. Assim que desmoldados e identificados, foram mantidos em câmara climatizada por 24 dias. Quando retirados, foram pesados e, posteriormente, secos na estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até constância de massa, atingida em menos de 24 horas. No dia seguinte, pela manhã, aos 27 dias após moldagem, os corpos de prova eram retirados da estufa e aguardava-se esfriarem por 4 horas em local com temperatura e umidade controlados, para serem novamente pesados e submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, o qual durava 90 minutos. Assim que terminado o ensaio, as argamassas eram novamente encaminhadas para a estufa. Atingida a constância de massa, no dia seguinte, aos 28 dias após moldagem, era realizado o mesmo procedimento de retirada da estufa e resfriamento, de modo que os corpos de prova estivessem com temperatura próxima a do ambiente para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Em seguida a este, no mesmo dia, as argamassas eram submetidas ao ensaio de tração na flexão e compressão.

5.2.5.1 Densidade de massa no estado endurecido

A densidade de massa das argamassas no estado endurecido foi determinada conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005d). O volume real de todos corpos de prova foi calculado com base em duas medidas de largura, duas de altura e duas de comprimento, realizadas com paquímetro, assim como preconiza a norma. Porém, a densidade de massa foi calculada considerando-se a massa dos corpos de prova após terem sido secos em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posteriormente equalizados com a temperatura ambiente, antes do início do ensaio de absorção de água por capilaridade.

5.2.5.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado a partir da NBR 15259 (ABNT, 2005f), com algumas modificações. Ao invés de ser considerada uma área padrão de 16cm^2 para o cálculo da absorção de água por capilaridade, foi utilizada a medida real da área da

base dos corpos de prova, uma vez que as medidas já haviam sido feitas para o ensaio de densidade de massa no estado endurecido. Embora a norma preconize o lixamento da base do corpo de prova para o ensaio de absorção, este não foi realizado, a fim de reduzir a variabilidade do ensaio. Em vez deste processo, foi utilizado plástico filme em parte da fôrma, de modo que não houve contato da base com o desmoldante.

5.2.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizada conforme a NBR 15630 (ABNT, 2008), com o equipamento Pundit Lab da Proceq. Utilizou-se transdutores de 150kHz de frequência e 2,8 cm de diâmetro, dimensão compatível com a base do corpo de prova, de 4 x 4 cm, onde era acoplado. De modo a facilitar a medição e manter o alinhamento entre os transdutores, utilizou-se um gabarito de madeira, dentro do qual era inserido o corpo de prova, que continha furos nas laterais, onde eram acoplados os transdutores.

5.2.5.4 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão foram determinadas, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005c), através de carregamento em prensa servo hidráulica Emic, com limite de carga de 200kN. Para a resistência à compressão, considerou-se como critério de finalização de ensaio, ou colapso, uma queda de carga maior ou igual a 30%.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, assim como dos ensaios no estado fresco e endurecido da argamassa, são apresentados neste capítulo.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Serão aqui apresentados os ensaios de caracterização do cimento Portland CP II F 32, das cales hidratadas cálcica e magnésiana, e das duas composições granulométricas do agregado miúdo.

6.1.1 Caracterização do cimento

O cimento Portland do tipo CP II F 32 foi obtido através de empresa de engenharia e fabricante de artefatos de cimento na cidade de Lajeado, no Rio Grande do Sul, em março de 2016. Sua utilização foi considerada para esta pesquisa devido ao reduzido teor de adições, além da compatibilidade para uso em argamassas.

6.1.1.1 BET, granulometria a laser e finura

A caracterização física resultante dos ensaios de BET, granulometria a laser e finura são indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização física do cimento CP II F 32 por BET e granulometria a laser

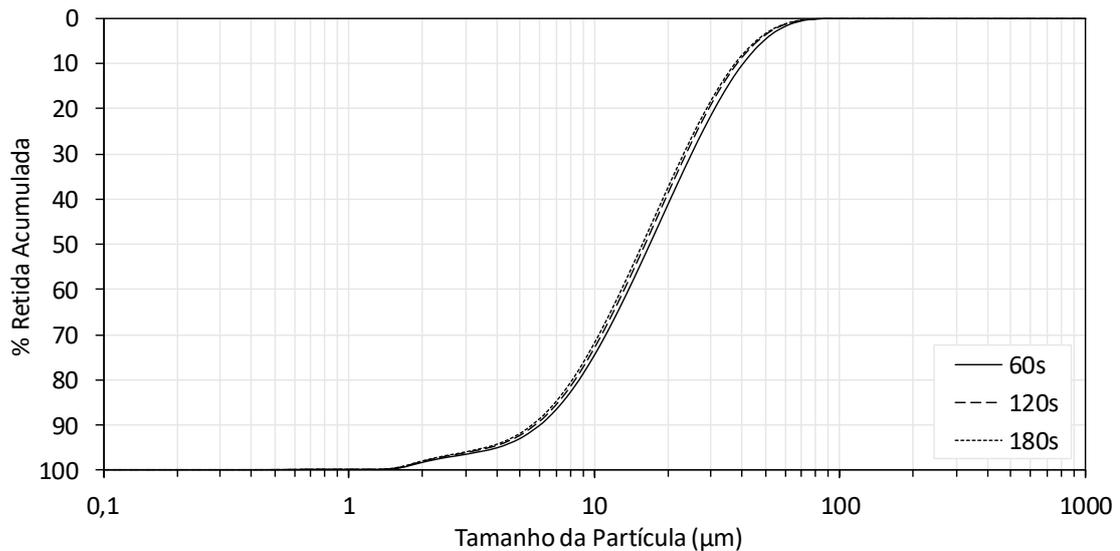
Cimento CP II F 32				
Ensaio	Resultado	Unidade	Método	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)
Área Superficial	4,395	m ² /g	BET	≥ 260 m ² /kg
D ₁₀	6,05			
D ₅₀	16,88	μm	Granulometria a Laser - 60 segundos de ultrassom	-
D ₉₀	40,48			
D _{médio}	20,50			
D ₁₀	5,75			
D ₅₀	16,14	μm	Granulometria a Laser - 120 segundos de ultrassom	-
D ₉₀	38,22			
D _{médio}	19,52			
D ₁₀	5,58			
D ₅₀	15,74	μm	Granulometria a Laser - 180 segundos de ultrassom	-
D ₉₀	37,52			
D _{médio}	19,11			
Material retido na peneira de abertura de malha 0,075mm	3,63	%	Finura NBR 11579 (ABNT, 2012)	≤ 12,0 %

(fonte: a autora)

Observa-se que, tanto o parâmetro físico de área superficial, quanto o resíduo na peneira nº 200, estão de acordo com o limite da NBR 11578 (ABNT, 1991).

As curvas granulométricas do cimento por granulometria a laser, utilizando dispersão com diferentes tempos de ultrassom, é apresentada na Figura 16. Nota-se a semelhança nas curvas resultantes. Conforme observado na Tabela 6, as partículas estão concentradas entre os diâmetros de 5,58 e 37,52 μm , sendo o diâmetro médio de 19,11 μm , após 180 segundos de ultrassom.

Figura 16 – Curvas granulométricas do cimento CP II F 32, após diferentes tempos de ultrassom



(fonte: a autora)

6.1.1.2 Massa específica e massa unitária

Os resultados dos ensaios de massa específica e massa unitária do cimento CP II F 32 são apresentados na Tabela 7. Observa-se que são valores coerentes com a literatura, como em Selmo (1989), Pinto (1996) e Recena (2012).

Tabela 7 – Massa específica e unitária do cimento CP II F 32

CP II F 32			
Ensaio	Método	Resultado	Unidade
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001a)	3,06	g/cm^3
Massa unitária	-	0,95	g/cm^3

(fonte: a autora)

6.1.1.3 TGA, FRX e DRX

O resultado do ensaio de FRX do cimento CP II F 32 é apresentado na Tabela 8. Verifica-se a composição predominante de CaO e SiO_2 , e uma quantidade de óxido de magnésio coerente com as recomendações da NBR 11578 (ABNT, 1991) para este tipo de cimento. A quantidade de trióxido de enxofre apresentada neste ensaio, de 5,02% apresenta-se acima do limite, de 4,0%, porém, a determinação deste composto pela NBR NM 16 (ABNT, 2004) é realizado pelo método químico, o que pode ocasionar alteração no resultado.

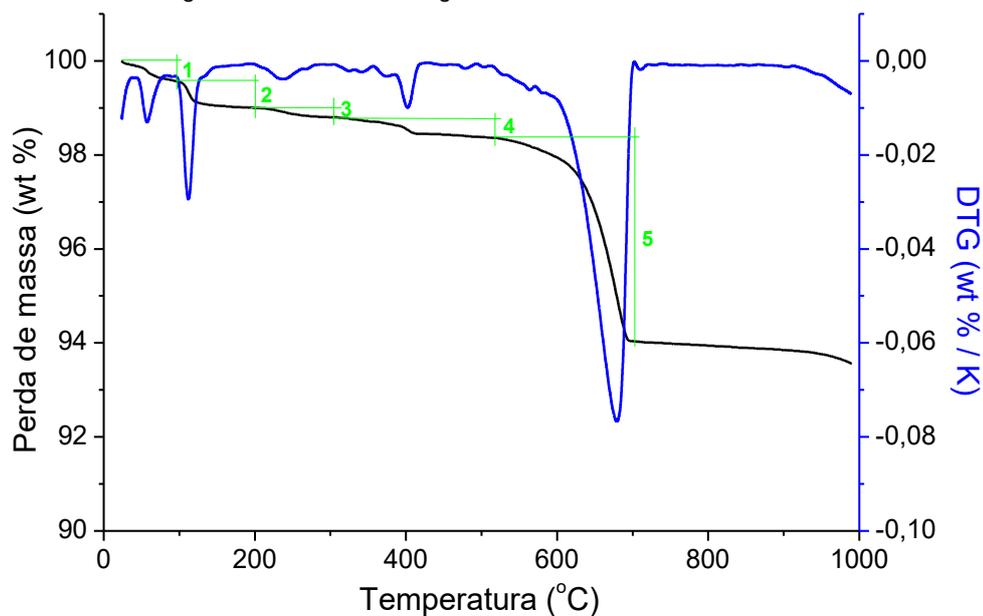
Tabela 8 – Composição elementar de óxidos do cimento CP II F 32 por FRX

CIMENTO CP II F 32		
Composto	(%)	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)
CaO	64,34	
SiO ₂	18,91	
SO ₃	5,02	≤ 4,00
Fe ₂ O ₃	4,92	
Al ₂ O ₃	2,83	
MgO	1,81	≤ 6,50
K ₂ O	1,07	
P ₂ O ₅	0,18	
SrO	0,17	
MnO	0,16	
Perda ao Fogo	-	

(fonte: a autora)

A partir da TG e DTG do cimento CP II F 32 (Figura 17 e Tabela 9) foi possível relacionar a perda de massa com as reações que ocorrem nas diferentes temperaturas. A análise dos ensaios de TG e DRX tiveram como referência a tese de Quarcioni (2008), onde o autor estudou um cimento CP II E 32. Deste, são originadas as Equações 20 a 24, com as quais foram calculadas a porcentagem de gipsita (considerando-se $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), singenita ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 , a partir da perda de massa observada no ensaio de ATG. Não foi observada perda de massa pelo $\text{Mg}(\text{OH})_2$, mas esta equação será utilizada para análise das cales. A ATG também foi analisada conforme Pilar *et al.* (2016), que trabalharam com um cimento CP V anidro.

Figura 17 – Análise termogravimétrica do cimento CP II F 32



(fonte: a autora)

Tabela 9 – Perda de massa do CP II F 32 por ATG

CP II F 32						
Evento	Temperatura inicial e final	Massa inicial e final (%)	Δm (%)	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)	Composto	Massa (%)
Umidade (1)	24,38 95,14	100,00 99,57	0,43	-	-	-
Decomposição da gipsita (2)	95,14 192,76	99,57 99,00	0,57	-	Gipsita - Equação 22	2,72
Decomposição da singenita (3)	192,76 297,99	99,00 98,80	0,20	-	Singenita - Equação 23	3,65
Água combinada $Ca(OH)_2$ (4)	297,99 512,00	98,80 98,37	0,43	-	$Ca(OH)_2$ - Equação 25	1,77
CO_2 liberado do $CaCO_3$ (5)	512,00 700,84	98,37 95,45	2,92	$\leq 5,0$ %	$CaCO_3$ - Equação 26	6,63
Perda de massa total	24,38 987,57	100,00 94,04	5,96	$\leq 6,5$ %	-	-

(fonte: a autora)

$$\text{Massa gipsita (\%)} = \Delta m * 4,78$$

Equação 20

$$\text{Massa singenita (\%)} = \Delta m * 18,25$$

Equação 21

$$\text{Massa } Mg(OH)_2 (\%) = \Delta m * 3,24$$

Equação 22

$$\text{Massa } Ca(OH)_2 (\%) = \Delta m * 4,11$$

Equação 23

$$\text{Massa } CaCO_3 (\%) = \Delta m * 2,27$$

Equação 24

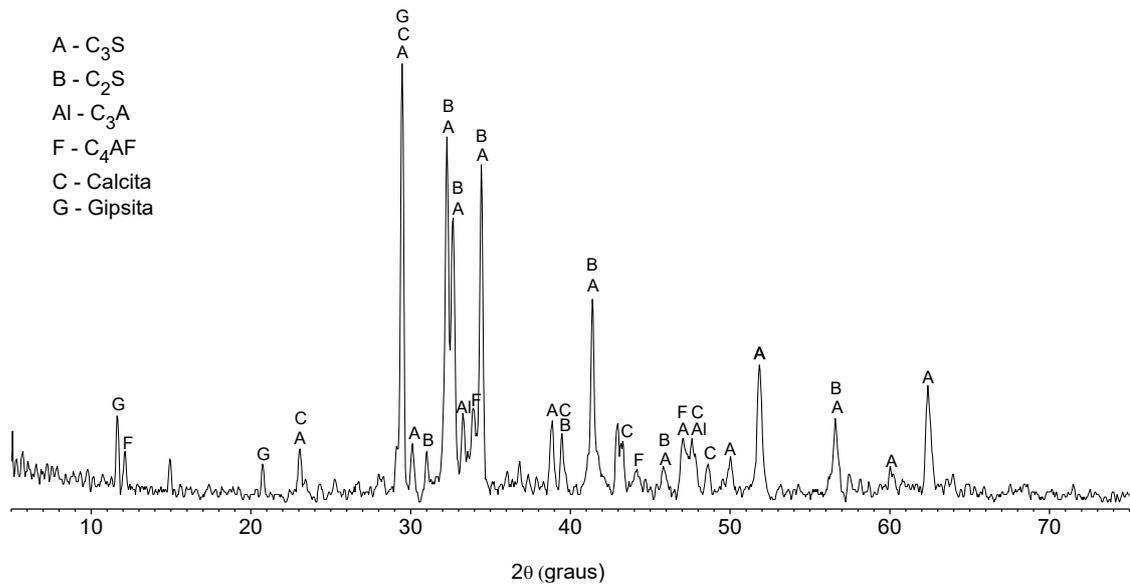
Onde:

Δm é a variação de massa verificada em determinados intervalos de temperatura (%).

Observa-se perda de massa devido à umidade, à decomposição da gipsita e singenita, da água combinada com a portlandita (possivelmente formada pela reação do cimento com a umidade), a liberação de CO_2 do carbonato de cálcio (visto que é um cimento com a adição de filer calcário), e a perda de massa total até $1000^\circ C$. Verifica-se que as porcentagens de CO_2 e de perda de massa total (perda ao fogo) estão dentro do limite máximo da NBR 11578 (ABNT, 1991), e que o teor de $CaCO_3$ calculado também está conforme o limite de adição permitido, entre 6 e 10%.

Na Figura 18, está apresentado o difratograma do cimento CP II F 32 com a indicação dos compostos em seus respectivos picos cristalinos, sendo as fichas de referência identificadas no Quadro 5. Observa-se a presença da calcita, originada do filer calcário do cimento CP II F.

Figura 18 – Difratoograma de raios X do cimento CP II F 32



(fonte: a autora)

Quadro 5 – Fichas dos compostos encontrados na DRX do CP II F 32

CIMENTO CP II F 32				
Nome do composto	Fórmula	Mineral	PDF	Qualidade
Silicato tricálcico - C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	Alita	00-049-0442	Star
Silicato dicálcico - C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	Belita	00-033-0302	Star
Aluminato tricálcico - C ₃ A	Al ₂ Ca ₃ O ₆	-	00-038-1429	Star
Ferro aluminato tricálcico - C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	-	00-030-0226	Star
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	Calcita	00-005-0586	Star
Sulfato de cálcio hidratado	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Gipsita	00-033-0311	Star

(fonte: a autora)

6.1.1.4 Potencial Zeta

Os resultados do ensaio do potencial zeta do cimento CP II F 32 são verificados na Tabela 10. Identifica-se que o valor de -12,78mV indica que este material possui uma tendência de aglomeração.

Tabela 10 – Valores de potencial zeta do cimento CP II F 32

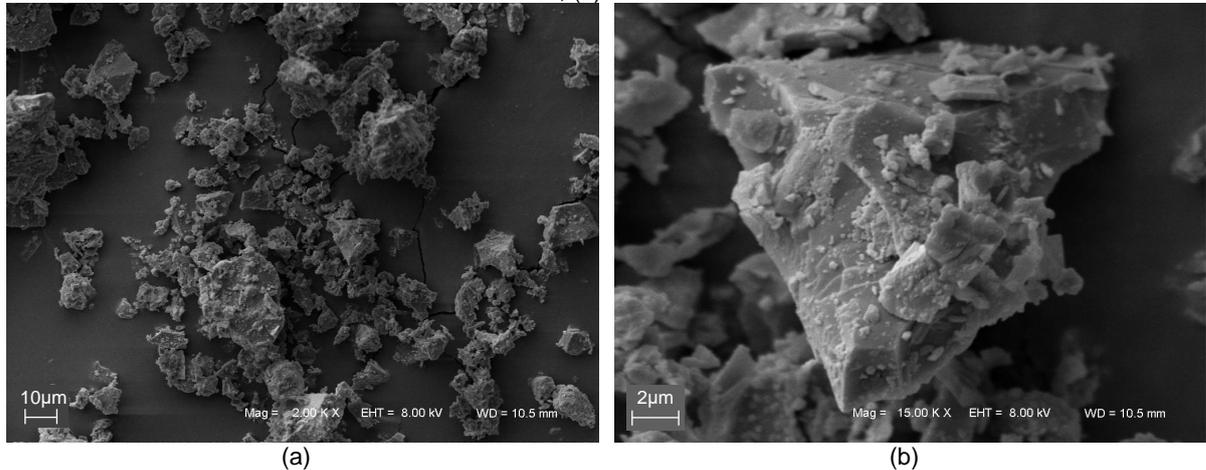
CIMENTO CP II F - 32	
Medida	Potencial Zeta (mV)
1	-6,47
2	-21,72
3	-20,44
4	-12,84
5	-10,55
6	-12,40
7	-11,69
8	-12,43
9	-11,52
10	-7,71
Média	-12,78
Erro	1,54

(fonte: a autora)

6.1.1.5 Microscopia eletrônica de varredura e EDS

As imagens do cimento CP II F 32 por MEV, com metalização por ouro, são apresentados na Figura 19, com aumento de 2.000 e 15.000 vezes.

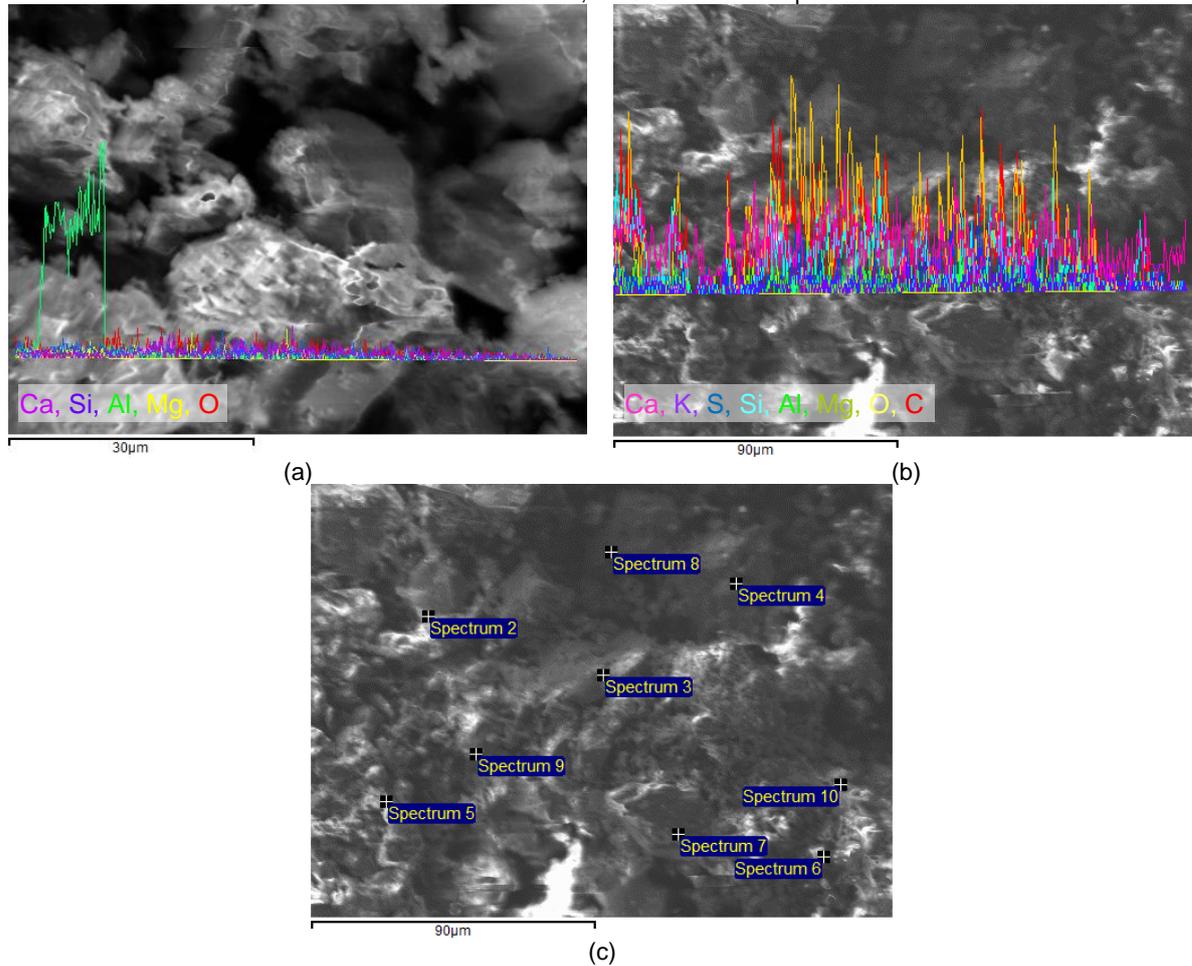
Figura 19 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do cimento CP II F 32: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes



(fonte: a autora)

A localização do EDS e a quantificação dos elementos nas amostras de cimento são apresentados na Figura 20 e na Tabela 11. Os elementos mais presentes são o cálcio (Ca), oxigênio (O) e carbono (C); enquanto sílica (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe) estão contidos em porcentagens abaixo de 10%. Verifica-se a elevada quantidade e variação da presença do elemento enxofre (S), variando este de 0%, na análise por linha com metalização de ouro, até 17,72%, em um dos pontos. Observa-se também a quantidade do elemento Al de 25,48% no EDS por linha com metalização de ouro, representado na Figura 20a pelo pico verde. Este pode ser considerado um caso isolado, uma vez que todas as demais análises por ponto possuem valores do elemento alumínio entre 2,32% e 0,21%. Elementos como o magnésio (Mg) e o potássio (K) também se mostram presentes, mas em pequenas quantidades.

Figura 20 – Local de realização do EDS no cimento CP II F 32: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos



(fonte: a autora)

Tabela 11 – Elementos encontrados na amostra de cimento CP II F 32 por EDS

Elemento	Peso dos elementos (%)									Total
	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	
Linha - metalização Au	25,55	20,91	-	25,48	3,80	-	-	24,25	-	100,00
Linha - metalização C	22,68	30,14	-	0,62	5,42	2,99	2,63	35,52	-	100,00
Spectrum 2	22,68	30,14	-	0,62	5,42	2,99	2,63	35,52	-	100,00
Spectrum 3	15,65	41,46	0,70	0,33	7,76	0,73	0,77	31,30	1,29	100,00
Spectrum 4	24,72	29,94	0,69	2,32	2,26	10,24	4,97	20,84	4,02	100,00
Spectrum 5	26,89	25,88	-	0,39	1,44	17,72	1,22	26,46	-	100,00
Spectrum 6	12,24	18,51	0,31	0,31	5,59	2,61	3,89	56,53	-	100,00
Spectrum 7	26,38	27,34	0,30	0,49	6,81	3,95	3,83	30,90	-	100,00
Spectrum 8	33,33	29,77	0,35	0,21	0,44	15,63	0,46	19,81	-	100,00
Spectrum 9	15,60	34,46	0,52	0,40	8,74	0,57	0,84	38,08	0,78	100,00
Spectrum 10	31,49	34,83	0,57	1,94	5,06	0,79	0,56	24,76	-	100,00
Máximo dos pontos	33,33	41,46	0,70	2,32	8,74	17,72	4,97	56,53	4,02	
Mínimo dos pontos	12,24	18,51	0,30	0,21	0,44	0,57	0,46	19,81	0,78	
Média dos pontos	23,22	30,26	0,49	0,78	4,84	6,14	2,13	31,58	2,03	

(fonte: a autora)

6.1.1.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão do cimento CP II F resultou nos valores médios indicados na Tabela 12. Observa-se que, aos 28 dias, a resistência de 32 MPa não foi atingida. Porém, este ensaio objetiva a caracterização do material, não tendo sido um impedimento para seu uso.

Tabela 12 – Resistência à compressão do cimento CP II F 32

CIMENTO CP II F 32			
	Resistência à compressão	Limites da NBR 11578 (ABNT, 1991)	Unidade
3 dias	15,89	≥ 10,0	MPa
7 dias	20,27	≥ 20,0	
28 dias	27,69	≥ 32,0	

(fonte: a autora)

6.1.2 Caracterização das cales hidratadas

As cales hidratadas cálcica e magnesiânica foram obtidas de fábricas situadas em Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. Algumas das informações obtidas sobre o processo de produção das cales através dos fabricantes são apresentadas a seguir.

A cal hidratada cálcica provém de empresa fundada em 1973, e que deu início à implantação da ISO 14001 em 2014. Esta cal origina-se do processamento de rocha calcária cálcica, com jazida localizada em Córrego Fundo, Minas Gerais (Figura 21). A análise química desta jazida, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Tabela 13.

Figura 21 – Imagem da jazida de calcário cálcico



(fonte: fabricante da cal hidratada cálcica)

Tabela 13 – Análise da jazida de calcário que origina a cal hidratada cálcica

Análise	Cal Cálcica (%)
CaO	54,90
MgO	1,09
RI+SiO ₂	0,6
Perda ao fogo	42,66

(fonte: fabricante da cal hidratada cálcica)

Conforme o fabricante, o processo de beneficiamento inicia com a redução da granulometria da rocha calcária até tamanhos de partículas entre 50 a 100mm, utilizando-se britador de mandíbulas. A calcinação é realizada em forno vertical do tipo AZBE, o qual possui zona de pré-aquecimento, zona de aquecimento ou calcinação, e zona de resfriamento. O combustível utilizado para atingir a temperatura de calcinação de, aproximadamente, 1000°C, é lenha de eucalipto, cujo consumo é de, aproximadamente, um metro cúbico para a produção de uma tonelada de cal virgem. O resfriamento é realizado com ar frio. A empresa possui dois fornos, cuja produção é de 150 toneladas por dia.

A cal virgem é reduzida para partículas de até 19mm, utilizando moinho de martelo. Esta cal virgem e a água de hidratação são adicionados ao premix e, posteriormente, direcionados ao hidratador, local onde o material é desintegrado e homogeneizado. A quantidade de água adicionada é de 20 a 22%, e a temperatura neste processo chega a 100°C. O produto gerado passa ao moinho de martelos, onde é moído até atingir a granulometria da cal hidratada. Por fim, segue para aero-separadores, onde o material é classificado e direcionado para os silos de carregamento através de rosca sem fim e elevador de canecas. A produção de cal hidratada é de 10 toneladas por hora.

A cal hidratada magnesiana provém de empresa fundada em 1982, que possui certificação ISO 9001:2008. A empresa não participa dos processos de extração e calcinação da rocha calcária. Portanto, a cal virgem é obtida diretamente de fornecedores, sendo a dolomítica proveniente do Paraná, e a cálcica, de Minas Gerais. Além da informação da origem, a empresa também recebe a análise química da cal virgem (porcentagens de óxidos de cálcio e magnésio, teor de carbonato de cálcio, resíduo insolúvel, dióxido de carbono e perda por calcinação).

O processo de hidratação é realizado pela empresa, sem a utilização de pré-misturadores, em processo à seco e sem equipamentos. A cal hidratada gerada é moída em moinho de martelos e classificada através de aero separadores. A produção diária é de 250 toneladas.

6.1.2.1 BET, granulometria a laser e finura

A caracterização física resultante dos ensaios de BET, granulometria a laser e finura são indicados na Tabela 14. Observa-se a maior área superficial da cal hidratada magnesiana, o que não está de acordo com a granulometria a laser, mas em coerência com as imagens obtidas por MEV. Quanto à finura, a cal hidratada cálcica pode ser classificada como CH I, conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003b), porém, a cal hidratada do tipo magnesiana apresentou 0,1% a mais que o permitido de material retido na peneira de 0,075mm de abertura de malha, sendo considerada, neste caso, do tipo CH II ou CH III.

Tabela 14 – Caracterização física das cales por BET, granulometria a laser e finura

CAL HIDRATADA						
Ensaio		Cálcica	Magnesiana	Unidade	Método	Limites NBR 7175 - CHI (ABNT, 2003b)
Área Superficial		8,277	10,329	m ² /g	BET	-
D ₁₀		3,17	3,58		Granulometria a Laser - 60 segundos de ultrassom	-
D ₅₀		8,63	16,93	μm		
D ₉₀		20,00	43,34			
D _{médio}		10,35	20,49			
D ₁₀		3,14	3,51		Granulometria a Laser - 120 segundos de ultrassom	-
D ₅₀		8,59	16,56	μm		
D ₉₀		19,93	42,14			
D _{médio}		10,30	19,99			
D ₁₀		3,10	2,78		Granulometria a Laser - 180 segundos de ultrassom	-
D ₅₀		8,47	11,56	μm		
D ₉₀		19,14	38,93			
D _{médio}		9,98	16,92			
Material retido na peneira de abertura de malha	0,075mm	2,15	10,10	%	Finura - NBR 9289 (ABNT, 2000b)	≤ 10 %
	0,6mm	0,07	0,11			≤ 0,5 %

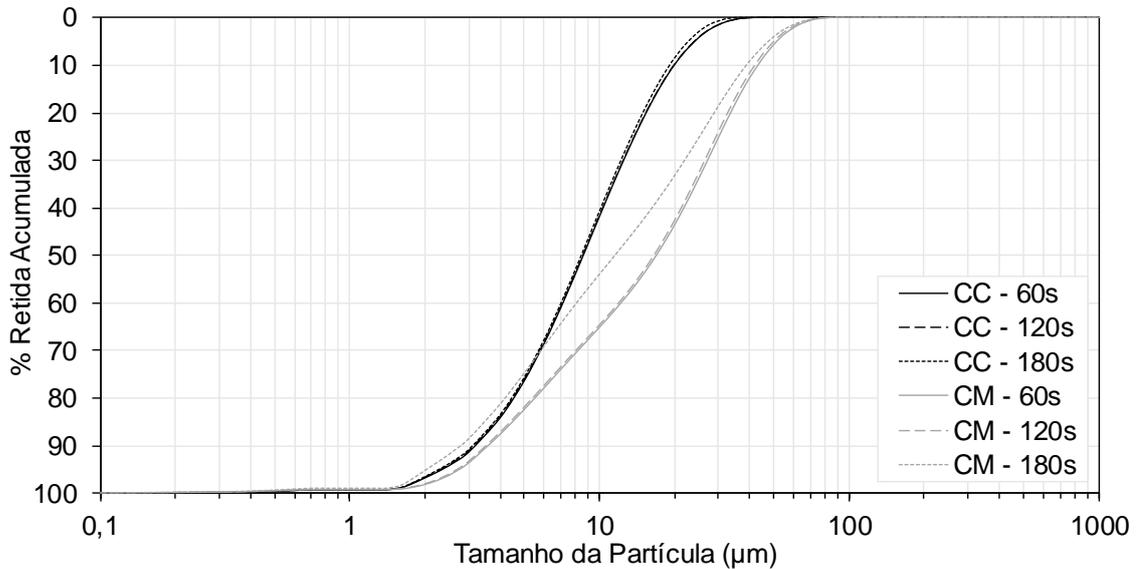
(fonte: a autora)

Ainda conforme observado na Tabela 14, com 180 segundos de ultrassom, a cal cálcica apresenta uma quantidade maior de partículas mais finas que a cal magnesiana. Por este motivo, as partículas da cal cálcica ficaram com um diâmetro médio de 9,98μm, enquanto que para a cal magnesiana, o diâmetro médio das partículas foi de 16,92μm. Comparativamente, o diâmetro médio do cimento foi de 19,11μm (Tabela 6), valor mais próximo ao da cal magnesiana.

Na Figura 22 são apresentadas as curvas granulométricas das cales cálcica e magnesiana, após submetidas a diferentes tempos de ultrassom. Observa-se a semelhança nas curvas resultantes para a cal cálcica. A cal magnesiana, porém, apresentou uma maior dispersão após 180 segundos de ultrassom.

É importante salientar a elevada diferença do BET para os três materiais. O cimento apresentou maiores partículas e menor BET, o que se mostra coerente. As cales apresentaram distribuições granulométricas mais finas e o resultado do BET foi elevado, mas a cal com menor granulometria apresentou menor BET, o que é incoerente. Porém, este comportamento pode ser explicado por Thomson (1999, p. 166, tradução nossa): “A distribuição do tamanho das partículas de minerais hidróxidos apresenta um desafio para medição. A carga superficial devido à cristalização incompleta torna o produto difícil de dispersar.”. Esta carga superficial pode ser relacionada com os valores de potencial zeta, apresentados no item 6.1.2.6.

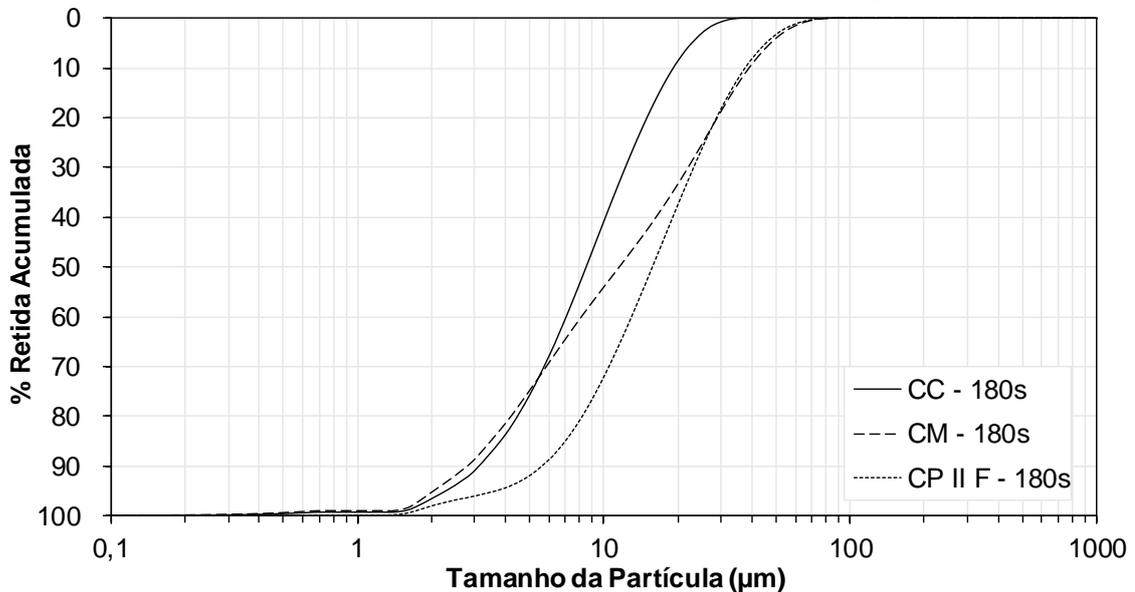
Figura 22 – Curvas granulométricas das cales cálcica e magnesiana, após diferentes tempos de ultrassom



(fonte: a autora)

Comparando-se a granulometria das partículas das duas cales e do cimento, após submetidas a 180 minutos de ultrassom (Figura 23), a cal cálcica apresenta comportamento semelhante ao do cimento, porém com partículas mais finas. Por sua vez, a cal magnesiana apresenta um comportamento intermediário, e sua distribuição abrange tanto partículas mais finas, quanto partículas mais grossas.

Figura 23 – Curvas granulométricas do cimento, e das duas cales, após 180 segundos de ultrassom



(fonte: a autora)

6.1.2.2 Plasticidade, incorporação de areia e retenção de água

Os ensaios físicos de plasticidade, incorporação de areia e retenção de água são apresentados na Tabela 15. Verifica-se que os resultados estão dentro dos limites de cales

hidratadas tipo CH I. O índice de plasticidade apresenta-se maior para a cal magnesiânica, porém, a incorporação de areia foi maior para a cal cálcica. O índice de retenção de água foi próximo para as duas cales, sendo pouco maior para a cal cálcica.

Tabela 15 – Ensaio físico de plasticidade, incorporação de areia e retenção de água dos diferentes tipos de cales

CALES HIDRATADAS					
Ensaio	Método	Cálcica	Magnesiânica	Unidade	Limites NBR 7175 - CHI (ABNT, 2003b)
Plasticidade	NBR 9206 (ABNT, 2016a)	142	214	índice de plasticidade	≥ 110
Incorporação de areia	NBR 9207 (ABNT, 2000a)	1:5,6	1:4,8	traço 1:m (cal:areia)	m ≥ 3
Retenção de água	NBR 9290 (ABNT, 1996b)	91,06	87,96	%	≥ 75

(fonte: a autora)

6.1.2.3 Massa específica e massa unitária

A massa unitária das duas cales hidratadas resultaram em um mesmo valor; porém, a cal magnesiânica apresentou massa específica um pouco superior à cal cálcica (Tabela 16). Assim como o cimento CP II F, os valores para as cales estão coerentes com a literatura.

Tabela 16 – Massa específica e unitária das cales cálcica e magnesiânica

CALES HIDRATADAS					
Ensaio	Método	Cálcica	Magnesiânica	Unidade	
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001a)	2,24	2,37	g/cm ³	
Massa unitária	-	0,45	0,45	g/cm ³	

(fonte: a autora)

6.1.2.4 TGA, FRX e DRX

A caracterização das duas cales hidratadas quanto aos aspectos químicos inicia com os resultados do ensaio de FRX, indicados na Tabela 17. Observa-se que a cal hidratada cálcica possui uma quantidade superior de CaO, e a cal hidratada magnesiânica, uma quantidade elevada de MgO e SiO₂.

Tabela 17 – Composição elementar de óxidos das cales hidratadas por FRX

CAL HIDRATADA	CÁLCICA	MAGNESIANA
Composto	(%)	(%)
CaO	95,17	72,94
MgO	1,40	18,95
SiO ₂	1,68	6,05
Fe ₂ O ₃	0,63	0,96
Al ₂ O ₃	0,48	0,55
SO ₃	0,20	0,32
K ₂ O	0,11	0,14
SrO	0,19	0,09
P ₂ O ₅	0,15	-
Perda ao Fogo	-	-

(fonte: a autora)

Com os dados de óxidos de cálcio e magnésio, foi possível verificar a classificação das cales quanto à sua composição de acordo com Cincotto *et al.* (2007), conforme apresentado na

Tabela 18. Observa-se que a cal hidratada magnesiana possui relação CaO/MgO muito menor que a cal hidratada cálcica. Observa-se na, Tabela 17, que a cal hidratada cálcica apresenta teor de óxido de magnésio menor que 4%, o que também é parte de sua classificação como cálcica.

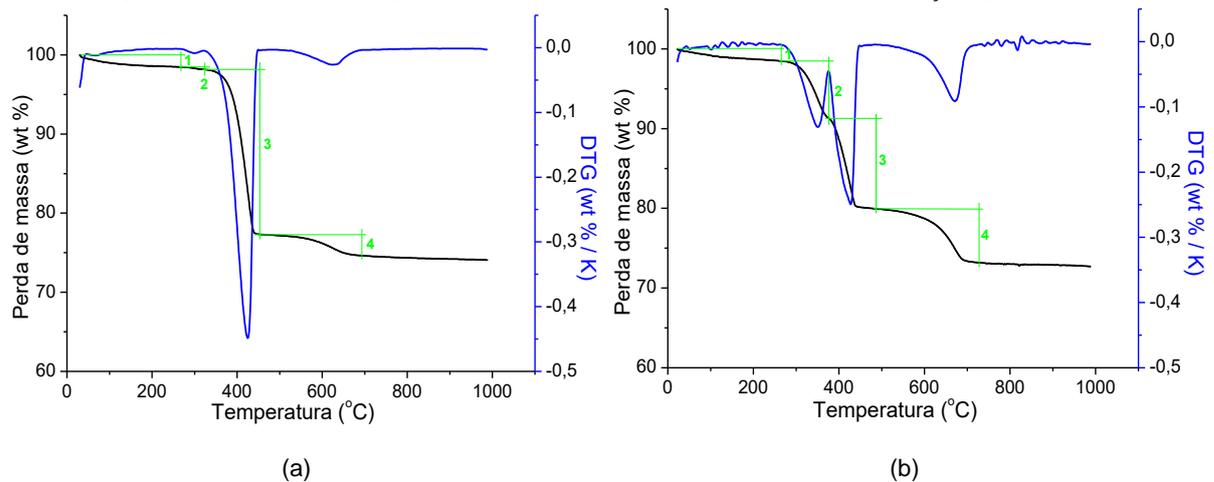
Tabela 18 – Classificação das cales hidratadas quanto à composição		
CAL HIDRATADA*	CÁLCICA	MAGNESIANA
CaO/MgO	68,15	3,85

*Classificação: dolomítica - $1,38 < \text{CaO/MgO} < 2,5$; magnesiana - $\text{CaO/MgO} > 2,5$; cálcica - $\text{MgO} < 4\%$ (CINCOTTO *et al.*, 2007).

(fonte: a autora)

Os resultados de termogravimetria das cales hidratadas são apresentadas na Figura 24a e b, para as cales hidratadas cálcica e magnesiana, respectivamente. Assim como no ensaio realizado com o cimento, novamente foi possível relacionar a perda de massa com os eventos térmicos que ocorrem nas diferentes temperaturas. Os trabalhos utilizados como referência nesta análise foram, além do estudo de Quarcioni (2008) sobre as cales CH I e CHIII, também o estudo do hidróxido de cálcio P. A. por Medeiros *et al.* (2015).

Figura 24 – Análises termogravimétricas das cales hidratadas: (a) cálcica e (b) magnesiana



(fonte: a autora)

Para as cales hidratadas utilizadas neste trabalho, observa-se perda de massa devido a umidade do material; pela água combinada com o Mg(OH)_2 e com o Ca(OH)_2 , em duas diferentes temperaturas, mas que se sobrepuseram; pela liberação de CO_2 do CaCO_3 e MgCO_3 , não sendo possível dissociar a perda entre os carbonatos; e a perda de massa total até 1000°C . Os dados das reações térmicas, temperaturas que ocorrem, perda de massa respectiva, bem como o cálculo da porcentagem de hidróxidos e carbonatos são apresentadas na Tabela 19. Para fins de cálculo, foi considerada que todo o CO_2 liberado é proveniente do CaCO_3 . Na tabela, verifica-se que a porcentagem de CO_2 liberado por ambas as cales é menor que o limite contido na NBR 7175 (ABNT, 2003b) para cales do tipo CH I, de 7% (no depósito).

Tabela 19 – Perda de massa das cales hidratadas por ATG

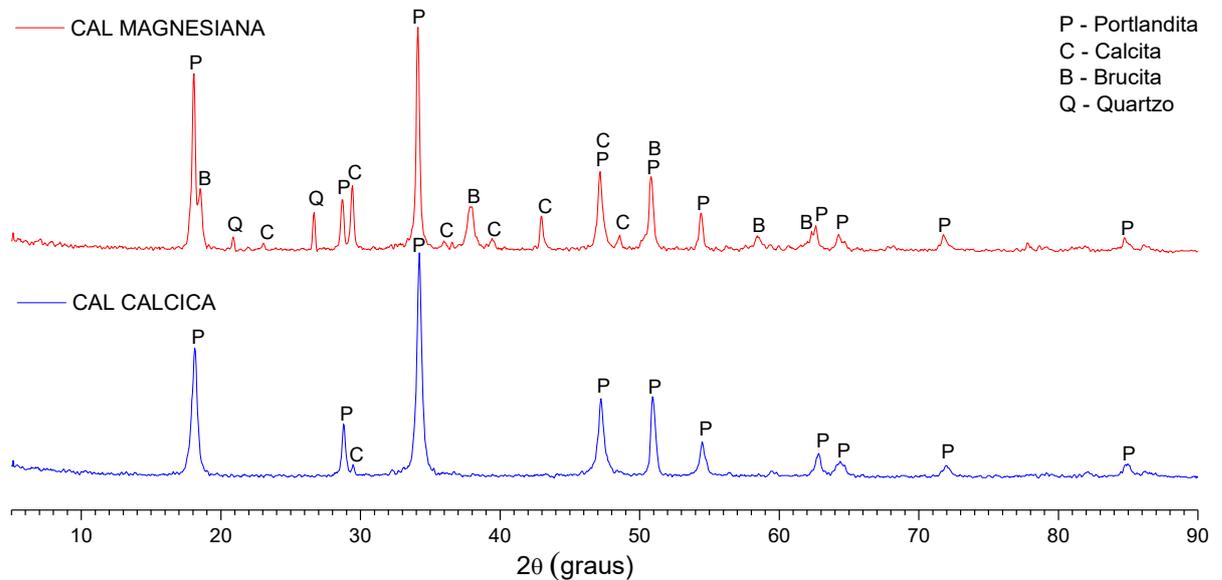
CAL HIDRATADA	CÁLCICA					MAGNESIANA				
	Temperatura inicial e final (°C)	Massa inicial e final (%)	Δm (%)	Composto	Massa (%)	Temperatura inicial e final (°C)	Massa inicial e final (%)	Δm (%)	Composto	Massa (%)
Água adsorvida (1)	29,76 263,82	100,00 98,49	1,51	-	-	22,63 265,10	100,00 98,49	1,51	-	-
Água combinada Mg(OH) ₂ (2)	263,82 322,16	98,49 98,17	0,32	Mg(OH) ₂ – Eq. 24	1,04	265,10 376,59	98,49 91,28	7,21	Mg(OH) ₂ – Eq. 24	23,36
Água combinada Ca(OH) ₂ (3)	322,16 452,87	98,17 77,33	20,84	Ca(OH) ₂ – Eq. 25	85,65	376,59 486,73	91,28 79,95	11,33	Ca(OH) ₂ – Eq. 25	46,57
CO ₂ liberado do CaCO ₃ e MgCO ₃ (4)	452,87 695,80	77,33 74,63	2,70	CaCO ₃ – Eq. 26	6,13	486,73 729,83	79,95 73,18	6,77	CaCO ₃ – Eq. 26	15,37
Perda de massa total	29,76 986,66	100,00 74,08	25,92	-	-	22,63 986,35	100,00 72,72	27,28	-	-

(fonte: a autora)

O difratograma das duas cales hidratadas com a indicação dos compostos em seus respectivos picos cristalinos é apresentado na Figura 25, e as fichas de referência são identificadas no Quadro 6. A análise dos ensaios de DRX também teve como referência a tese de Quarcioni (2008), na qual o autor estudou duas cales, CH I e CH III.

Pode-se observar picos referentes a existência de portlandita (hidróxido de cálcio) e de calcita (carbonato de cálcio) em ambas as cales. No difratograma da cal hidratada magnesiânica evidencia-se ainda a brucita (hidróxido de magnésio) e também o quartzo (dióxido de silício). Observa-se uma menor quantidade de compostos na cal cálcica, indicando uma maior pureza.

Figura 25 – Difratogramas de raios X das cales hidratadas



(fonte: a autora)

Quadro 6 – Fichas dos compostos encontrados na DRX das cales hidratadas

CALES HIDRATADAS				
Nome do composto	Fórmula	Mineral	PDF	Qualidade
Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂	Portlandita	00-044-1481	Star
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	Calcita	00-005-0586	Star
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	Brucita	00-044-1482	Star
Dióxido de silício	SiO ₂	Quartzo	00-046-1045	Star

(fonte: a autora)

6.1.2.5 Composição química, umidade e perda ao fogo

O resultado da caracterização química da cal cálcica, de acordo com a NBR 6473 (ABNT, 2003a) é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Caracterização química da cal hidratada cálcica pela NBR 6473 (ABNT, 2003a)

CAL HIDRATADA	CÁLCICA
Composto	(%)
CaO	72,00
MgO	0,24
SO ₃	0,07
Umidade	0,45
Perda ao fogo	25,01

(fonte: a autora)

6.1.2.6 Potencial Zeta

Os resultados do ensaio do potencial zeta das cales hidratadas são verificados na Tabela 21. As cales apresentaram valores próximos; porém, o valor da cal cálcica apresenta-se mais próximo de zero, indicando uma maior tendência de floculação.

Tabela 21 – Valores de potencial zeta das cales hidratadas

CAL HIDRATADA	CÁLCICA	MAGNESIANA
Medida	Potencial Zeta (mV)	
1	-6,35	-12,13
2	-13,58	-11,79
3	-7,1	-7,82
4	-3,59	-9,59
5	2,15*	-23,81
6	2,2*	-5,48
7	7,22*	-7,09
8	4,68*	-7,73
9	-13	-24
10	-6,89	8,96*
Média	-8,38	-12,20
Erro	1,61	2,36

*desconsiderados no cálculo da média e do erro

(fonte: a autora)

6.1.2.7 Exigências químicas

A partir da FRX, ATG e composição química elementar das cales, foi possível determinar o teores de óxidos não hidratados e a porcentagem total de óxidos de cálcio e de magnésio, na base de não voláteis (Tabela 22). Verifica-se que estão de acordo com os limites da NBR

7175 (ABNT, 2003b). Foi ainda possível identificar a semelhança nos resultados para a cal cálcica quando calculados com base nas análises de FRX e ATG e quando calculados com base na análise química elementar.

Tabela 22 – Valores calculados das exigências químicas da cal conforme NBR 7175 (ABNT, 2003b)

COMPOSTO	CAL HIDRATADA			NBR 7175 ⁴ Requisitos CH I
	Cálcica ¹	Cálcica ²	Magnesiana ¹	
SO ₃ (%)	0,14	0,07	0,23	
MgO (%)	1,03	0,24	13,78	
CaO (%)	70,50	72,00	53,04	
Perda ao fogo (%)	25,92	25,01	27,28	
CO ₂ (%) ³	2,70	2,70	6,77	≤7% no depósito
Umidade (%)	1,51	0,45	1,51	
CaO combinado com CaSO ₄ (%) ⁴	0,10	0,05	0,16	
CaO combinado com CaCO ₃ (%) ⁴	3,43	3,43	8,60	
Água combinada (%) ⁴	21,71	21,86	19,00	
CaO hidratado (%) ⁴	67,52	67,98	59,09	
CaO não-hidratado calculado (%) ⁴	-0,55	0,54	-14,81	
CaO não-hidratado real (%) ⁴	0,00	0,54	0,00	
MgO hidratado (%) ⁴	0,40	0,00	10,66	
MgO não-hidratado (%)	0,64	0,78	3,12	
CaO+MgO não hidratados teóricos (%) ⁴	0,64	1,32	3,12	≤10%
CaOtotal+MgOtotal (%) ⁴	96,56	96,33	91,89	≥90%

¹Utilizado resultados das análises de FRX e ATG.

²Utilizado resultados da análise química pela NBR 6473 (ABNT, 2003a).

³Utilizado resultados de CO₂ obtido por ATG.

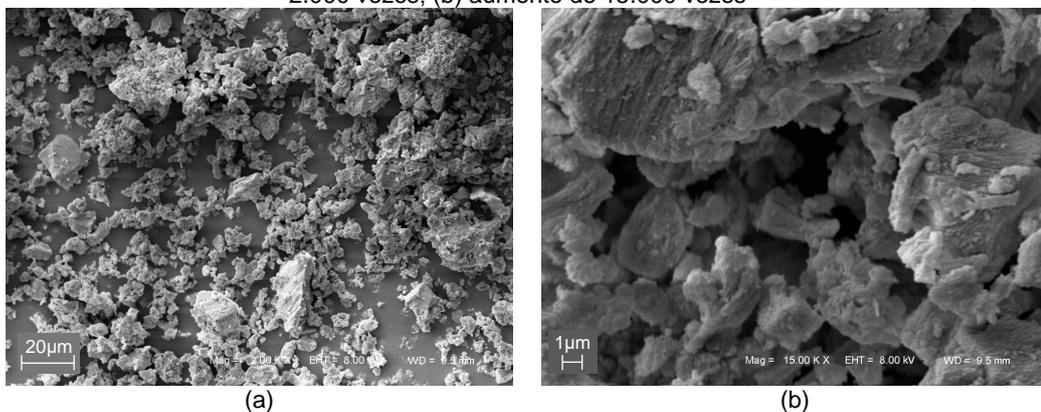
⁴Cálculo e requisitos conforme indicações da NBR 7175 (ABNT, 2003b).

(fonte: a autora)

6.1.2.8 Microscopia eletrônica de varredura e EDS

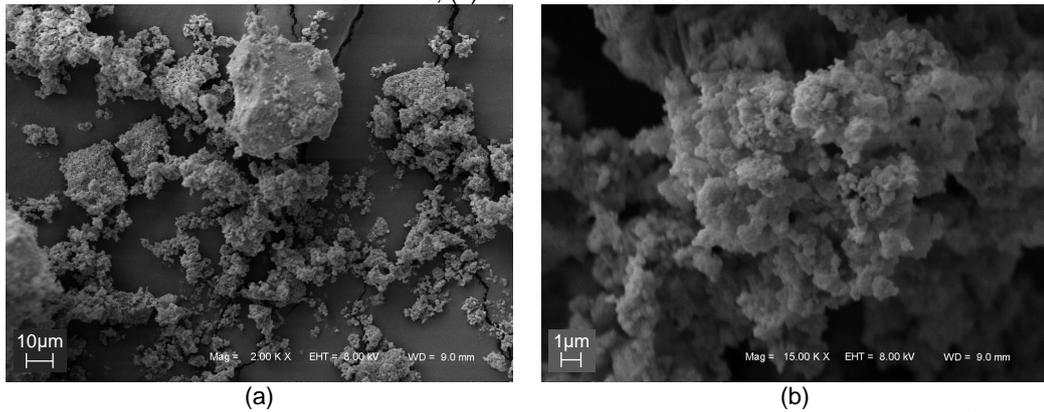
As imagens das cales cálcica e magnesiânica por MEV, com metalização por ouro e aumentos de 2.000 e 15.000 vezes, são apresentadas na Figura 26 e Figura 27, respectivamente. Evidencia-se a geometria em placas ou folhas (Figura 26b) na cal cálcica, e partículas com dimensões mais próximas. No caso da cal magnesiânica, observa-se uma elevada aglomeração e finura das partículas, embora a distribuição granulométrica não tenha apresentado este resultado, e a presença de partículas de diversos tamanhos.

Figura 26 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cal cálcica: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes



(fonte: a autora)

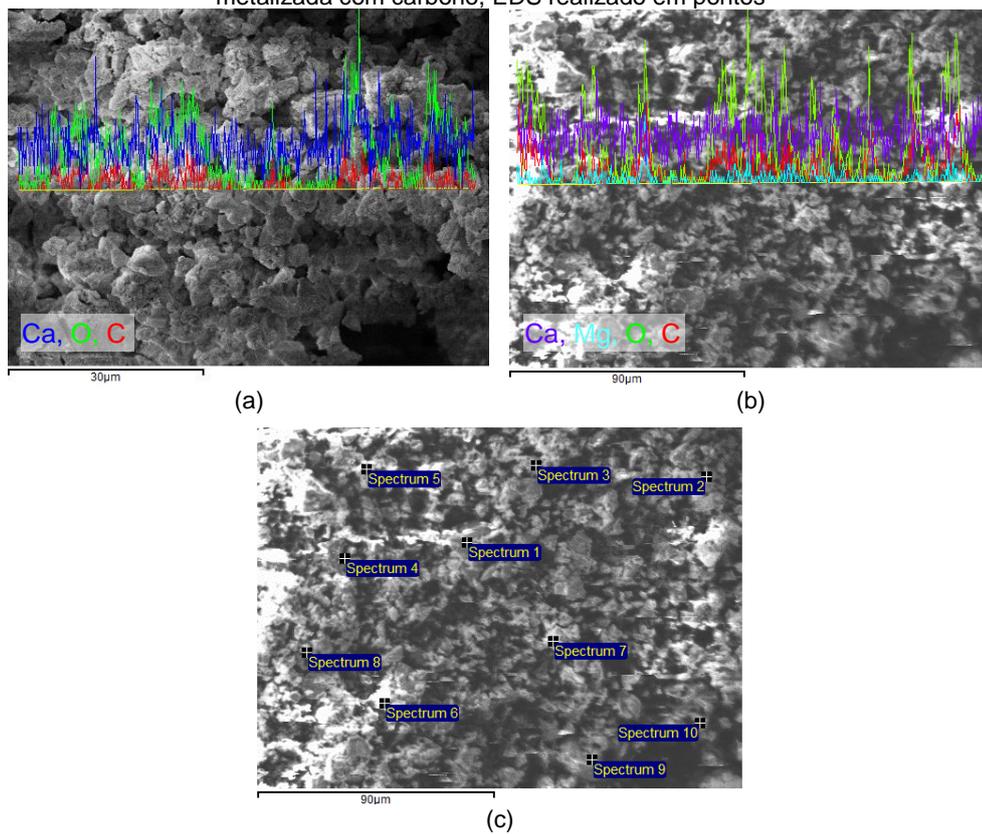
Figura 27 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cal magnesiânica: (a) aumento de 2.000 vezes; (b) aumento de 15.000 vezes



(fonte: a autora)

Na Figura 28 e Figura 29 são apresentados os locais onde foi realizado o EDS na cal cálcica e na cal magnesiânica, respectivamente.

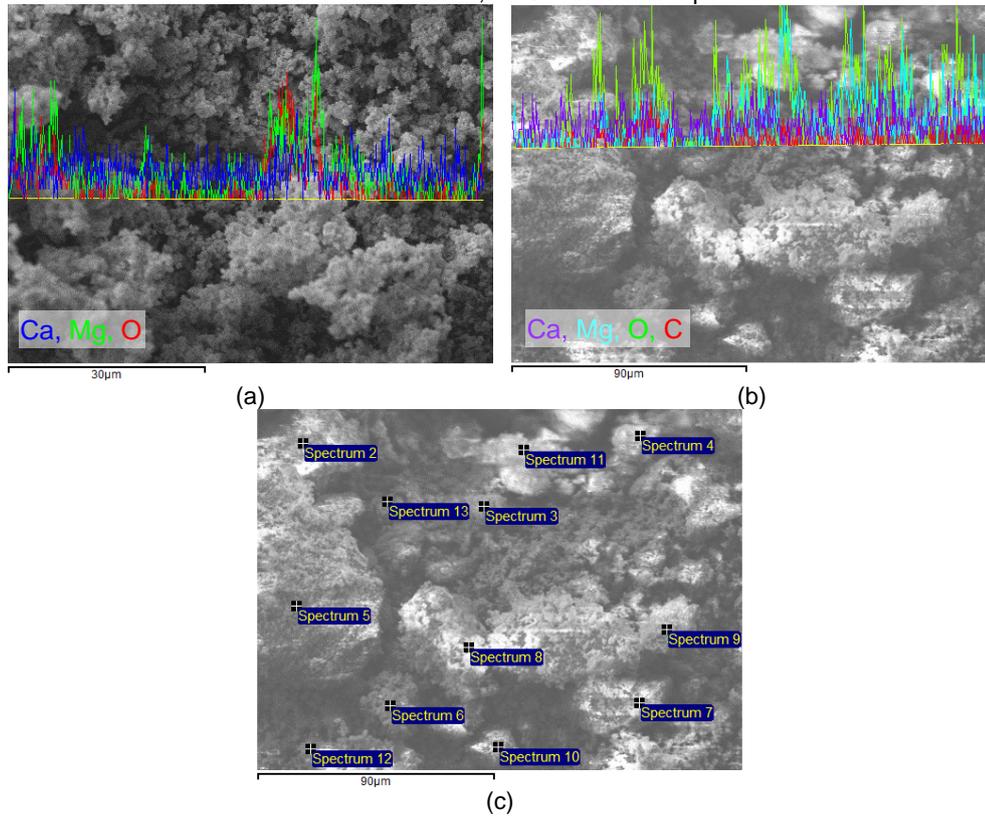
Figura 28 – Local de realização do EDS na cal cálcica: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos



(fonte: a autora)

Nestas imagens observa-se, novamente, o tamanho diverso das partículas da cal magnesiânica, em comparação com a distribuição das partículas da cal cálcica (Figura 29).

Figura 29 – Local de realização do EDS na cal magnesiana: (a) amostra metalizada com ouro, EDS realizado em linha; (b) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em linha; (c) amostra metalizada com carbono, EDS realizado em pontos



(fonte: a autora)

A quantificação dos elementos da cal cálcica e magnesiana por EDS é apresentada, respectivamente, na Tabela 23 e Tabela 24.

Tabela 23 – Elementos encontrados na amostra de cal cálcica por EDS

CAL CÁLCICA – PESO DOS ELEMENTOS (%)						
Elemento	C	O	Mg	Al	Ca	Total
Linha - metalização Au	3,61	47,17	-	-	49,22	100,00
Linha - metalização C	7,25	37,35	0,56	-	54,84	100,00
Spectrum 1	12,56	18,75	0,29	-	68,41	100,00
Spectrum 2	14,14	34,75	4,43	-	46,68	100,00
Spectrum 3	3,62	20,99	0,43	-	74,97	100,00
Spectrum 4	11,88	33,86	1,15	0,28	52,83	100,00
Spectrum 5	17,35	34,87	0,24	-	47,54	100,00
Spectrum 6	15,71	47,83	-	-	36,46	100,00
Spectrum 7	9,97	32,30	-	-	57,72	100,00
Spectrum 8	15,75	29,60	1,45	-	53,19	100,00
Spectrum 9	5,28	16,88	0,23	-	77,61	100,00
Spectrum 10	13,35	30,07	-	-	56,58	100,00
Máximo dos pontos	17,35	47,83	4,43	0,28	77,61	
Mínimo dos pontos	3,62	16,88	0,23	0,28	36,46	
Média dos pontos	11,96	29,99	1,17	0,28	57,20	

(fonte: a autora)

Tabela 24 – Elementos encontrados na amostra de cal magnesiana por EDS

CAL MAGNESIANA – PESO DOS ELEMENTOS (%)						
Elemento	C	O	Mg	Al	Ca	Total
Linha - metalização Au	-	25,68	14,97	-	59,35	100,00
Linha - metalização C	4,60	47,44	11,48	-	36,47	99,99
Spectrum 2	3,37	45,38	9,80	-	41,45	100,00
Spectrum 3	1,50	36,66	23,79	-	38,05	100,00
Spectrum 4	6,11	46,05	13,20	-	34,64	100,00
Spectrum 5	22,65	28,64	17,58	-	31,12	100,00
Spectrum 6	3,21	42,93	16,47	-	37,39	100,00
Spectrum 7	2,99	46,93	13,76	-	36,32	100,00
Spectrum 8	2,17	41,78	14,11	-	41,94	100,00
Spectrum 9	1,51	41,50	25,20	-	31,80	100,00
Spectrum 10	16,35	42,72	23,70	-	17,23	100,00
Spectrum 11	1,12	20,72	7,91	-	70,25	100,00
Spectrum 12	-	-	-	-	100,00	100,00
Spectrum 13	2,94	39,96	16,33	-	40,77	100,00
Máximo dos pontos	22,65	46,93	25,20	-	100,00	
Mínimo dos pontos	1,12	20,72	7,91	-	17,23	
Média dos pontos	5,81	39,39	16,53	-	43,41	

(fonte: a autora)

Os elementos com maiores porcentagens são o cálcio (Ca) e oxigênio (O), seguidos do carbono (C). O alumínio (Al) aparece apenas em um dos pontos da cal cálcica, e em pequena quantidade (0,28%). Verifica-se a diferença na quantidade de magnésio (Mg) entre as duas cales, apresentando-se em porcentagens de até 5% na cal cálcica, e porcentagens entre 7,9% e 25,2% na cal magnesiana, assim como esperado. Conseqüentemente, a quantidade de cálcio (Ca) apresenta-se em maiores porcentagens na cal cálcica do que na cal magnesiana.

6.1.2.9 Caracterização dos fabricantes

A caracterização das cales hidratadas realizada e fornecida pelos fabricantes é apresentada na Tabela 25. As informações são coerentes com os resultados apresentados anteriormente.

Tabela 25 – Caracterização das cales hidratadas segundo fabricantes

ANÁLISE		CÁLCICA	MAGNESIANA	LIMITES NBR 7175 - CH I (ABNT, 2003b)
Químicas	CaO _t + MgO _t (%)	-	95,10	mín 90%
	CaO (%)	73,80	55,98	-
	MgO (%)	1,81	-	-
	Ca(OH) ₂ (%)	91,23	73,95	-
	Óxidos Não Hidratados (%)	-	8,77	máx 10%
	RI+SiO ₂ (%)	0,68	-	-
	Umidade (%)	0,75	0,60	-
	CO ₂ (%)	-	3,77	máx 5% (na fábrica)
	Perda ao fogo (%)	23,02	-	-
Físicas	Material retido 30 mesh	-	0,00	máx 0,5%
	na peneira (%) 100 mesh	1,40	-	-
	200 mesh	-	8,34	máx 10%

(fonte: dados dos fabricantes)

6.1.3 Caracterização do agregado miúdo

Os resultados de caracterização das duas composições do agregado miúdo utilizados neste trabalho são apresentados neste capítulo.

6.1.3.1 Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima

A distribuição granulométrica das frações em peneiras intermediárias é apresentada na Tabela 26. Observa-se, para as frações 16, 30 e 50, uma distribuição próxima entre as duas peneiras principais, enquanto que para a fração 100, 71% dos grãos se concentram retidos na peneira 0,212mm. Atentou-se para que a porcentagem de material retido em peneiras que não caracterizavam determinada fração, ou seja, o erro, fosse menor que 10%, caso contrário, a fração era novamente peneirada e caracterizada.

Tabela 26 – Distribuição granulométrica das frações de agregado miúdo em peneiras intermediárias

	Abertura de malha da peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
Fração 16	2,36	2	2
	1,7	37	39
	1,18	58	97
	<1,18	3	100
Fração 30	1,18	2	2
	0,85	41	43
	0,6	56	99
	< 0,6	1	100
Fração 50	0,6	2	2
	0,425	45	46
	0,3	52	99
	<0,3	1	100
Fração 100	0,3	5	5
	0,212	71	75
	0,15	23	98
	< 0,15	2	100

(fonte: a autora)

Utilizando-se os resultados obtidos na distribuição das frações, foram calculadas as duas composições granulométricas reais (Tabela 27).

Tabela 27 – Composição granulométrica real dos agregados miúdos, caracterizada com peneiras da série normal e intermediária

Abertura da malha da peneira (mm)	CG10		CG25	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
2,36	0,2	0	0,6	1
1,70	3,7	4	9,3	10
1,18	6,4	10	14,9	25
0,85	16,7	27	10,9	36
0,60	23,3	50	14,5	50
0,43	18,2	69	11,4	62
0,30	21,4	90	14,2	76
0,21	7,6	98	17,7	94
0,15	2,3	100	5,6	99
< 0,15	0,2	100	1,0	100

(fonte: a autora)

Os proporcionamentos reais e teóricos, apenas com as peneiras da série normal, são comparadas na Tabela 28. Observa-se que ocorrem pequenas variações na CG25 real, mas menores que 2%. Nesta Tabela 28 também é apresentada a dimensão máxima característica e o módulo de finura para as duas composições. Observa-se que estas características são iguais em ambos os casos, e que apenas o módulo de finura variou, de 2,50 para 2,51, no caso da CG25 real. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009b), o módulo de finura no intervalo de 2,2 a 2,9 indica que o agregado miúdo está na zona ótima para utilização em concretos.

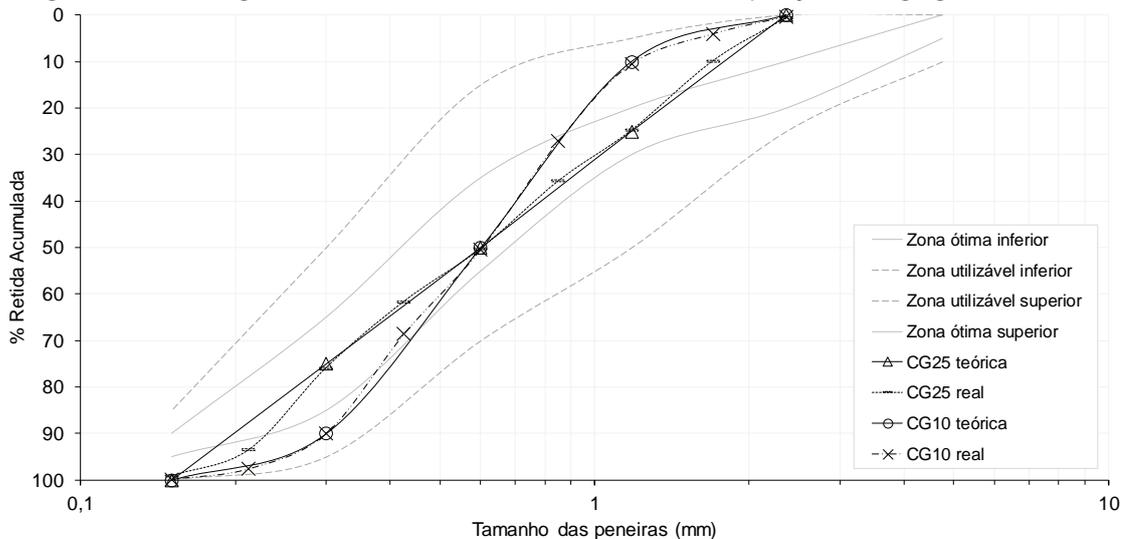
Tabela 28 – Comparativo entre a composição granulométrica teórica e a real, dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos utilizados

COMPOSIÇÃO	CG 10				CG 25			
	Real		Teórica		Real		Teórica	
	% retida	% retida acumulada						
Abertura da malha da peneira (mm)								
2,36	0	0			1	1		
1,18	10	10	10	10	24	25	25	25
0,60	40	50	40	50	25	50	25	50
0,30	40	90	40	90	26	76	25	75
0,15	10	100	10	100	23	99	25	100
< 0,15	0	100			1	100		
Dimensão máxima característica - DM (mm)	2,36		2,36		2,36		2,36	
Módulo de finura - MF	2,50		2,50		2,51		2,50	

(fonte: a autora)

As curvas granulométricas das duas composições são apresentadas na Figura 30, sendo observadas pequenas variações entre a distribuição teórica e a real. Verifica-se ainda que todas estão inseridas entre a zona utilizável descrita para agregados miúdos de concretos pela NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Figura 30 – Curvas granulométricas, teóricas e reais, das duas composições de agregados miúdos



(fonte: a autora)

6.1.3.2 Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade

O D_{10} , D_{60} , diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade, são apresentados na Tabela 29. O diâmetro efetivo da CG 10 é maior, indicando que esta é mais permeável que a CG25. Por sua vez, a CG 25 possui um coeficiente de uniformidade maior, ou seja, é mais bem graduada que a CG 10. Ainda para a CG 25, observa-se uma pequena variação quando estes parâmetros são calculados a partir da curva teórica ou da curva real.

Tabela 29 – Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade das composições granulométricas CG 10 e CG 25, real e teórica

COMPOSIÇÃO	CG10		CG25	
	Real	Teórica	Real	Teórica
D_{10} (mm)	0,30	0,30	0,23	0,21
D_{60} (mm)	0,70	0,70	0,76	0,78
Diâmetro efetivo D.E. (mm)	0,30	0,30	0,23	0,21
Coeficiente de uniformidade C.U.	2,33	2,33	3,30	3,80

(fonte: a autora)

6.1.3.3 Massa específica e unitária, absorção de água e volume de vazios

A caracterização quanto à massa específica e absorção de água (Tabela 30) da areia média e grossa, utilizadas para o peneiramento foram similares, sendo diferente apenas a absorção de água da areia média, 0,11% acima da absorção da areia grossa. Na Tabela 30 também são apresentados os resultados de massa unitária e índice do volume de vazios para as composições utilizadas neste trabalho, CG10 e CG25. Observa-se que a massa unitária é maior para a CG25 e, conseqüentemente, o volume de vazios é menor neste proporcionamento.

Tabela 30 – Massa específica e absorção de água das areias média e grossa; massa unitária e índice do volume de vazios das composições CG10 e CG25

MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA				
Ensaio	Método	Areia média	Areia grossa	Unidade
Massa específica do agregado seco		2,61	2,61	
Massa específica do agregado saturado superfície seca	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	2,62	2,62	g/cm ³
Massa específica		2,65	2,65	
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001b)	0,59	0,48	%
MASSA UNITÁRIA E ÍNDICE DO VOLUME DE VAZIOS				
Ensaio	Método	CG10	CG25	Unidade
Massa unitária		1467	1517	
Massa unitária do agregado saturado superfície seca	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475	1525	kg/m ³
Índice do volume de vazios	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	43,7	41,8	%

(fonte: a autora)

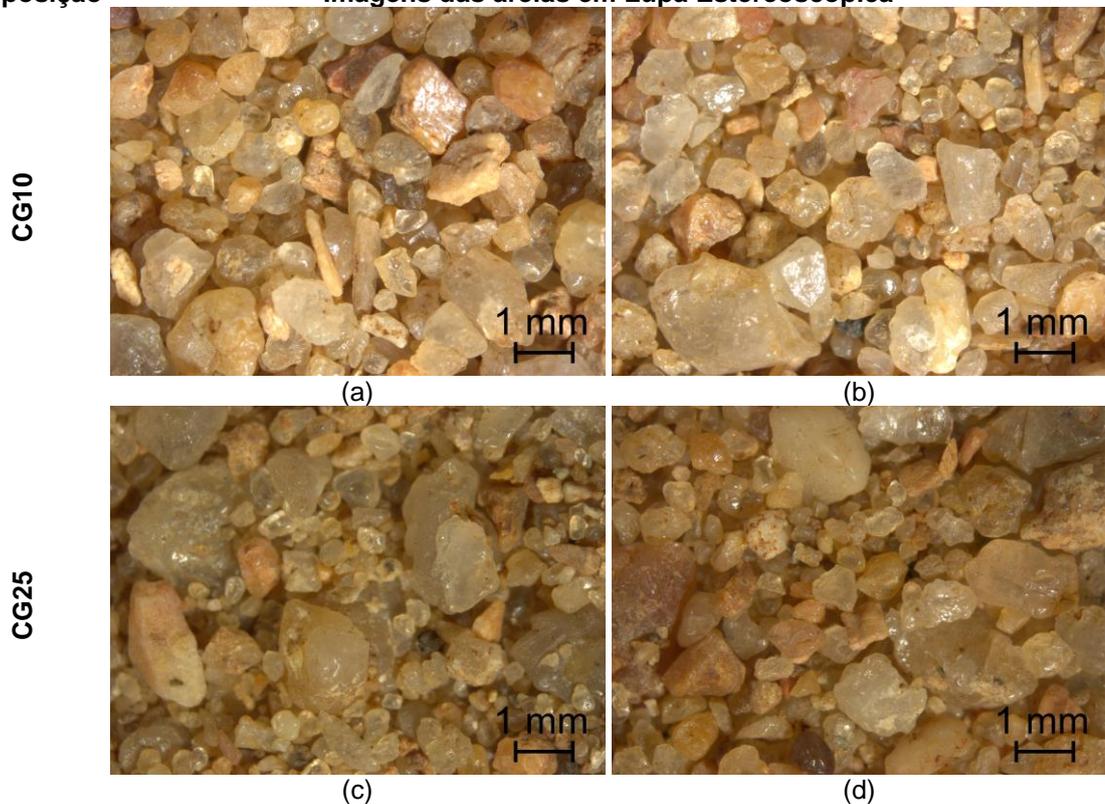
6.1.3.4 Imagens em lupa estereoscópica

As imagens da areia em lupa estereoscópica foram feitas, primeiramente, para as duas composições granulométricas do agregado miúdo, CG10 e CG25 (Figura 36). Verifica-se, para a CG 10, a maior presença das frações intermediárias e, para a CG 25, uma distribuição de todos os tamanhos de grãos, sendo esta, aparentemente, mais compacta que a CG 10. Observa-se também que os grãos não apresentam formato apenas arredondado.

Figura 31 – Imagens em lupa estereoscópica das composições do agregado miúdo, com aumento de 20x0,65: a) CG 10; b) CG 10; c) CG 25; d) CG 25

Composição

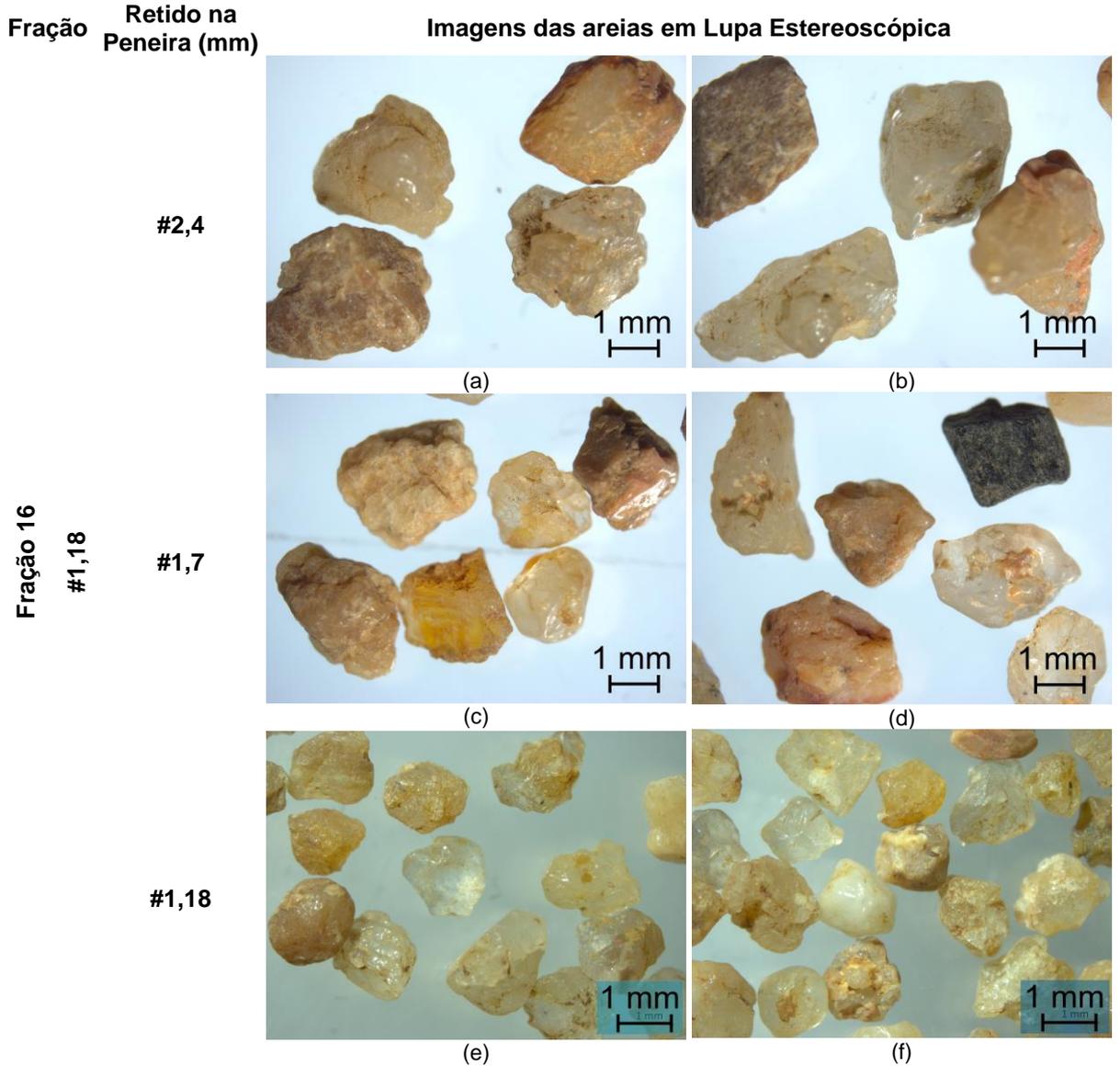
Imagens das areias em Lupa Estereoscópica



(fonte: a autora)

Também foram realizadas imagens das frações de areia retidas entre as peneiras da série intermediária. Para facilitar, as imagens foram divididas no Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35. Observa-se, em geral, partículas com formato entre cúbico e esférico, algumas delas com superfície rugosa e outras com superfície lisa. Observa-se maior variedade de minerais e cores nos grãos maiores, enquanto que o mineral predominante dos grãos menores é o quartzo.

Figura 32 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras, com aumento de 20x0,65: a) e b) 2,4mm; c) e d) 1,7mm; e) e f) 1,2mm



(fonte: a autora)

Figura 33 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a) e b) 0,85mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6 c) e d) 0,6mm, com aumento de 20x0,65 e 20x1,6

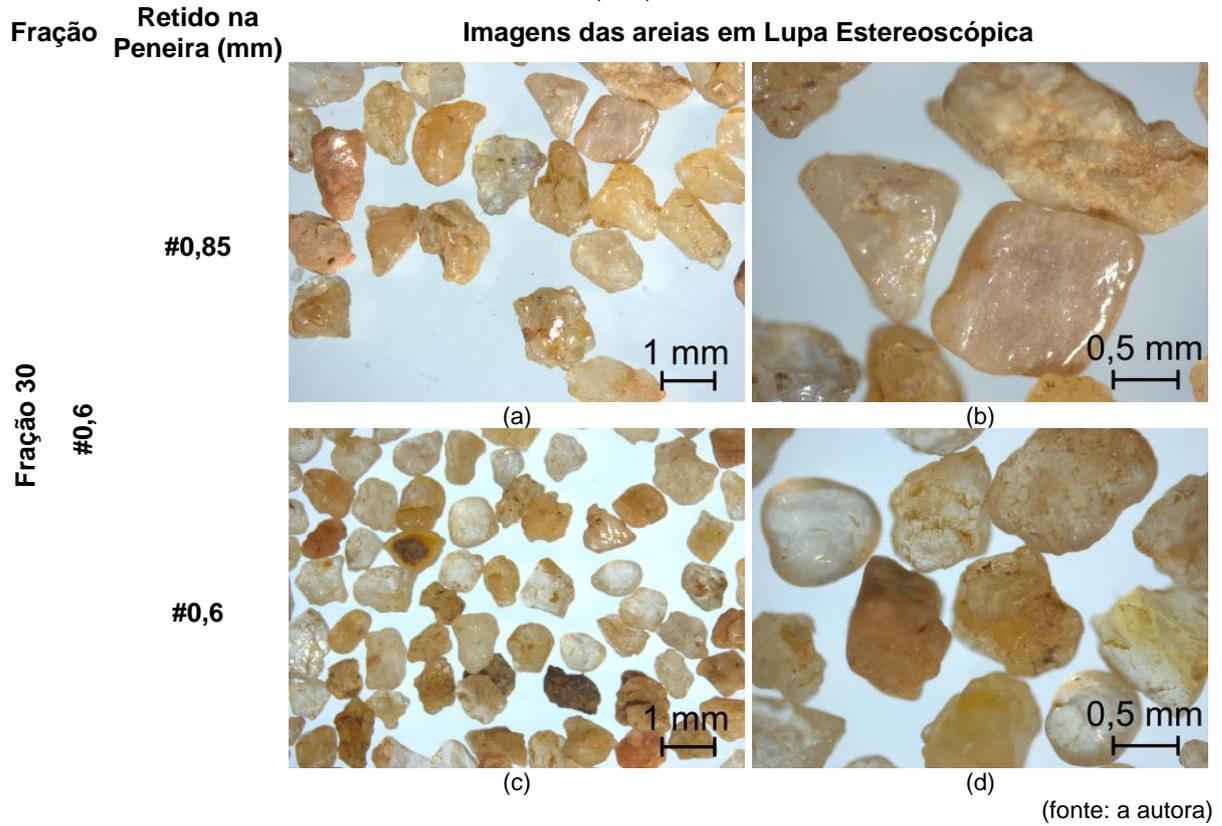


Figura 34 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a) e b) 0,42mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6 c) e d) 0,3mm, com aumento de 20x0,65 e de 20x1,6

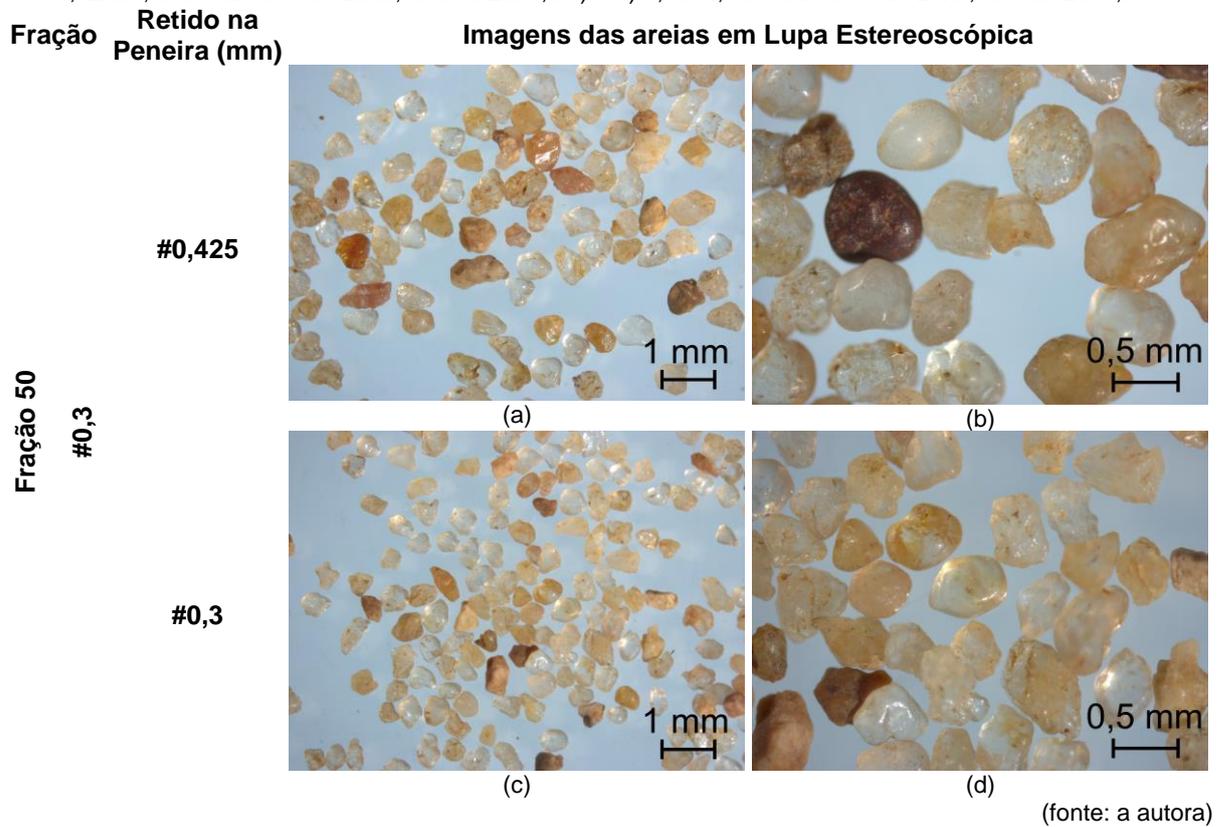
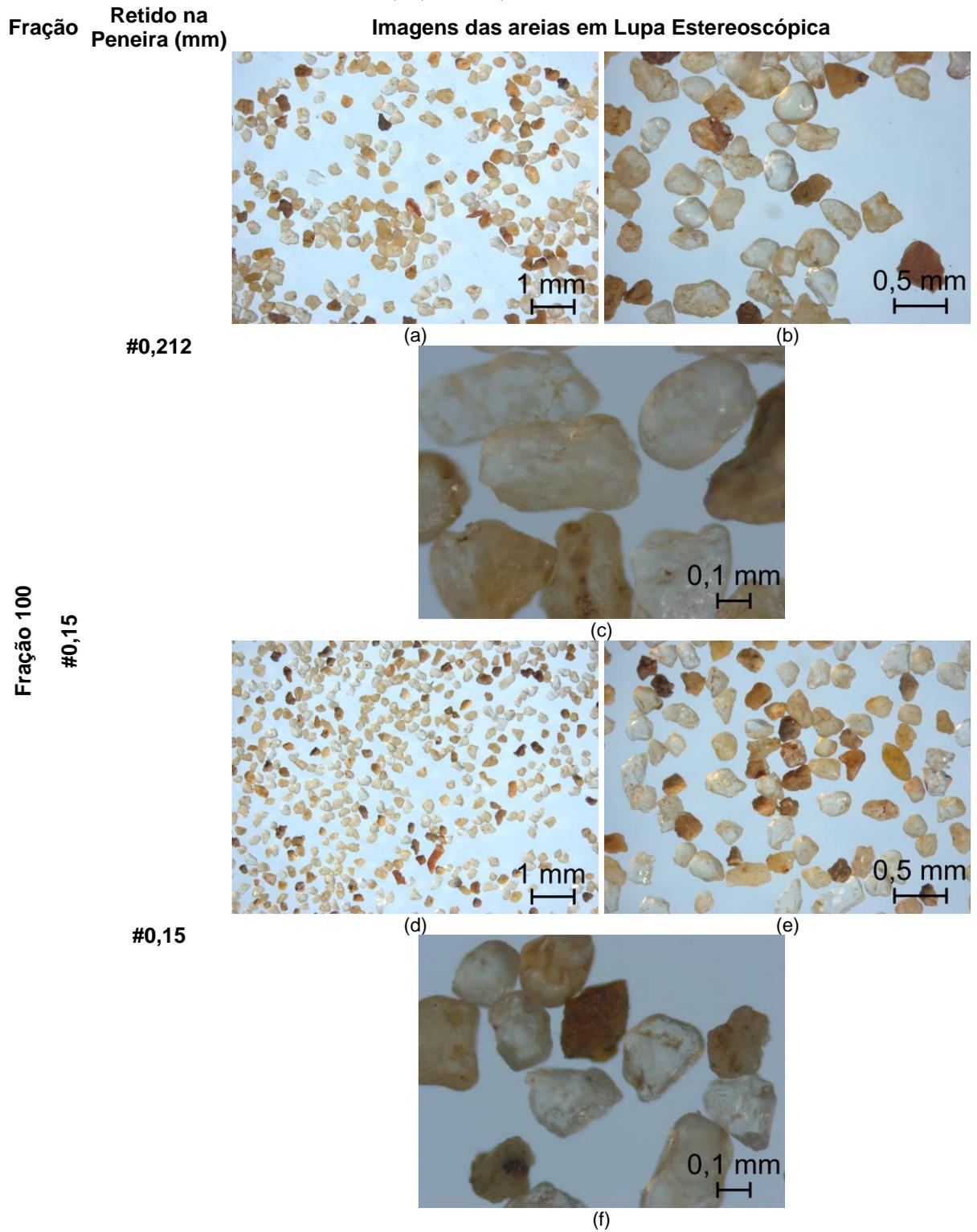


Figura 35 – Imagens em lupa estereoscópica das frações de areia retiradas nas peneiras: a), b) e c) 0,215mm, com aumento de 20x0,65, de 20x1,6 e de 20x5; d), e) e f) 0,15mm, com aumento de 20x0,65, de 20x1,6 e de 20x5



6.1.4 Resumo dos ensaios de caracterização

O resumo dos ensaios de caracterização dos aglomerantes e dos agregados são apresentados na Tabela 31 e Tabela 32, respectivamente.

Tabela 31 – Resumo dos ensaios de caracterização dos aglomerantes

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES				
	Ensaio	CP II F 32	Cal Cálctica	Cal Magnésiana
Análises Físicas	Área Superficial (m ² /g)	4,395	8,277	10,329
	D _{médio} (µm)	19,11	9,98	16,92
	Material retido na peneira 200 (%)	3,63	2,15	10,10
	Material retido na peneira 30 (%)	-	0,07	0,11
	Massa específica (g/cm ³)	3,06	2,24	2,37
	Massa unitária (g/cm ³)	0,95	0,45	0,45
	Plasticidade (índice)	-	142	214
	Incorporação de Areia (cal:areia)	-	1:5,6	1:4,8
	Retenção de Água (%)	-	91,06	87,96
Análises Químicas	CaO (%)	64,34	95,17	72,94
	MgO (%)	1,81	1,40	18,95
	SiO ₂ (%)	18,91	1,68	6,05
	Fe ₂ O ₃ (%)	4,92	0,63	0,96
	Al ₂ O ₃ (%)	2,83	0,48	0,55
	SO ₃ (%)	5,02	0,20	0,32
	Umidade (%)	0,43	1,51	1,51
	Água combinada Mg(OH) ₂	-	0,32	7,21
	Água combinada Ca(OH) ₂	-	20,84	11,33
	CO ₂ (%)	4,33	2,70	6,77
	Perda ao fogo (%)	5,96	25,92	27,28
Potencial Zeta (mV)	-12,78	-8,38	-12,20	
Análise Mecânica	f _{ck} - 3 dias (MPa)	15,89	-	-
	f _{ck} - 7 dias (MPa)	20,27	-	-
	f _{ck} - 28 dias (MPa)	27,69	-	-

(fonte: a autora)

Tabela 32 – Resumo dos ensaios de caracterização dos agregados

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS				
	Ensaio	Areia Média	Areia Grossa	
Análises Físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,65	
	Absorção de água (%)	0,59	0,48	
		Ensaio	CG10	CG25
	Massa unitária (kg/m ³)	1467	1517	
	Índice de volume de vazios (%)	43,7	41,8	
	Fração 16 (% retida)	10	24	
	Fração 30 (% retida)	40	25	
	Fração 50 (% retida)	40	26	
	Fração 100 (% retida)	10	23	
	Diâmetro máximo (mm)	2,36	2,36	
Módulo de Finura	2,5	2,51		

(fonte: a autora)

6.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

O índice de consistência e a densidade de massa no estado fresco foram obtidos através de um ensaio único, resultando, portanto, em um valor individual para cada uma das argamassas. Por sua vez, os resultados de reometria rotacional foram obtidos através de três ensaios consecutivos para cada argamassa. Desta forma, foi possível realizar a análise de variância (ANOVA) com limite de confiança de 95% (significância de 5%). Para o caso que foi realizada a comparação entre médias, a análise foi feita pelo método de Duncan's. Utilizou-se para tal o software Statistica 8.0.

6.2.1 Índice de consistência

Os índices de consistência de cada uma das argamassas são apresentados na Tabela 33. Para melhor visualizar estes resultados, foram elaborados gráficos relacionando o índice de consistência com a água/aglomerante, divididos entre as três relações aglomerante:agregado (Figura 36) e entre as três relações cimento:cal (Figura 37). Os resultados aqui obtidos serão melhor discutidos na análise da reometria rotacional, no item 6.2.2.1.

Observa-se que, para uma mesma relação aglomerante:agregado e uma mesma relação água/aglomerante, o aumento do volume de cal gera uma redução do índice de consistência. Por sua vez, mantido o teor de cal e a relação água/aglomerante, o aumento do volume de agregado também gera a redução do índice de consistência. Também verifica-se uma tendência de que as argamassas com a CG10 ou com a cal hidratada magnésiana (CM) apresentam menor índice de consistência do que aquelas com a CG25 ou com a cal hidratada cálcica (CC).

Para argamassas muito fluidas, com diâmetros médios de abertura acima de 300mm, observa-se que a adição de maior quantidade de água não aumenta o índice de consistência na mesma proporção do que anteriormente, mas um pouco menos. Esta mesma perda de proporção ocorre com argamassas com consistência intermediária que tiveram sua quantidade de água reduzida para índices abaixo de 220mm. Ou seja, parece existir uma limitação deste ensaio nestes dois casos.

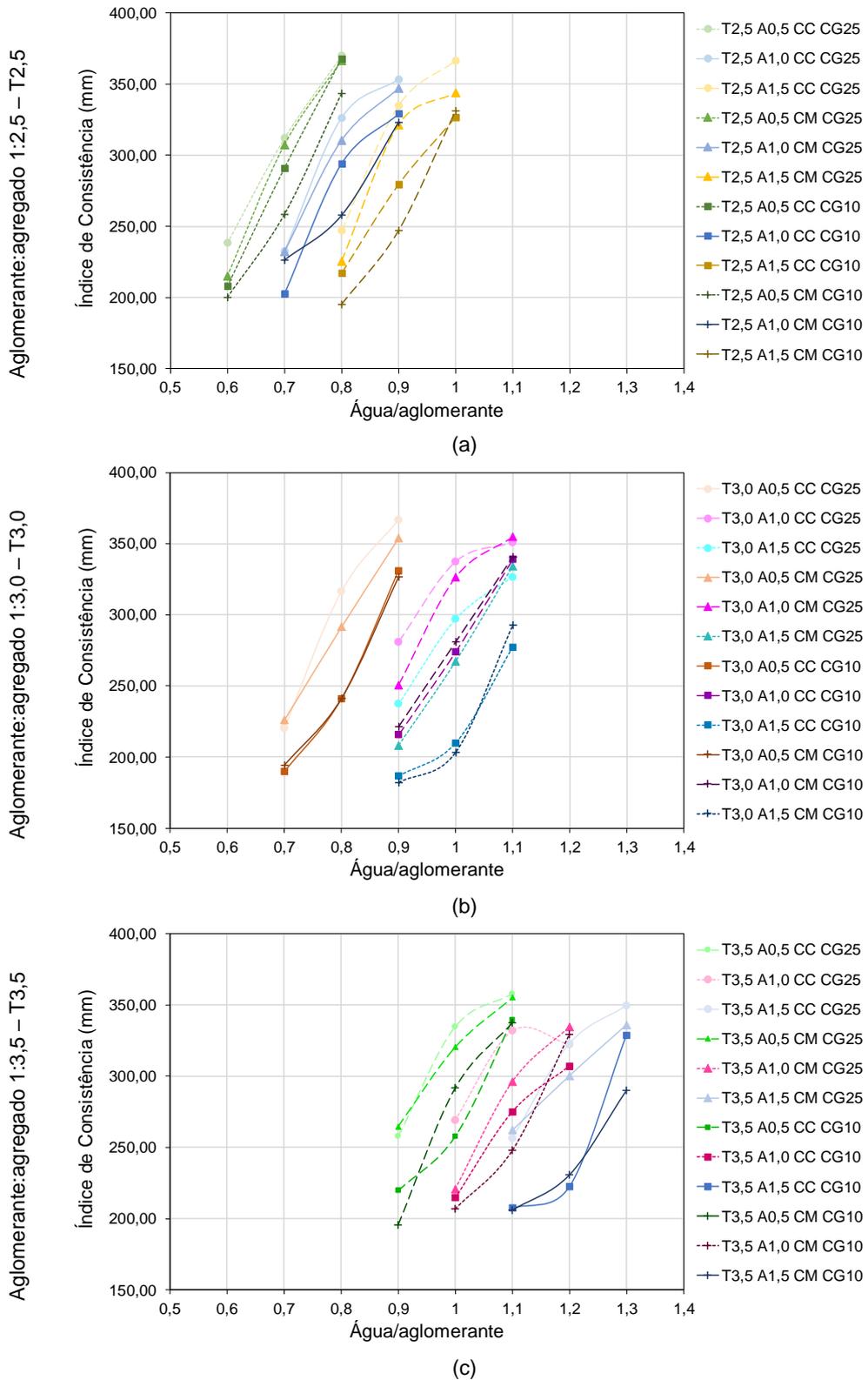
Tabela 33 – Índice de consistência das argamassas confeccionadas com diferentes proporcionamentos, composições granulométricas da areia e tipos de cal hidratada⁷

				Índice de consistência (mm)									
Variáveis de controle		Grupo		Água/Aglomerante									
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	238,25	311,80	369,67						
			1:1	T2,5 A1,0		232,25	326,00	353,17					
			1:1,5	T2,5 A1,5			246,75	334,67	366,33				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		220,50	316,60	367,00					
			1:1	T3,0 A1,0				281,00	337,50	350,80			
			1:1,5	T3,0 A1,5				237,33	297,00	326,60			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				257,67	334,60	357,67				
		1:1	T3,5 A1,0					269,00	331,83	322,20			
		1:1,5	T3,5 A1,5						256,50	322,80	349,60		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	214,80	307,20	366,33						
			1:1	T2,5 A1,0		232,00	310,33	347,00					
			1:1,5	T2,5 A1,5			225,25	321,33	343,75				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		226,20	291,60	354,00						
		1:1	T3,0 A1,0				250,67	326,60	355,00				
		1:1,5	T3,0 A1,5				208,33	267,40	334,40				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				264,67	320,40	355,20				
		1:1	T3,5 A1,0					220,67	296,00	334,60			
		1:1,5	T3,5 A1,5						262,00	300,25	336,00		
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	207,80	290,80	367,67						
			1:1	T2,5 A1,0		202,50	294,00	329,00					
			1:1,5	T2,5 A1,5			217,00	279,40	326,60				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		190,00	241,25	331,25					
			1:1	T3,0 A1,0				215,67	274,00	339,00			
			1:1,5	T3,0 A1,5				186,75	210,00	277,40			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				219,67	257,75	339,33				
		1:1	T3,5 A1,0					214,67	275,00	307,00			
		1:1,5	T3,5 A1,5						207,33	222,40	328,83		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	200,20	258,50	343,50						
			1:1	T2,5 A1,0		226,50	257,75	322,90					
			1:1,5	T2,5 A1,5			195,25	247,00	331,00				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		194,25	241,20	326,60						
		1:1	T3,0 A1,0				221,67	281,00	340,60				
		1:1,5	T3,0 A1,5				182,00	203,25	292,67				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				195,67	291,60	337,33				
		1:1	T3,5 A1,0					207,00	248,00	329,50			
		1:1,5	T3,5 A1,5						206,00	230,75	290,20		

(fonte: a autora)

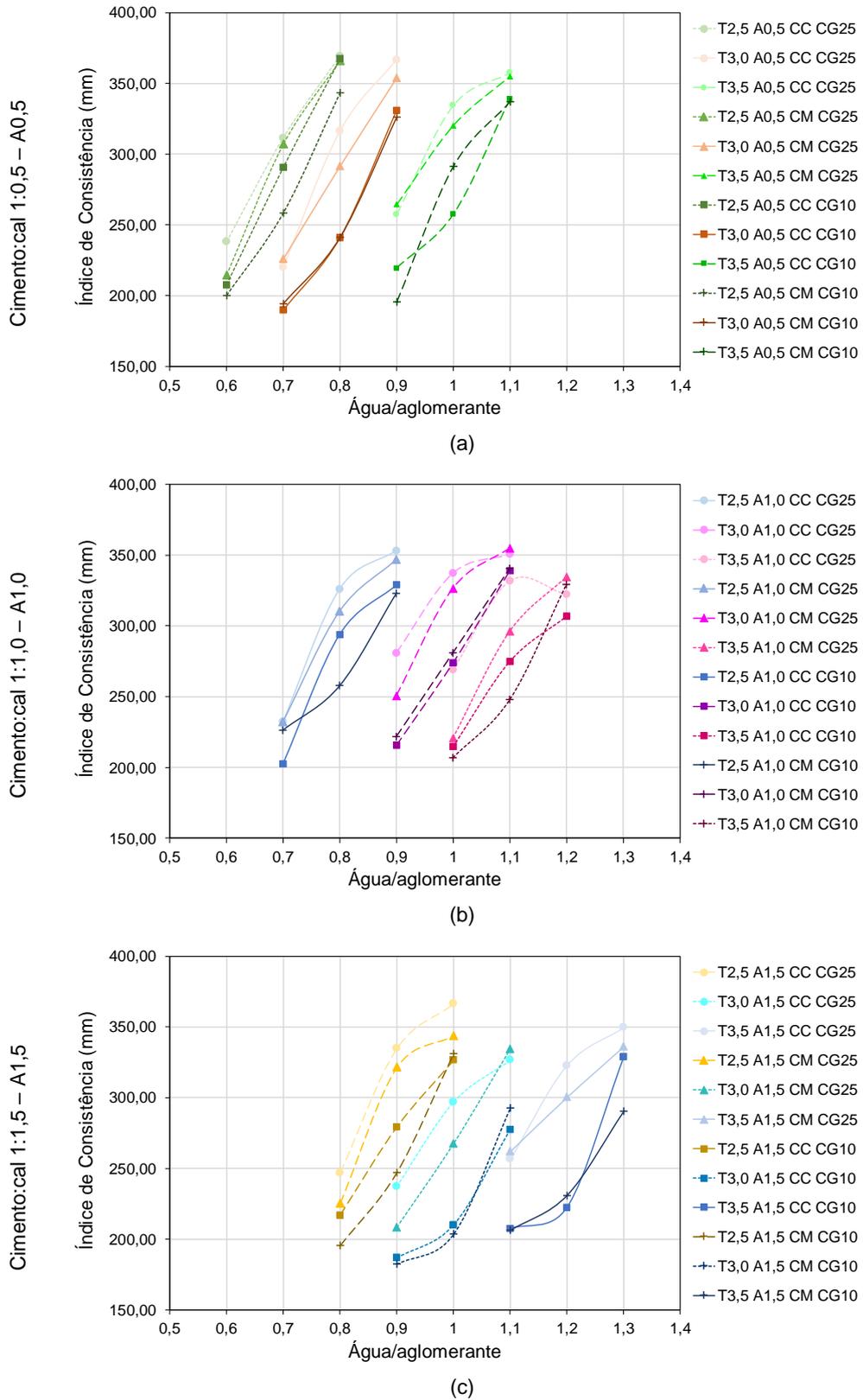
⁷ Os resultados correspondem à média de 3 diâmetros de abertura medidos

Figura 36 – Relação do índice de consistência com a água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Figura 37 – Variação do índice de consistência em relação à água/aglomerante das argamassas com relação cimento:cal de: a) 1:0,5; b) 1:1,0 e c) 1:1,5

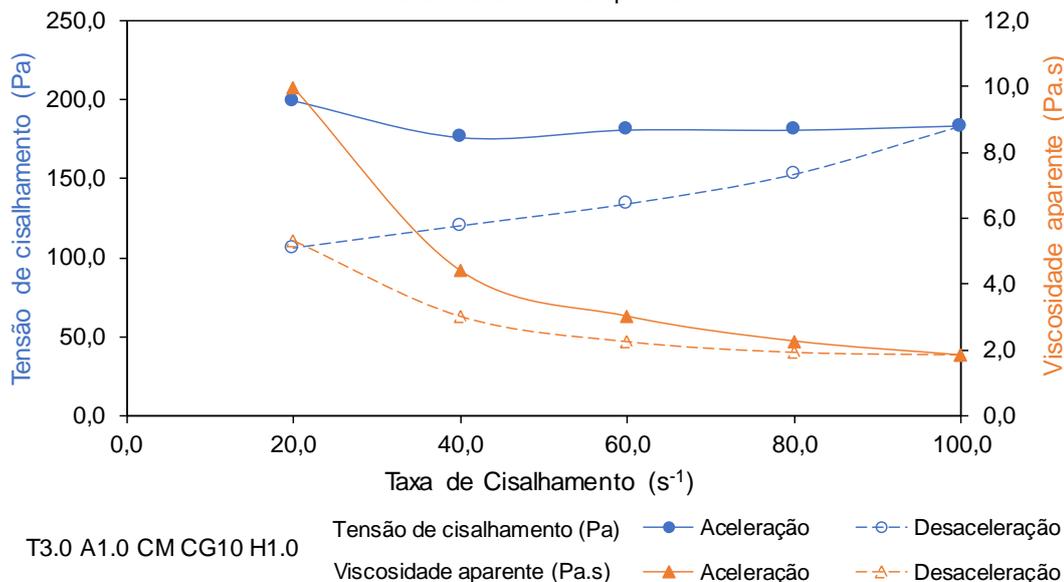


(fonte: a autora)

6.2.2 Reometria rotacional

Do ensaio de reometria rotacional foram obtidos os dados de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente, resultantes das taxas de cisalhamento aplicadas. Para cada argamassa foi calculada a média destes dados em função da taxa de cisalhamento, sendo o valor resultante organizados em curvas semelhantes às do modelo da Figura 38, apresentadas no Apêndice A.

Figura 38 – Modelos de curvas de tensão de cisalhamento e de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento aplicada



(fonte: a autora)

É importante salientar que a parte inicial das duas curvas não inicia no ponto zero, pois estas argamassas possuem uma determinada tensão de escoamento. Desta forma, são apresentados nos gráficos apenas os valores obtidos através das medições do ensaio.

O formato das curvas e escala dos resultados da tensão de cisalhamento é semelhante ao trabalho já realizado anteriormente por Stolz (2015) e Petry (2015). Cardoso *et al.* (2014) apresenta valores de tensão de cisalhamento inicial com escalas próximas às deste trabalho.

A curva de ida da tensão de cisalhamento possui um valor inicial elevado na taxa de $20s^{-1}$, o qual é reduzido com o aumento da taxa de cisalhamento para $40s^{-1}$. Para valores crescentes da taxa de cisalhamento, a tensão de cisalhamento tende a manter-se ou aumentar. A curva de volta possui uma tendência linear, sendo que a tensão de cisalhamento diminui conforme ocorre a redução da taxa de cisalhamento.

A redução da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa de $20s^{-1}$ para $40s^{-1}$ foi resultado das definições e limitações do ensaio (rotina, tipo de palheta, torque do reômetro). Pode ser explicada por diferentes fatores.

Primeiramente é importante observar que argamassas são materiais que apresentam tanto comportamento coloidal quando granular (QIAN; KAWASHIMA, 2016). Os autores realizaram

estudo inicial sobre o escorregamento dos agregados em argamassas com a aplicação de taxas de cisalhamento. Verificaram que a tensão para a defloculação da pasta de cimento é menor do que para a movimentação de areia, uma vez que o primeiro possui partículas mais finas. Identificaram que estes dois fenômenos aumentam com o aumento do volume de areia, que a adição de partículas finas (nanoargila) reduziu a movimentação da areia, e que o aumento da velocidade de ensaio constante, de 10 para 20rad/s não influenciou no resultado.

Cardoso *et al.* (2014) dizem que esta redução da tensão inicial pode estar relacionada com argamassas de menor trabalhabilidade, que não são suficientemente fluidas para voltarem para a área de giro do *spindle* após deformadas por maiores taxas de cisalhamento. Os autores discutem também que pode ocorrer movimentação das partículas de agregado para fora da área de influência do giro, e aumento do teor de água na área central, o que depende do tamanho das partículas e da viscosidade da pasta.

Estes podem ser alguns dos motivos pelos quais a caracterização na rotina de ida em altas taxas e da rotina de volta possuem variáveis que não contribuem para a análise da tensão de cisalhamento. Portanto, os resultados dos ensaios na rotina de ida e em menores taxas de cisalhamento, representariam melhor a argamassa; Segundo Cardoso *et al.* (2014), o valor no início dos testes possui menor influência do escorregamento e segregação das partículas do que os demais pontos.

A curva da viscosidade aparente (Figura 38) é relacionada à curva da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento. Verifica-se, portanto, um valor máximo de viscosidade aparente na taxa de $20s^{-1}$ e, quanto maior a taxa de cisalhamento, menor este valor, atingindo um mínimo em $100s^{-1}$.

Para efeito deste trabalho, será realizada uma análise **comparativa** entre as argamassas através dos parâmetros medidos. E estes parâmetros estão atrelados ao método de medição utilizado (*spindle*, rotina de ensaio), não podendo ser desvinculados destes, caso contrário, ocorrerá mudanças nas respostas medidas. O enfoque será a análise da tensão de cisalhamento inicial, na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração; da tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$, e da tensão de cisalhamento final, na taxa de $20s^{-1}$ na desaceleração. Em seguida, será analisada a área de histerese, entre as curvas de ida e volta da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento.

6.2.2.1 Tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração

A tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração, na maioria dos casos, corresponde à máxima dentre as medidas e, por este motivo, serve como um bom indicativo para comparação entre as argamassas. A média dos resultados são apresentados na Tabela 34. Na Figura 39, são comparados os resultados com as mesmas relações entre aglomerante:agregado. Da mesma forma, na Figura 40, são comparados os resultados com mesma relação entre cimento:cal.

Tabela 34 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração (Pa) e agrupamento das variáveis para realização da análise de variância

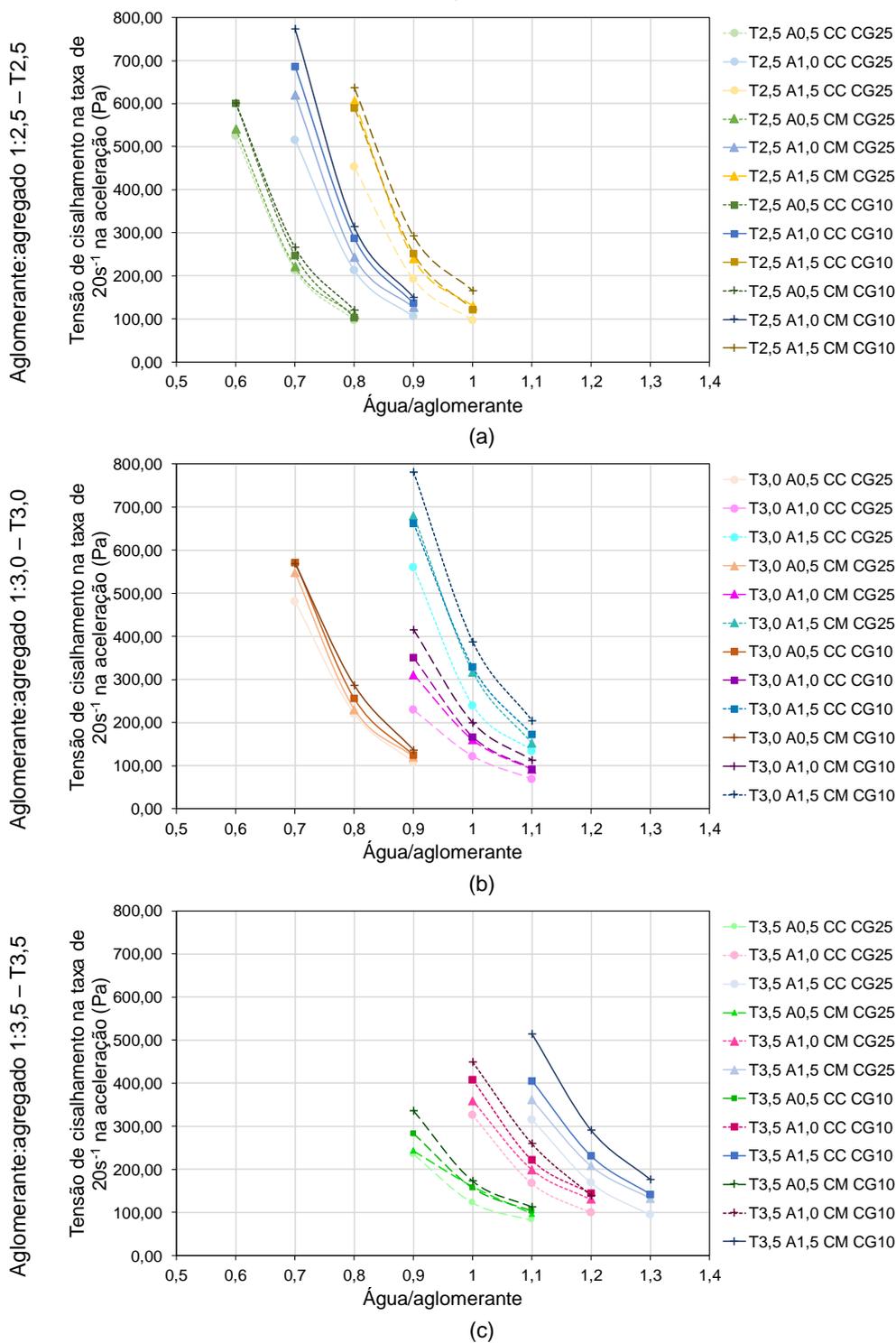
		Tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração (Pa)											
Variáveis de controle		Grupo		Água/Aglomerante									
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	523,32	212,81	96,21						
			1:1	T2,5 A1,0		515,31	212,52	104,71					
			1:1,5	T2,5 A1,5			452,59	191,75	96,42				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		481,05	220,03	107,60					
			1:1	T3,0 A1,0				230,03	122,10	69,00			
			1:1,5	T3,0 A1,5				560,19	239,68	134,44			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				234,41	121,77	81,35				
		1:1	T3,5 A1,0					325,44	166,57	98,38			
		1:1,5	T3,5 A1,5						315,18	168,32	94,29		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	540,20	220,13	109,60						
			1:1	T2,5 A1,0		619,71	243,23	126,24					
			1:1,5	T2,5 A1,5			605,34	238,90	129,51				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		547,98	230,58	120,37						
		1:1	T3,0 A1,0				311,35	159,66	91,39				
		1:1,5	T3,0 A1,5				680,16	317,30	151,77				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				242,66	159,62	96,52				
		1:1	T3,5 A1,0					358,42	198,76	129,38			
		1:1,5	T3,5 A1,5						360,56	207,00	132,00		
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	599,29	246,29	102,70						
			1:1	T2,5 A1,0		685,71	287,12	135,90					
			1:1,5	T2,5 A1,5			589,82	251,59	121,54				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		571,60	255,97	124,55					
			1:1	T3,0 A1,0				351,00	166,85	92,56			
			1:1,5	T3,0 A1,5				661,96	328,66	172,62			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				282,39	155,95	102,43				
		1:1	T3,5 A1,0					407,27	221,05	144,00			
		1:1,5	T3,5 A1,5						404,81	230,18	141,36		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	601,17	265,79	120,78						
			1:1	T2,5 A1,0		773,66	313,27	150,15					
			1:1,5	T2,5 A1,5			637,11	291,56	164,83				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		569,38	286,96	136,77						
		1:1	T3,0 A1,0				415,35	199,52	112,54				
		1:1,5	T3,0 A1,5				781,10	387,26	204,69				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				335,02	172,27	112,56				
		1:1	T3,5 A1,0					448,31	259,01	139,25			
		1:1,5	T3,5 A1,5						513,35	290,07	176,10		

(fonte: a autora)

Além das observações anteriores, desta vez comparando-se as argamassas com mesma relação aglomerante:agregado e mesma relação cimento:cal, identifica-se que argamassas com a CG 10 apresentam uma tensão de cisalhamento inicial maior que aquelas com a CG25, e que aquelas com a CM também apresentam este fator maior do que aquelas com a CC.

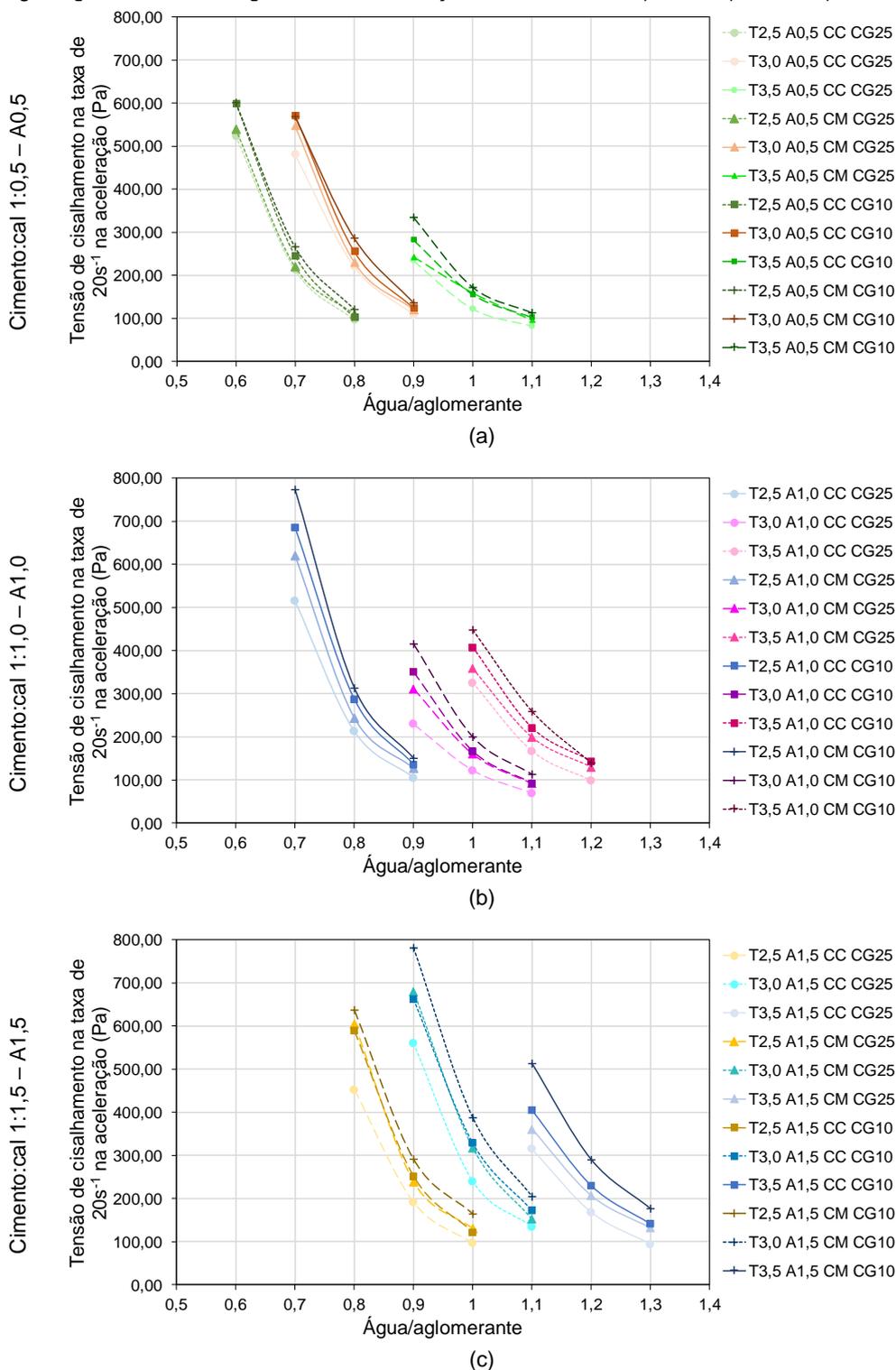
Estes resultados de tensão de cisalhamento são coerentes com os resultados de índice de consistência apresentados anteriormente, e estão vinculados de forma inversa: quanto maior a tensão de cisalhamento inicial da argamassa, menor o índice de consistência.

Figura 39 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Figura 40 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação cimento:cal de: a) 1:0,5; b) 1:1,0 e c) 1:1,5



(fonte: a autora)

Uma vez que as argamassas possuem cinco variáveis de controle e relações água/aglomerante variáveis entre os diferentes proporcionamentos, não foi possível realizar a análise estatística de todas elas juntamente. Desta maneira, foram divididas em 9 grupos,

que possuíam em comum o traço aglomerante:agregado (T) e a as relações entre cimento:cal (A), conforme a quinta coluna da Tabela 34. Entre os grupos, foram analisadas as variáveis de controle tipo de cal, composição granulométrica e relação água aglomerante. Os resultados da ANOVA são apresentados integralmente no Apêndice B, e sintetizados na Tabela 35.

Tabela 35 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração

TABELA ANOVA – TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE $20s^{-1}$ (ACELERAÇÃO)									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	NS	S	S	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	S							
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS	S	NS	NS	S	S	NS	NS	S
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	NS	NS	S	NS	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

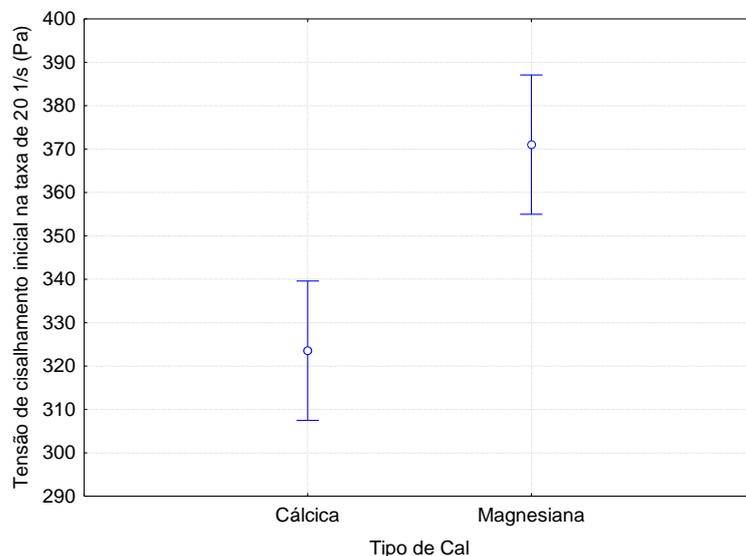
Verifica-se que, tanto o tipo de cal quanto a composição granulométrica, separadamente, exercem influência significativa sobre a tensão de cisalhamento inicial de todas as argamassas. Além disso, como era esperado, a relação água/aglomerante também influencia na variável de resposta. Essas conclusões são exemplificadas para o caso da argamassa T2,5 e A1,0 nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente, e se repetem para as demais argamassas. As figuras apresentam médias e desvios de acordo com o método LS Means, que mais evidenciam a diferença no comportamento das variáveis de resposta em função das variáveis controláveis.

Verifica-se uma tendência de que argamassas com a cal magnesiana possuem tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração mais elevada que argamassas com cal cálcica (Figura 41). Esta diferença de comportamento entre os dois materiais também foi observada por Arizzi *et al.* (2012) que, em estudo em pasta com cales cálcicas e dolomíticas, concluíram que esta última possui maiores valores de viscosidade, comportamento plástico (enquanto a cálcica possui comportamento pseudo-plástico) e anti-tixotrópico (ao contrário do tixotrópico apresentado pela cálcica). Entretanto, Rago e Cincotto (1999) observaram que, para uma mesma relação água/aglomerante, pastas de cales cálcicas apresentaram maior viscosidade que pastas de cales dolomíticas.

O resultado obtido pode ser explicado pela caracterização da cal magnesiana, a qual possui maior área superficial, verificada no ensaio de BET (Tabela 32) e visualmente nas imagens do MEV (Figura 27 e Figura 28). Quanto maior a área superficial das partículas finas, nas quais as forças superficiais são importantes, maior quantidade de líquido é necessário para recobrir esta área, resultando em menor fluidez pela menor separação entre partículas (CARDOSO, 2009). Sébaïbi *et al.* (2004), ao estudarem pastas de hidróxidos de cálcio e magnésio, apresentaram a existência de uma relação entre a quantidade de água e a área superficial destes materiais para se atingir uma mesma viscosidade aparente da pasta.

Recena (2012, p. 119) coloca que “O consumo de água para uma dada trabalhabilidade sempre estará condicionado à superfície específica da mistura.”.

Figura 41 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração (Pa) relacionada com o tipo de cal das argamassas T2,5 A1,0, LS Means

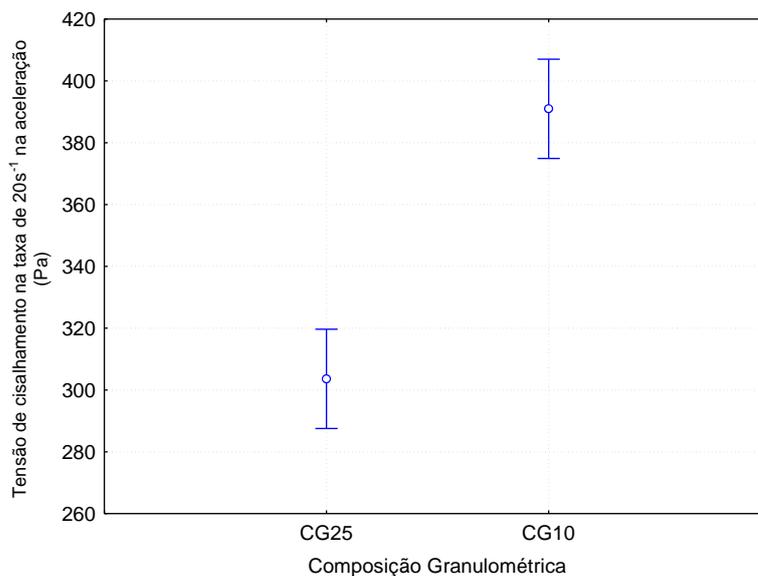


(fonte: a autora)

A maior tensão de cisalhamento pode ter influência devido ao maior índice de plasticidade da cal magnesiana. Cincotto (1985, p.30) comenta que “Geralmente cales magnesianas com partículas pequenas e alongadas são as mais plásticas.”. Thomson (1999) também obteve resultados em que a plasticidade de cales dolomíticas são maiores do que as cálcicas. Este ensaio é relacionado com a facilidade de espalhamento da argamassa por Cincotto *et al.* (2007). Outro fator é de que as cales estão sendo utilizadas em conjunto com o cimento, outro aglomerante, o que pode influenciar na questão da granulometria das partículas finas. Esta granulometria e as forças de superfície das partículas implicam nas variações de parâmetros como aglomeração e quantidade de água (CARDOSO, 2009).

Argamassas com a composição granulométrica CG 10 apresentaram maiores tensões de cisalhamento do que aquelas com a CG 25 (Figura 42). A CG 25 possui uma granulometria mais bem graduada, com menor coeficiente de uniformidade, em que as partículas menores ocupam os vazios entre as maiores, resultando em um menor índice de vazios. No caso da CG10, a elevada quantidade de grãos concentrados em duas frações intermediárias, resultando em um maior coeficiente de uniformidade e maior índice de vazios.

Figura 42 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração (Pa) relacionada com a composição granulométrica das argamassas T2,5 A1,0, LS Means

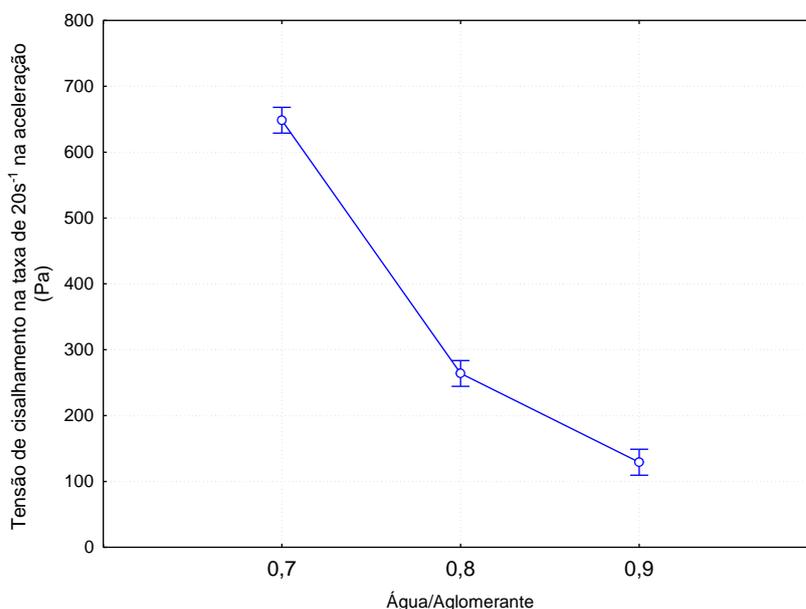


(fonte: a autora)

O resultado verificado acima é corroborado pelas afirmações de outros autores. Bonin *et al.* (1999) verificaram ainda que, para uma mesma relação água/aglomerante, as argamassas com a CG 25 apresentaram, na maioria dos casos, maior índice de espalhamento que argamassas com a CG 10. A explicação para tal é de que granulometrias contínuas proporcionam maior rolamento das partículas pela sua melhor distribuição e, considerando uma mesma quantidade de água, tendem a fluir melhor (RAGO; CINCOTTO, 1999). Da mesma forma, Carneiro e Cincotto (1999) comentam que agregados bem graduados proporcionam que as partículas mais finas rolem entre as mais grossas, ocasionando a redução na quantidade de água necessária para a mistura. Por sua vez, Boynton (1980) acrescenta que não contribuem para a plasticidade da argamassa areias mal graduadas ou grosseiras. Por fim, Cardoso (2009) explica que granulometrias com menor porosidade, devido ao melhor empacotamento, são preenchidas por menor quantidade de pasta, restando uma quantidade elevada para afastar os grãos; e quanto maior este afastamento, mais a argamassa flui.

A tensão de cisalhamento reduziu frente ao aumento da relação água/aglomerante (Figura 43). Recena (2012, p. 38) argumenta que “A modificação da trabalhabilidade estará sempre ligada diretamente à quantidade de água empregada em sua preparação [...]”. Carasek (2007) complementa que a fluidez ou consistência são ajustadas pela água, e que argamassas mais fluidas apresentam menor tensão de escoamento. Pinto (1996) acrescenta que a modificação da posição das partículas de agregado necessita de maior esforço quanto menor a relação entre água e agregado.

Figura 43 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração (Pa) relacionada com a água/aglomerante das argamassas T2,5 A1,0, LS Means



(fonte: a autora)

Além das análises anteriores, as médias foram comparadas pelo método de Duncan's. Os resultados são apresentados no Anexo C. Nas figuras deste anexo, observa-se que, para o traço 1:2,5, as cales apresentaram-se diferentes em apenas dois casos dos nove. No proporcionamento 1:3,0, cinco dos nove casos apresentaram diferença entre as argamassas com cales diferentes; e, no caso 1:3,5, sete dos nove casos.

Estas situações foram identificadas com maior frequência quando o teor de cal é maior e quando a tensão de cisalhamento medida foi maior. Além disso, nem todas as argamassas citadas acima apresentaram resultados diferentes entre as duas cales nas duas composições granulométricas; em alguns deles, a diferença foi evidenciada para apenas um dos tipos de cal, ou para apenas uma das duas granulometrias. Porém, evidenciou-se que, quando há diferença entre as variáveis controláveis, argamassas com a cal magnésiana ou argamassas com a CG 10 apresentaram valores sempre superiores.

De forma a também identificar a influência da relação aglomerante:agregado e cimento:cal, foram propostas duas outras análises. Para o primeiro caso, foram comparadas argamassas com mesmos teores de cal e mesmas relações água/aglomerante, variando-se apenas a relação aglomerante:agregado, tipo de cal e composição granulométrica. A ANOVA resultante (Tabela 36) apresentou, para todos os casos, que o proporcionamento influencia na variável de resposta tensão de cisalhamento na taxa de cisalhamento de 20s^{-1} . A Figura 44 exemplifica o comportamento que ocorre para todas as argamassas, de que quando é acrescentado agregado miúdo, a tensão de cisalhamento inicial aumenta

Tabela 36 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração comparando-se a relação aglomerante:agregado

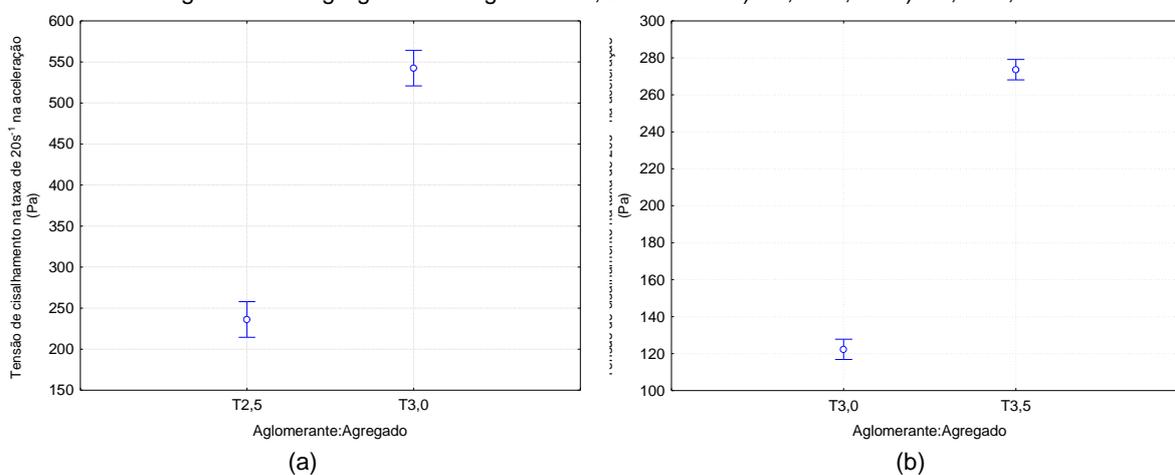
TABELA ANOVA – TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE $20s^{-1}$ (ACELERAÇÃO)									
	T2,5xT3,0 A0,5 H0,7	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A0,5 H0,8	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A0,5 H0,9	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,0 H0,9	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,0 H1,0	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,0 H1,1	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,5 H0,9	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,5 H1,0	T2,5xT3,0T3,0xT3,5 A1,5 H1,1
Aglomerante: Agregado	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal	NS	S	S	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Aglomerante: Agregado*Tipo de Cal	NS	NS	S	S	NS	NS	S	NS	S
Aglomerante: Agregado*Composição Granulométrica	NS	S	S	S	S	S	NS	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	S
Aglomerante: Agregado*Tipo de Cal* Composição Granulométrica	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Figura 44 – Tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração relacionada com o traço aglomerante:agregado das argamassas, LS Means: a) A0,5 H0,7 e b) A0,5 H0,9



(fonte: a autora)

Verifica-se que, com o incremento do volume de agregado, também há o aumento da tensão de cisalhamento. Girotto (2012) observou que a redução no teor de agregado miúdo na argamassa leva à redução da tensão de cisalhamento inicial em ensaio de reometria rotacional. Carneiro e Cincotto (1999) e Cincotto *et al.* (2012) dosaram argamassas mistas e, com o aumento do volume de areia, para se manter um índice de consistência pré-determinado, foi necessário o aumento da relação água/cimento. Selmo (1989) indica que as argamassas perdem a coesão com o menor teor de aglomerante, resultando em uma maior quantidade de água para se obter a consistência desejada.

Para observar a influência do teor de cal, foram comparadas argamassas com mesmo proporcionamento aglomerante:agregado e mesma relação água/aglomerante, variando-se apenas a relação cimento:cal, tipo de cal e composição granulométrica. Na Tabela 37, a ANOVA indica que o teor de cal influencia na variável de resposta estudada, no caso de todas as argamassas. Novamente, o comportamento é exemplificado na Figura 45, sendo que ocorre o aumento da tensão de cisalhamento inicial com o aumento do teor de cal.

Tabela 37 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na aceleração comparando-se a relação aglomerante:agregado

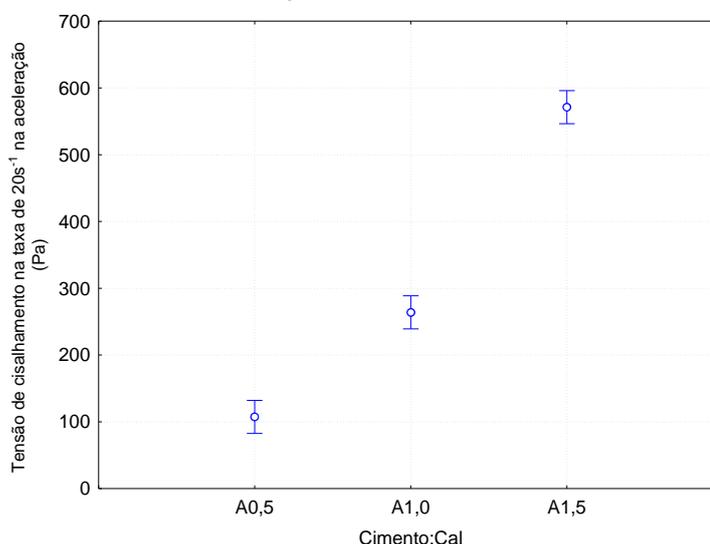
TABELA ANOVA – TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)			
	T2,5 H0,8	T3,0 H0,9	T3,5 H1,1
Cimento:Cal	S	S	S
Tipo de Cal	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	S
Cimento:Cal*Tipo de Cal	S	S	S
Cimento:Cal*Composição Granulométrica	NS	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	NS
Cimento:Cal*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	NS

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Figura 45 – Tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na aceleração (Pa) relacionada com o teor de cimento:cal das argamassas T2,5 H0,9, LS Means



(fonte: a autora)

Observa-se que o incremento de cal nestas argamassas acarreta no aumento da tensão de cisalhamento. A substituição de cimento por cal hidratada em pastas resultou em um aumento do volume de água necessário para manter a consistência, uma vez que a área superficial da cal é maior que a do cimento (SÉBAÏBI *et al.*, 2004).

6.2.2.2 Tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹

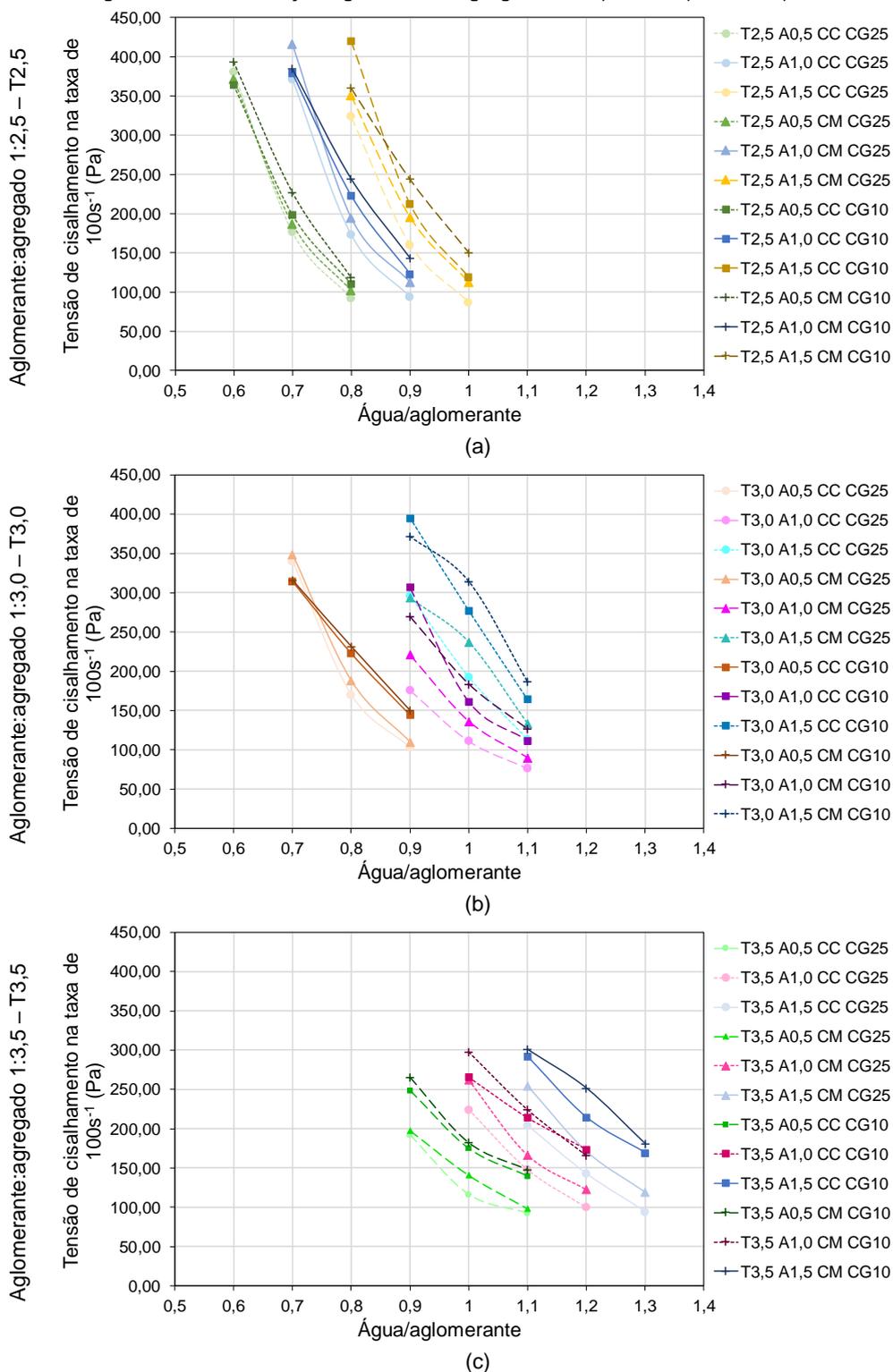
Os resultados da tensão de cisalhamento com aplicação da taxa de 100s⁻¹ são apresentados na Tabela 38 e na Figura 46, nas quais verifica-se existir a mesma tendência de comportamento observada na Figura 39. Observa-se principalmente a maior tensão de cisalhamento em argamassas com a CG 10 e, na maioria dos casos, uma maior tensão de cisalhamento das argamassas com cal magnésiana. Porém, deve-se considerar que o material, quando sujeito a esta taxa, passou pela quebra de sua estrutura, e que este resultado deve ser considerado com ressalvas.

Tabela 38 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹

				Tensão de cisalhamento na taxa de 100s ⁻¹ (Pa)										
Variáveis de controle		Grupo		Água/Aglomerante										
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3			
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	380,30	176,53	92,14							
			1:1	T2,5 A1,0		371,28	172,71	93,32						
			1:1,5	T2,5 A1,5			323,68	160,29	86,91					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		340,28	170,06	102,94						
			1:1	T3,0 A1,0				176,04	111,15	76,39				
			1:1,5	T3,0 A1,5				296,61	192,58	113,29				
		1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				192,03	116,17	92,38				
			1:1	T3,5 A1,0					224,36	148,24	100,16			
			1:1,5	T3,5 A1,5						204,30	142,91	94,39		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	371,22	186,73	101,79							
			1:1	T2,5 A1,0		415,55	194,00	112,09						
			1:1,5	T2,5 A1,5			350,87	195,66	112,31					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		349,23	188,00	109,95						
			1:1	T3,0 A1,0				221,31	136,39	89,85				
			1:1,5	T3,0 A1,5				293,48	237,48	133,47				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				197,80	140,93	98,38					
		1:1	T3,5 A1,0					262,30	166,60	122,59				
		1:1,5	T3,5 A1,5						254,83	171,32	118,96			
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	363,80	198,59	110,61							
			1:1	T2,5 A1,0		379,29	222,56	122,69						
			1:1,5	T2,5 A1,5			420,06	212,25	118,62					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		314,59	223,04	144,65						
			1:1	T3,0 A1,0				306,76	161,30	111,70				
			1:1,5	T3,0 A1,5				395,30	277,36	164,33				
		1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				248,74	174,92	139,68				
			1:1	T3,5 A1,0					265,60	214,06	173,75			
			1:1,5	T3,5 A1,5						292,16	214,54	169,13		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	393,17	227,00	118,38							
			1:1	T2,5 A1,0		384,93	244,32	143,27						
			1:1,5	T2,5 A1,5			360,07	243,72	149,90					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		315,94	231,68	150,41						
			1:1	T3,0 A1,0				269,67	183,70	126,51				
			1:1,5	T3,0 A1,5				371,75	314,67	187,28				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				265,12	182,34	147,93					
		1:1	T3,5 A1,0					297,64	224,30	166,07				
		1:1,5	T3,5 A1,5						301,11	251,75	180,74			

(fonte: a autora)

Figura 46 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de 100s^{-1} em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

O resultado sintetizado da ANOVA para esta variável em estudo pode ser verificado na Tabela 39. Nele observa-se que a composição granulométrica e a relação água/aglomerante exercem influência significativa sobre a variável tensão de cisalhamento na taxa de 100s^{-1} para todas

as argamassas, e que o tipo de cal exerce para quase todas, exceto para o T3,0 A0,5. Não foi possível observar um comportamento geral quanto à interação entre variáveis. O comportamento observado para as argamassas foi, em geral, similar àquele apresentado nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43. Em alguns casos, quando a relação água/aglomerante foi menor, ocorreu inversão do comportamento da cal, apresentando as misturas com cal cálcica uma maior tensão de cisalhamento.

Tabela 39 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de cisalhamento de 100s⁻¹

TABELA ANOVA – TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	S	S	S	NS	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	S	NS	S	NS	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS	NS	S	NS	NS	S	NS	NS	NS
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	S	NS	S	S	NS	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	NS	S	NS	S	NS	NS	NS	NS

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

6.2.2.3 Tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na desaceleração

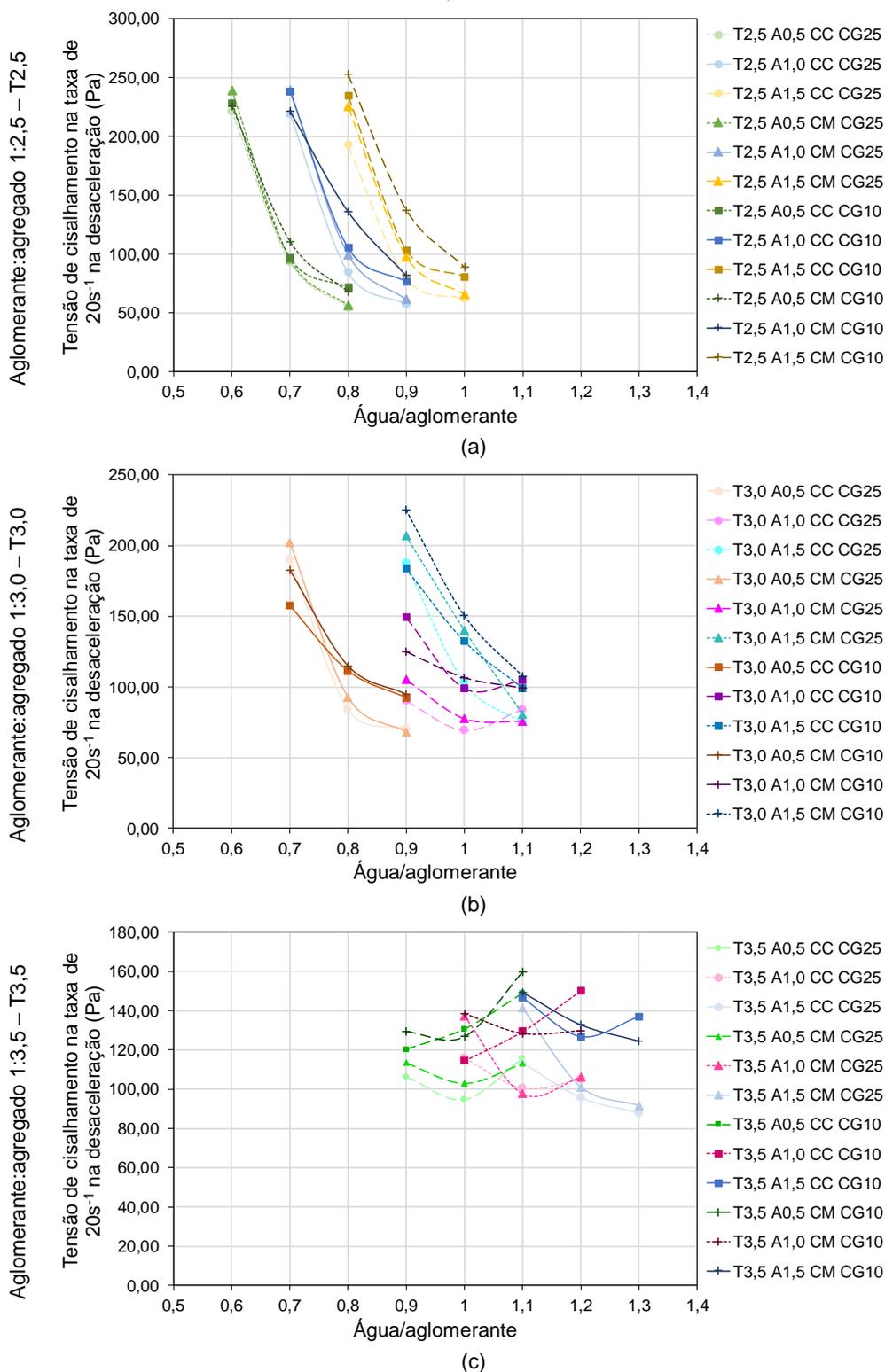
Por fim, a tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na desaceleração resultou nos valores médios apresentados na Tabela 40 e na Figura 47. Neste caso, as argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:2,5 mantiveram comportamento semelhante ao encontrado nas taxas analisadas anteriormente. Porém, nos demais traços, ocorreram variações do comportamento anterior, principalmente no caso do traço 1:3,5 que, inclusive variando a relação água/aglomerante, mantiveram-se em um intervalo pequeno de tensão, entre 85 e 160 Pa. A explicação pode residir no fato comentado anteriormente, de que tenha ocorrido a expulsão dos agregados para as laterais da área de giro, e uma concentração maior de água nesta região (CARDOSO *et al.*, 2014).

Tabela 40 – Valores médios de tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na desaceleração (Pa)

Variáveis de controle		Grupo		Tensão de cisalhamento na taxa de 20s ⁻¹ na desaceleração (Pa)								
				Água/Aglomerante								
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	220,92	93,30	54,34					
			1:1	T2,5 A1,0		218,96	84,20	57,33				
			1:1,5	T2,5 A1,5			192,50	79,21	61,72			
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		190,36	83,97	70,34				
			1:1	T3,0 A1,0				90,10	69,40	84,14		
			1:1,5	T3,0 A1,5				187,68	103,27	74,78		
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				106,32	94,60	115,70			
		1:1	T3,5 A1,0					115,89	100,63	105,00		
		1:1,5	T3,5 A1,5						113,27	95,57	87,75	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	238,88	95,89	56,43					
			1:1	T2,5 A1,0		239,63	99,45	61,17				
			1:1,5	T2,5 A1,5			225,26	97,48	65,27			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		202,24	92,72	68,19					
		1:1	T3,0 A1,0				105,28	77,65	75,76			
		1:1,5	T3,0 A1,5				207,09	140,34	80,69			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				113,44	102,89	113,08			
		1:1	T3,5 A1,0					137,22	97,74	106,20		
		1:1,5	T3,5 A1,5						141,34	101,12	91,55	
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	228,28	96,45	71,67					
			1:1	T2,5 A1,0		237,97	105,14	76,34				
			1:1,5	T2,5 A1,5			234,47	103,13	80,59			
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		157,45	111,37	92,36				
			1:1	T3,0 A1,0				149,28	99,01	104,83		
			1:1,5	T3,0 A1,5				183,76	132,23	99,07		
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				120,18	130,54	148,83			
		1:1	T3,5 A1,0					114,54	129,44	150,05		
		1:1,5	T3,5 A1,5						146,61	126,95	137,05	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	225,35	110,53	67,58					
			1:1	T2,5 A1,0		221,05	135,86	81,71				
			1:1,5	T2,5 A1,5			252,67	137,26	88,52			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		182,84	114,92	94,81					
		1:1	T3,0 A1,0				125,02	106,64	99,34			
		1:1,5	T3,0 A1,5				225,22	150,50	107,58			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				129,48	126,91	159,82			
		1:1	T3,5 A1,0					138,49	128,39	129,76		
		1:1,5	T3,5 A1,5						149,35	132,75	124,39	

(fonte: a autora)

Figura 47 – Variação da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na desaceleração em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Diferentemente dos casos anteriores, na ANOVA resultante da variável de resposta tensão de cisalhamento final na taxa de $20s^{-1}$ (Tabela 41), a maioria das variáveis estudadas não

influenciaram significativamente na variável de resposta. Para T2,5 e T3,0, a relação água/aglomerante teve efeito significativo sobre a variável resposta, conforme observado na Figura 47. Verifica-se que, em geral, os proporcionamento com maior volume de cal obtiveram influência significativa das variáveis tipo de cal e composição granulométrica.

Tabela 41 – Resultados sintetizados da ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na desaceleração

TABELA ANOVA – TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	NS	NS	S	NS	NS	S	NS	NS	NS
Composição Granulométrica	NS	NS	S	NS	S	S	NS	NS	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS								
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS								
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS								

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

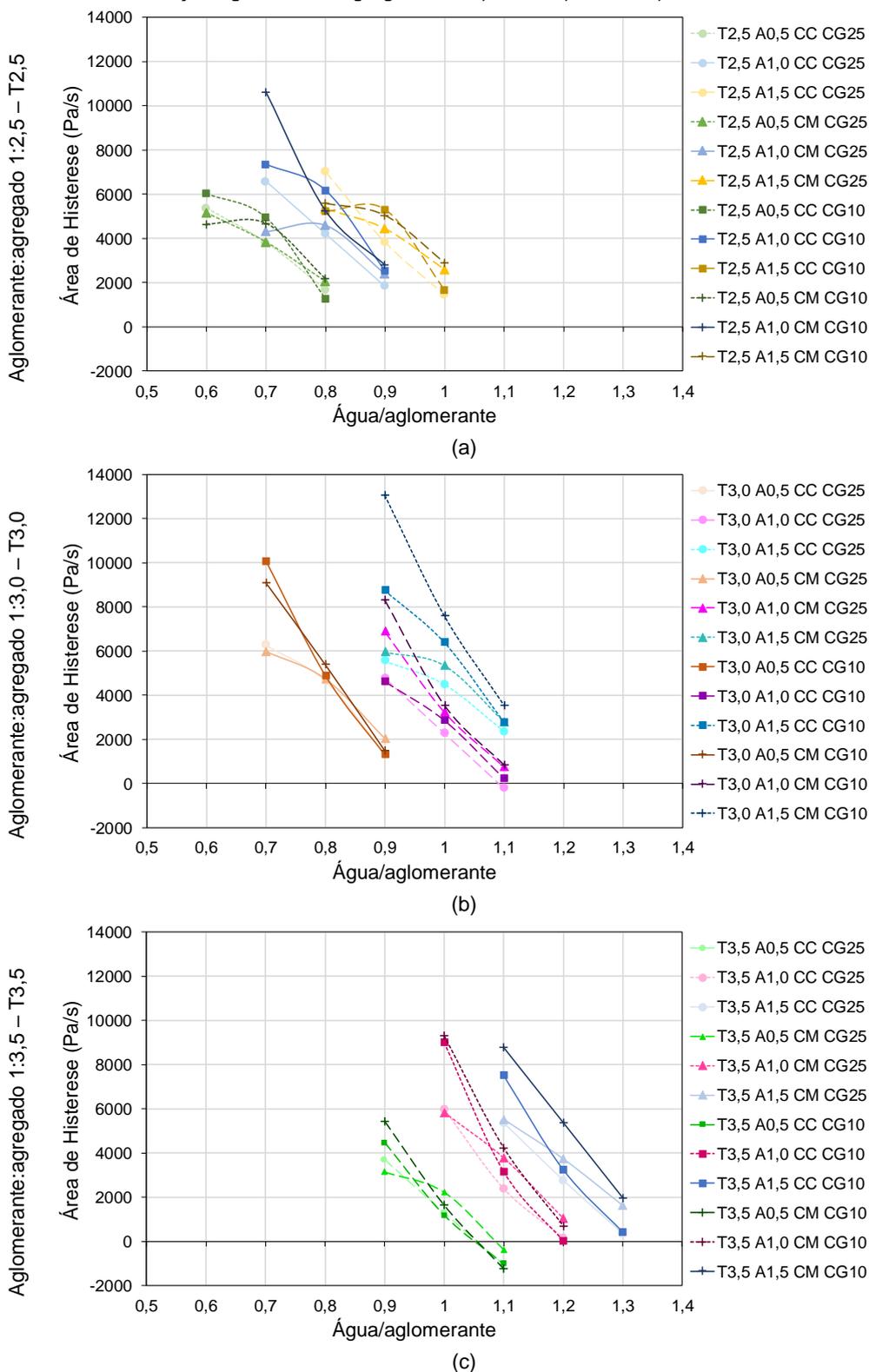
Em comparação com as análises da tensão em função das taxas de cisalhamento analisadas anteriormente, a tensão resultante na curva de volta na taxa de 20s⁻¹ não obteve os mesmos resultados na ANOVA. Desta forma, a análise anterior, realizada com a menor taxa de cisalhamento de 20s⁻¹, no período inicial do ensaio, ou seja, na aceleração, melhor caracterizaria o material.

6.2.2.4 Área de histerese

A área de histerese foi calculada a partir da taxa de 20s⁻¹, uma vez que o comportamento anterior não era conhecido. Na Figura 48 são apresentados os valores da área de histerese, divididas entre os traços das argamassas. Verifica-se a tendência de comportamento decrescente da área de histerese em função do aumento da relação água/aglomerante na maioria dos casos.

A menor área de histerese indicaria uma menor ruptura da estrutura da argamassa (CARDOSO *et al.*, 2014). Por este motivo, de elevadas áreas de histerese e, possivelmente, elevadas quebras estruturais da argamassa, não foram calculados os parâmetros das curvas de volta com o modelo de Bingham, como realizado pelo autor citado.

Figura 48 – Variação da área de histerese em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



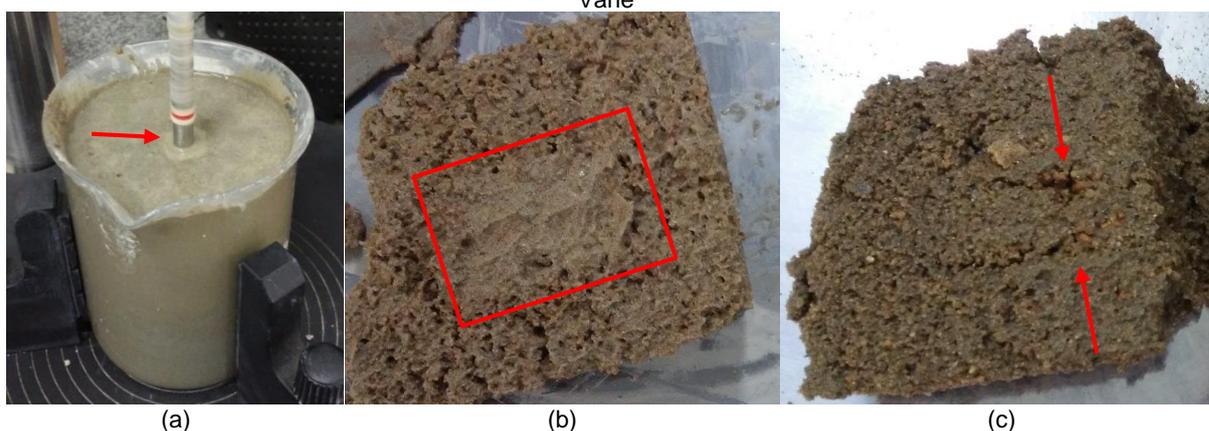
(fonte: a autora)

6.2.2.5 Situações observadas no ensaio

Ainda na etapa de testes da reometria rotacional, puderam ser evidenciadas duas situações acerca do ensaio. A primeira consiste na exsudação gerada no entorno da haste do *spindle* (Figura 49a) cujo fluxo e área de abrangência aumenta conforme o aumento da taxa de cisalhamento, e que pode ser explicada pelo fato de ali as velocidades serem máximas. A segunda questão é relacionada com o aspecto da região de giro do *spindle* vane após o ensaio, no qual é observada uma diferenciação com relação ao restante da argamassa (Figura 49b) e, em alguns casos, foi possível observar acúmulo de agregados graúdos ao redor desta região (Figura 49c).

Estes podem ser alguns dos motivos pelos quais a caracterização na rotina de ida em altas taxas e da rotina de volta possuem variáveis que não contribuem para a análise da tensão de cisalhamento. Portanto, os resultados dos ensaios na rotina de ida e em menores taxas de cisalhamento, representariam melhor a argamassa, assim como colocado anteriormente.

Figura 49 – Situações observadas no ensaio: a) exsudação no entorno da haste; b) diferenciação da área na região do giro e c) acúmulo de agregados graúdos no entorno da área de giro do *spindle* Vane



(fonte: a autora)

6.2.3 Índice de consistência e tensão de cisalhamento

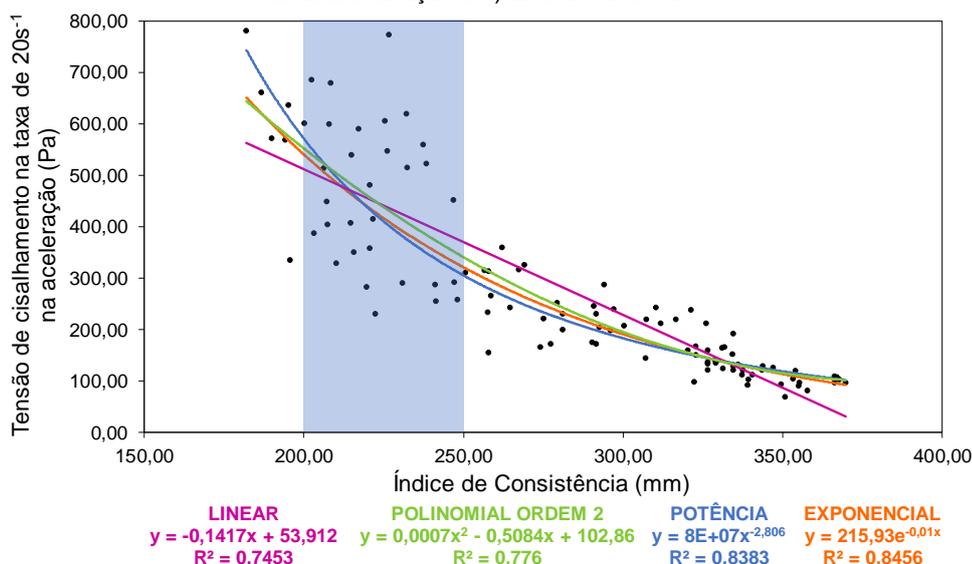
Relacionando-se o índice de consistência com a tensão de cisalhamento (Figura 50 a, b e c), verifica-se que ambos são inversamente proporcionais, sendo que a medida que o índice de consistência aumenta, a tensão de cisalhamento diminui. Verificou-se que uma equação de regressão do tipo exponencial foi a que melhor adaptou os dados nestes três casos. No primeiro deles, relacionando-se o índice de consistência com a tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração, o R^2 da equação ($y = 215,93e^{-0,01x}$) atingiu 0,8456 e, para a tensão de cisalhamento de 100s^{-1} , a equação ($y = 15,568e^{-0,007x}$) atingiu um R^2 de 0,8656. No caso da tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na desaceleração, a equação ($y = 27,003e^{-0,005x}$) atingiu um R^2 de apenas 0,6424.

É importante observar que ocorreu uma elevada dispersão da tensão de cisalhamento para as argamassas com índices de consistência entre 200mm e 250mm. Esta variação pode explicar o ocorrido no trabalho de Stolz (2015). Argamassas de mesmo índice de consistência, principalmente se estiverem na faixa indicada acima, podem apresentar tensões de cisalhamento bastante variáveis. O motivo reside no fato de que o índice de consistência é considerado um indicativo do parâmetro de trabalhabilidade da argamassa, dependendo tanto da viscosidade quanto da tensão de escoamento do material. Desta forma, recomenda-se que esta correlação seja utilizada com restrições.

Para argamassas com elevado índice de consistência, a correlação entre os fatores avaliados apresenta-se menos variável. Esta observação pode indicar que a análise reológica de argamassas com o equipamento utilizado e tipo de ensaio realizado depende de uma fluidez mínima que, por vezes, pode ser superior à faixa de trabalhabilidade considerada “adequada” para uma argamassa convencional. Mas é importante salientar que, no caso deste trabalho, pode ter ocorrido a expulsão dos agregados da área de giro, sugerindo também que as condições de ensaio aplicadas ainda não são as ideais para o caso de argamassas com agregados miúdos de dimensão máxima 2,4mm.

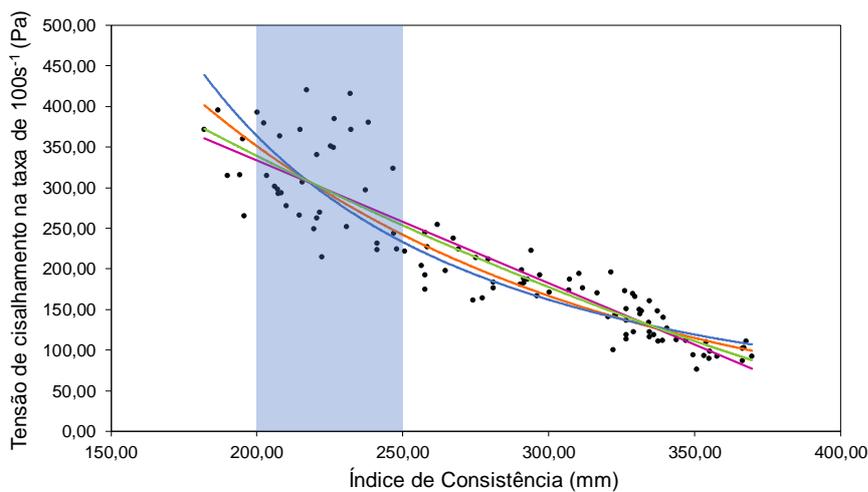
Na Figura 50d, verifica-se, da mesma forma que anteriormente, que o índice de consistência é inversamente proporcional à área de histerese, formada entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento a partir de $20s^{-1}$. Neste caso, a equação polinomial de ordem 2 ($y = 0,0007x^2 - 0,5084x + 102,86$) atingiu um R^2 de 0,776. Observa-se que a “quebra da estrutura das argamassas” é maior quanto menor sua consistência.

Figura 50 – Índice de consistência em relação à: a) tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração; b) tensão de cisalhamento na taxa de $100s^{-1}$; c) tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na desaceleração e d) área de histerese

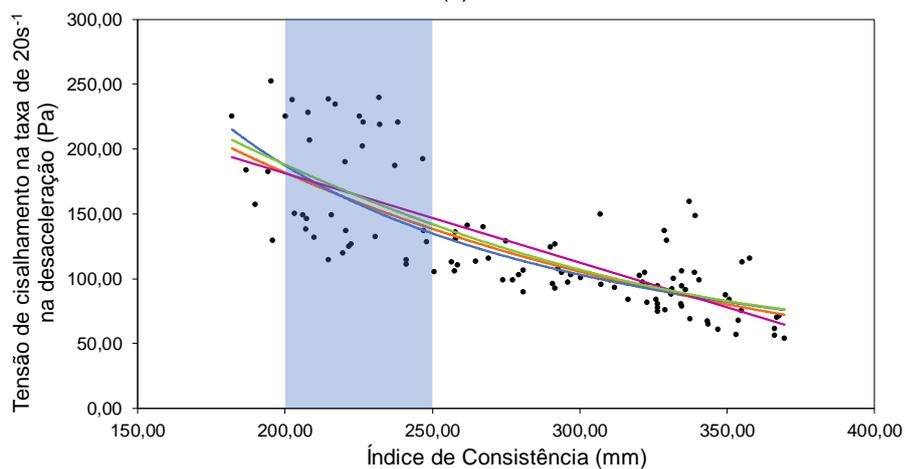


continua

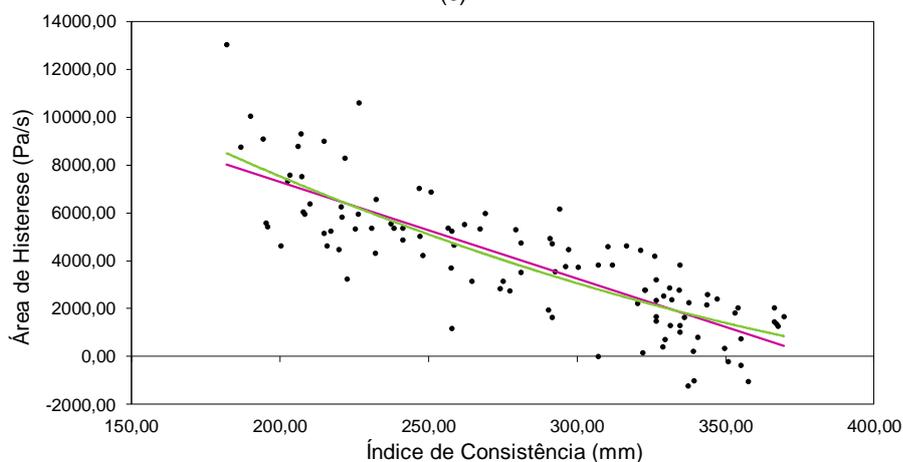
continuação



(b)



(c)



(d)

(fonte: a autora)

6.2.4 Densidade de massa no estado fresco

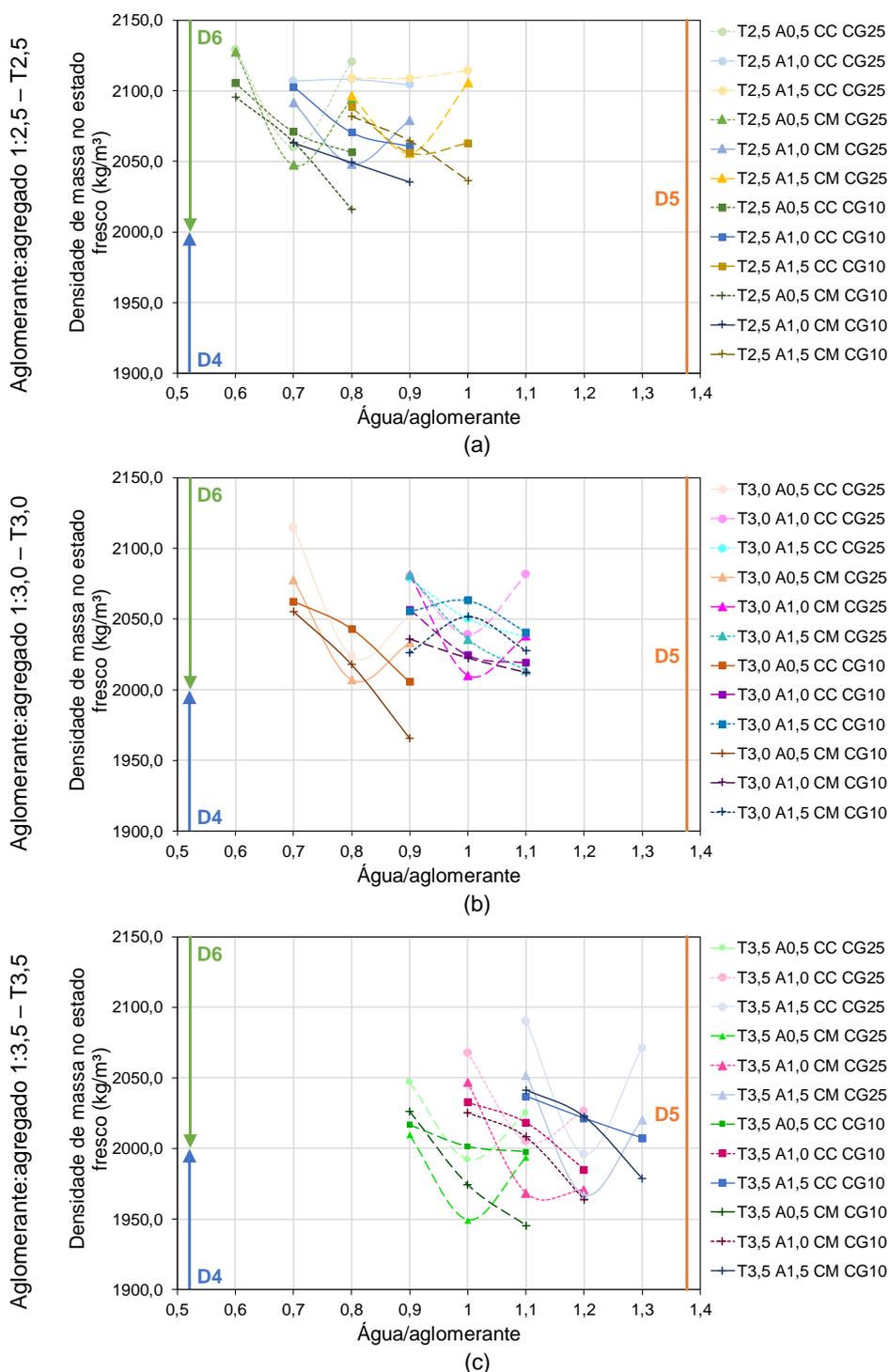
A densidade de massa no estado fresco é importante pois auxilia na produtividade do operário em obra (CARASEK, 2007). Os valores são apresentados na Tabela 42 e na Figura 51, e variam entre 1940 kg/m³ e 2130 kg/m³. De acordo com os resultados, todas as argamassas podem ser classificadas como D5, ou em D4 ou D6, dependendo do caso, conforme NBR 13281 (ABNT, 2005e). Os limites da classificação são indicados nas figuras a seguir.

Tabela 42 – Valores de densidade de massa no estado fresco (kg/m³)

Variáveis de controle		Grupo		Água/Aglomerante								
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	2129,0	2060,0	2120,5					
			1:1	T2,5 A1,0		2107,1	2108,2	2104,3				
			1:1,5	T2,5 A1,5			2109,0	2108,8	2114,2			
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		2114,7	2023,7	2052,4					
		1:1	T3,0 A1,0				2080,4	2038,9	2081,5			
		1:1,5	T3,0 A1,5				2078,8	2050,2	2037,4			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				2047,0	1992,0	2025,2			
		1:1	T3,5 A1,0					2068,0	2005,4	2026,8		
		1:1,5	T3,5 A1,5						2090,0	1996,0	2071,4	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	2127,3	2047,5	2093,8					
			1:1	T2,5 A1,0		2091,7	2048,2	2079,1				
			1:1,5	T2,5 A1,5			2096,3	2055,6	2105,6			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		2077,8	2007,1	2033,3					
		1:1	T3,0 A1,0				2081,4	2010,2	2037,9			
		1:1,5	T3,0 A1,5				2081,0	2035,9	2013,7			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				2009,5	1949,3	1993,8			
		1:1	T3,5 A1,0					2046,9	1968,6	1970,8		
		1:1,5	T3,5 A1,5						2051,9	1967,0	2020,3	
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	2105,3	2070,9	2056,3					
			1:1	T2,5 A1,0		2102,6	2070,6	2060,8				
			1:1,5	T2,5 A1,5			2088,4	2055,9	2062,9			
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		2062,6	2043,1	2005,5					
		1:1	T3,0 A1,0				2056,5	2024,4	2019,1			
		1:1,5	T3,0 A1,5				2055,4	2063,2	2040,6			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				2016,9	2001,3	1997,6			
		1:1	T3,5 A1,0					2032,9	2018,5	1985,2		
		1:1,5	T3,5 A1,5						2037,0	2021,4	2007,4	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	2095,6	2063,6	2016,0					
			1:1	T2,5 A1,0		2063,2	2049,4	2035,6				
			1:1,5	T2,5 A1,5			2081,8	2064,4	2036,2			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		2055,5	2017,8	1965,5					
		1:1	T3,0 A1,0				2036,0	2022,5	2012,1			
		1:1,5	T3,0 A1,5				2026,1	2051,8	2027,5			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				2026,5	1974,4	1945,4			
		1:1	T3,5 A1,0					2025,6	2008,2	1963,8		
		1:1,5	T3,5 A1,5						2041,2	2022,4	1978,8	

(fonte: a autora)

Figura 51 – Densidade de massa no estado fresco em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Há uma tendência de aumento da densidade de massa da argamassa com o aumento do teor de cal e para a cal cálcica; e uma redução neste valor com o aumento do volume de agregado miúdo e da relação água/aglomerante. Quanto às duas composições da areia, não foi possível identificar a diferença entre elas. Tais resultados serão melhor discutidos no ensaio de densidade de massa no estado endurecido, que obteve efeitos semelhantes.

6.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Assim como os ensaios no estado fresco, os resultados dos ensaios no estado endurecido foram submetidos a análise de variância (ANOVA), considerando um limite de confiança de 95% (significância de 5%), através do software Statistica 8.0.

6.3.1 Tração na flexão e resistência à compressão

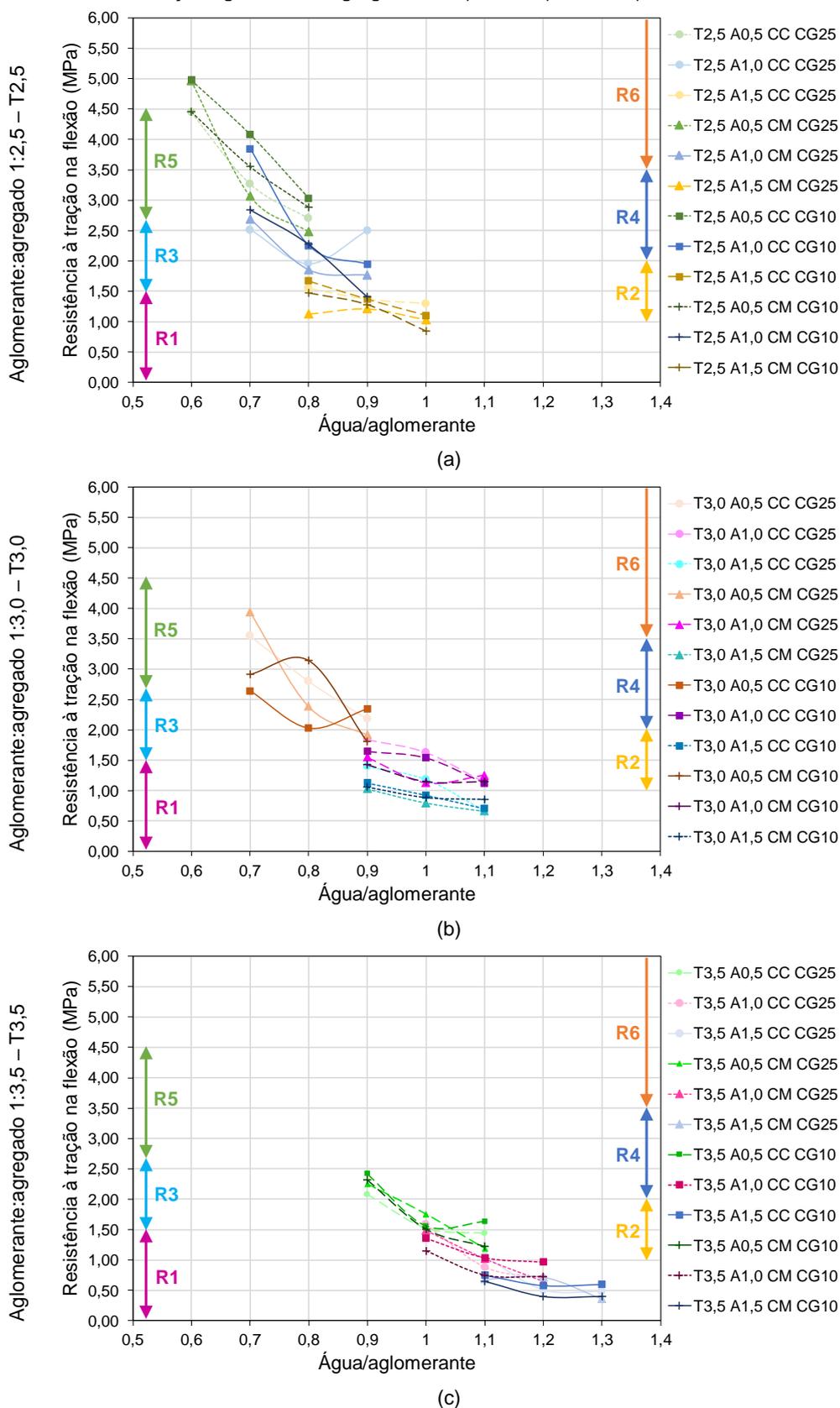
O ensaio de tração na flexão resultou em dados cuja média é apresentados na Tabela 43 e na Figura 52. Os valores variaram de 0,3 a 5,0MPa, e as argamassas podem ser classificadas de R1 a R6, dependendo do caso (NBR 13281; ABNT, 2005e).

Tabela 43 – Valores médios de resistência à tração na flexão (MPa)

Variáveis de controle		Grupo	Água/Aglomerante									
			0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,45	3,27	2,70					
			1:1	T2,5 A1,0		2,51	1,95	2,49				
			1:1,5	T2,5 A1,5			1,55	1,36	1,29			
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		3,55	2,80	2,18					
		1:1	T3,0 A1,0				1,84	1,63	1,13			
		1:1,5	T3,0 A1,5				1,40	1,19	0,67			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				2,08	1,52	1,44			
		1:1	T3,5 A1,0					1,59	0,88	0,70		
		1:1,5	T3,5 A1,5						1,06	0,50	0,48	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,97	3,07	2,48					
			1:1	T2,5 A1,0		2,68	1,85	1,76				
			1:1,5	T2,5 A1,5			1,12	1,21	1,03			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		3,94	2,39	1,92					
		1:1	T3,0 A1,0				1,55	1,12	1,25			
		1:1,5	T3,0 A1,5				1,03	0,80	0,66			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				2,25	1,75	1,19			
		1:1	T3,5 A1,0					1,49	1,02	0,65		
		1:1,5	T3,5 A1,5						0,68	0,72	0,36	
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,98	4,08	3,03					
			1:1	T2,5 A1,0		3,84	2,25	1,94				
			1:1,5	T2,5 A1,5			1,67	1,37	1,10			
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		2,64	2,03	2,35					
		1:1	T3,0 A1,0				1,65	1,54	1,12			
		1:1,5	T3,0 A1,5				1,12	0,92	0,70			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				2,42	1,56	1,63			
		1:1	T3,5 A1,0					1,35	1,04	0,96		
		1:1,5	T3,5 A1,5						0,75	0,58	0,60	
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,46	3,56	2,88					
			1:1	T2,5 A1,0		2,84	2,27	1,41				
			1:1,5	T2,5 A1,5			1,47	1,28	0,85			
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		2,91	3,14	1,81					
		1:1	T3,0 A1,0				1,43	1,14	1,14			
		1:1,5	T3,0 A1,5				1,06	0,88	0,85			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				2,31	1,51	1,23			
		1:1	T3,5 A1,0					1,15	0,75	0,72		
		1:1,5	T3,5 A1,5						0,65	0,39	0,40	

(fonte: a autora)

Figura 52 – Resistência à tração na flexão em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Na Tabela 44 e na Figura 53 são apresentados os valores médios de resistência à compressão, os quais varia de 1,5 a 14MPa, podendo obter a classificação de P1 a P6 (NBR 13281; ABNT, 2005e).

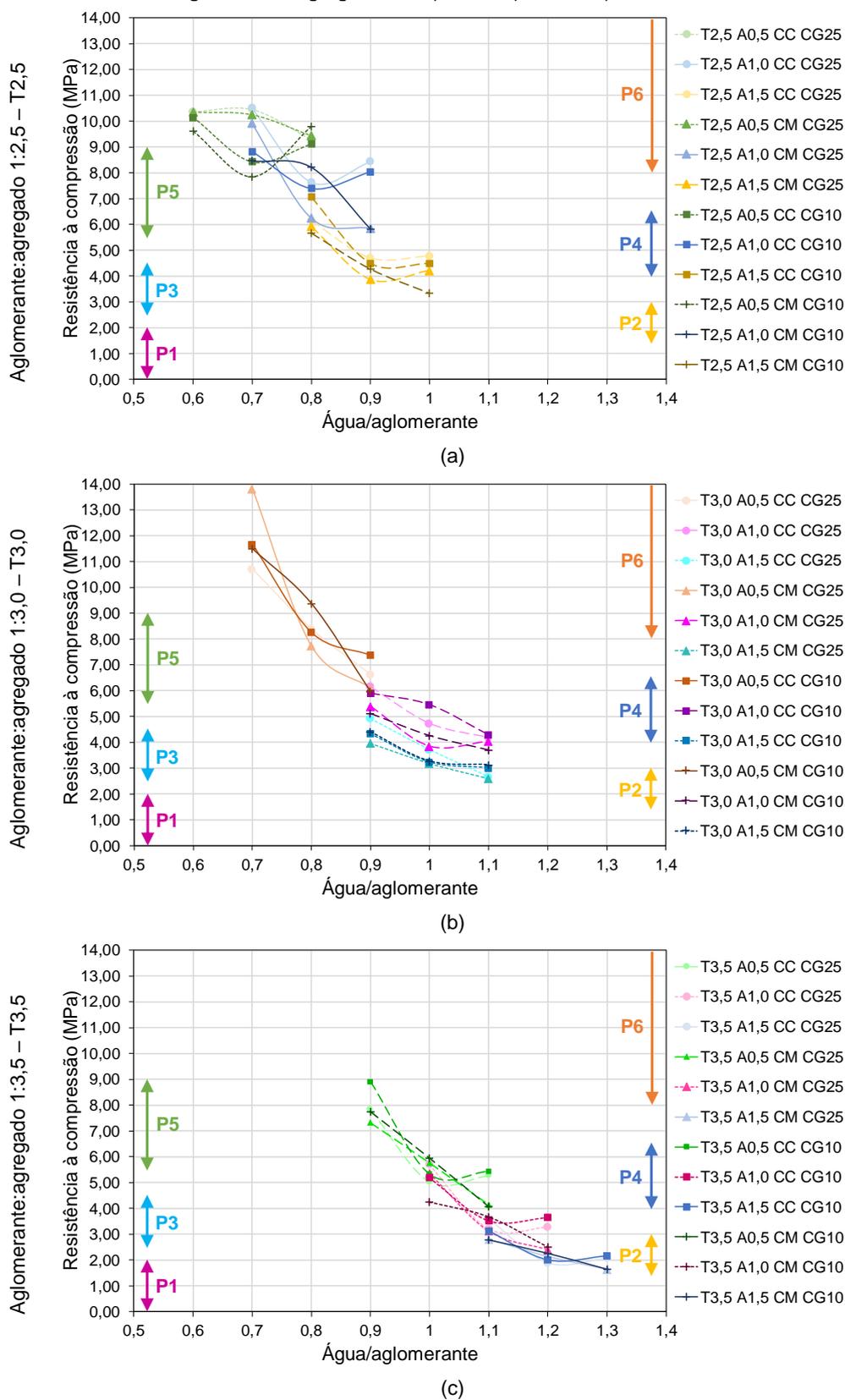
A resistência à tração na flexão e à compressão possuem comportamentos muito semelhantes e reduziram devido ao aumento do teor de cal e da relação água/aglomerante, principalmente.

Tabela 44 – Valores médios de resistência à compressão (MPa)

				Resistência à compressão (MPa)									
Variáveis de controle			Grupo	Água/Aglomerante									
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	10,37	10,45	9,29						
			1:1	T2,5 A1,0		10,51	7,63	8,43					
			1:1,5	T2,5 A1,5			6,14	4,70	4,77				
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		10,70	8,39	6,63						
		1:1	T3,0 A1,0				6,16	4,74	4,19				
		1:1,5	T3,0 A1,5				4,93	3,72	2,66				
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				7,83	5,03	5,27				
		1:1	T3,5 A1,0					5,70	3,21	3,28			
		1:1,5	T3,5 A1,5						3,58	1,89	2,07		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	10,34	10,24	9,44						
			1:1	T2,5 A1,0		9,91	6,24	5,85					
			1:1,5	T2,5 A1,5			5,91	3,86	4,21				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		13,82	7,73	6,10						
		1:1	T3,0 A1,0				5,40	3,85	4,05				
		1:1,5	T3,0 A1,5				3,96	3,19	2,59				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				7,31	5,75	4,14				
		1:1	T3,5 A1,0					5,36	3,11	2,39			
		1:1,5	T3,5 A1,5						2,79	2,13	1,64		
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	10,14	8,43	9,11						
			1:1	T2,5 A1,0		8,82	7,39	8,04					
			1:1,5	T2,5 A1,5			7,06	4,50	4,49				
	1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		11,68	8,27	7,39						
		1:1	T3,0 A1,0				5,90	5,45	4,29				
		1:1,5	T3,0 A1,5				4,35	3,24	3,02				
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				8,89	5,33	5,44				
		1:1	T3,5 A1,0					5,20	3,52	3,65			
		1:1,5	T3,5 A1,5						3,12	2,01	2,16		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	9,61	7,85	9,80						
			1:1	T2,5 A1,0		8,47	8,22	5,80					
			1:1,5	T2,5 A1,5			5,67	4,27	3,33				
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		11,50	9,38	5,98						
		1:1	T3,0 A1,0				5,12	4,26	3,70				
		1:1,5	T3,0 A1,5				4,41	3,27	3,13				
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				7,74	5,95	4,07				
		1:1	T3,5 A1,0					4,25	3,68	2,51			
		1:1,5	T3,5 A1,5						2,77	2,26	1,65		

(fonte: a autora)

Figura 53 – Resistência à compressão em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Conforme Tabela 45 e Tabela 46, identifica-se que a relação água/aglomerante influenciou significativamente nas resistências à tração na flexão e à compressão, para todas as argamassas. A composição granulométrica exerceu influência na variável de resposta pontualmente, mas não se pode observar um padrão de comportamento, principalmente ao se analisar os gráficos anteriores. O tipo de cal influenciou nas propriedades mecânicas analisadas, com exceção de alguns casos, todos relativos a argamassas com baixos teores de cal (A0,5). Apesar de não ter sido feita a análise estatística, verifica-se nos gráficos que o aumento do teor de cal ocasionou a redução das resistências mecânicas.

Tabela 45 – Resultados sintetizados da ANOVA da resistência à tração na flexão das argamassas

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	S	S	S	NS	S	S	NS	S	S
Composição Granulométrica	S	S	NS	S	NS	NS	NS	S	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	S	NS	NS	S	NS	S	S	S	NS
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS	S	NS	S	S	S	S	NS	S
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	NS	S	NS	NS	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	NS	S	NS	NS	NS	NS	S

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Tabela 46 – Resultados sintetizados da ANOVA da resistência à compressão das argamassas

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	NS	S	S	NS	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	S	S	S	NS	S	NS	NS	S
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS	S	NS	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	S	S	S	NS	S	NS	S	S

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Tipo de cal: as argamassas com cales cálcica e magnésiana não apresentaram um comportamento padrão nas resistências à flexão e à compressão, de modo que pudessem ser diferenciadas. É importante salientar, contudo, que os ensaios de resistência foram realizados aos 28 dias, de forma que as cales podem ter contribuído muito pouco para este valor, uma vez que o processo de carbonatação dos hidróxidos ou de endurecimento é bastante lento (RECENA, 2012). Carasek (2007) comenta que uma maior resistência de aderência foi obtida em argamassas com o tipo de cal dolomítica (com maiores teores de hidróxido de magnésio), em vez de cales cálcicas.

Composição granulométrica do agregado miúdo:

A resistência à flexão e à compressão das argamassas com as duas composições granulométricas ficaram semelhantes. Este resultado pode ser explicado pelo fato da resistência dos agregados ser a maior da mistura, sendo a resistência mecânica resultado principalmente da influência do aglomerante (PINTO, 1996).

Relação água/aglomerante: Com o aumento da relação água/aglomerante das argamassas, ocorreu a redução da resistência mecânica. Segundo Baía e Sabbatini (2002) e Recena (2012), a relação água/cimento influencia de maneira inversa a resistência mecânica. Selmo (1989) comenta que esta influência é determinante nas resistências mecânicas.

Teor de cal: O aumento do teor de cal resultou na redução das resistências mecânicas. Têm-se conhecimento de que argamassas de cal possuem menores resistências mecânicas que argamassas de cimento (CINCOTTO, 1985; SABBATINI, 1985; RECENA, 2012). Recena (2012) coloca que o maior valor da resistência de argamassas de cimento e cal é vinculado diretamente com o aumento do teor de cimento. Selmo (1989) identificou influência do aumento do teor de cal nas argamassas mistas, nas quais ocorreu redução das resistências mecânicas, principalmente em menores relações água/aglomerante.

Volume de agregado: Pinto (1996) considera que a resistência das argamassas é regida principalmente pelos aglomerantes, uma vez que o agregado é o material mais resistente dentre todos os presentes. Porém, não foi possível identificar o comportamento das propriedades de resistência das argamassas analisadas frente ao seu volume de agregado ou volume de aglomerante.

6.3.2 Absorção de água por capilaridade

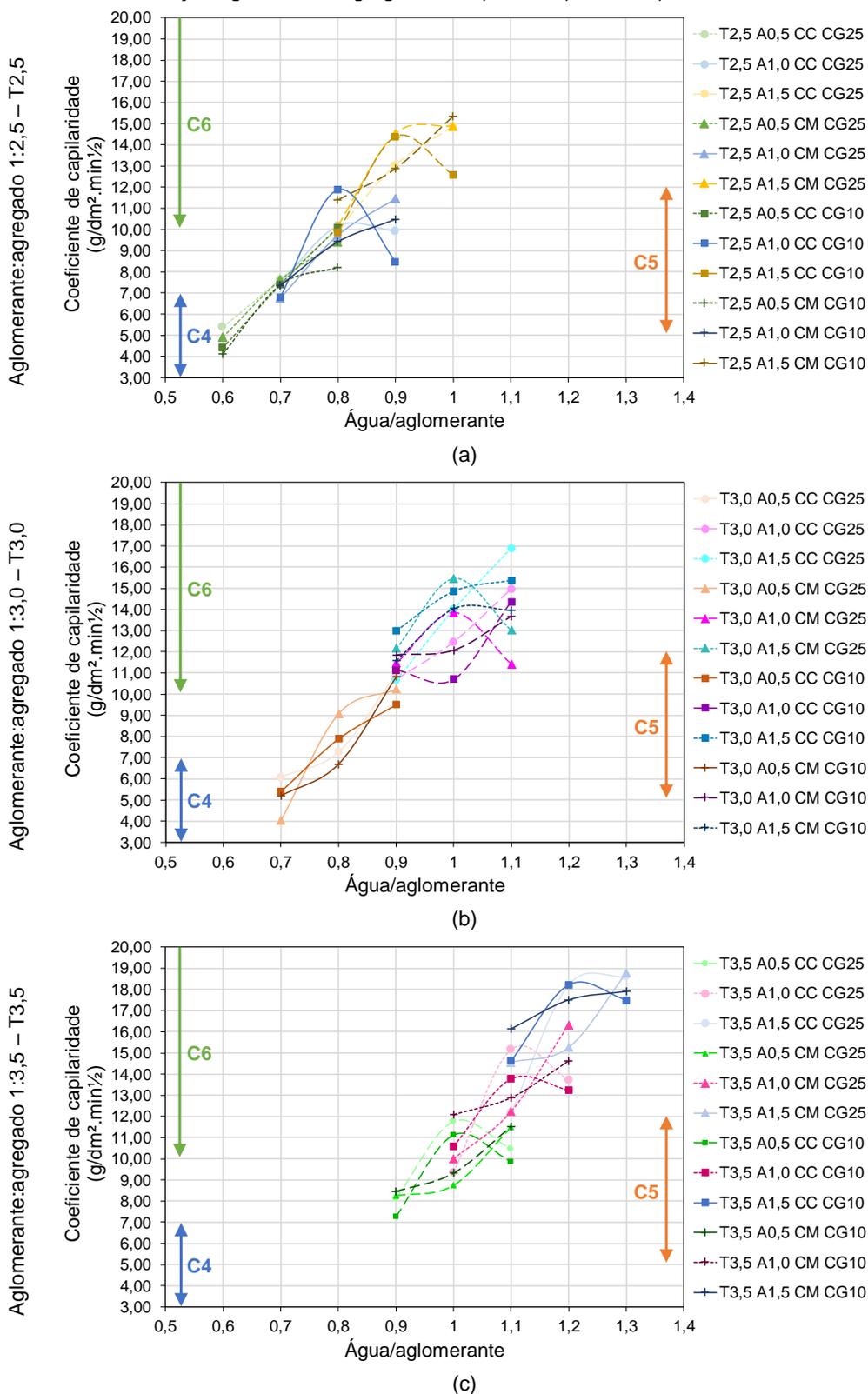
Na Tabela 47 e Figura 54 é apresentada a média do coeficiente de capilaridade das argamassas, a qual varia bastante, entre 4 e 19 g/dm².min^{1/2}. As argamassas podem ser enquadradas na classificação C4, C5 ou C6, dependendo do caso (NBR 13281; ABNT, 2005e).

Tabela 47 – Valores médios do coeficiente de capilaridade

				Coeficiente de Capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})										
Variáveis de controle			Grupo	Água/Aglomerante										
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3			
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	5,39	7,64	10,01							
			1:1	T2,5 A1,0		7,52	10,18	9,93						
			1:1,5	T2,5 A1,5			9,96	13,04	14,86					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		6,08	7,27	10,99						
			1:1	T3,0 A1,0				10,70	12,47	14,96				
			1:1,5	T3,0 A1,5				10,66	13,99	16,89				
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				8,12	11,76	10,47					
		1:1	T3,5 A1,0					9,36	15,16	13,72				
		1:1,5	T3,5 A1,5						12,20	18,23	18,61			
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,90	7,62	9,42							
			1:1	T2,5 A1,0		6,73	9,72	11,45						
			1:1,5	T2,5 A1,5			10,15	14,52	14,89					
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		4,02	9,08	10,23							
		1:1	T3,0 A1,0				11,46	13,86	11,42					
		1:1,5	T3,0 A1,5				12,16	15,46	13,02					
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				8,25	8,74	11,50					
		1:1	T3,5 A1,0					9,99	12,22	16,32				
		1:1,5	T3,5 A1,5						14,55	15,26	18,79			
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,40	7,38	10,09							
			1:1	T2,5 A1,0		6,80	11,89	8,47						
			1:1,5	T2,5 A1,5			9,85	14,39	12,59					
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		5,39	7,89	9,51						
			1:1	T3,0 A1,0				11,13	10,70	14,36				
			1:1,5	T3,0 A1,5				13,00	14,85	15,37				
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				7,25	11,12	9,86					
		1:1	T3,5 A1,0					10,59	13,77	13,24				
		1:1,5	T3,5 A1,5						14,62	18,22	17,50			
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	4,13	7,38	8,21							
			1:1	T2,5 A1,0		7,35	9,43	10,49						
			1:1,5	T2,5 A1,5			11,39	12,87	15,35					
1:3		1:0,5	T3,0 A0,5		5,18	6,69	10,81							
		1:1	T3,0 A1,0				11,85	12,07	13,67					
		1:1,5	T3,0 A1,5				11,59	14,05	13,97					
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				8,46	9,33	11,54					
		1:1	T3,5 A1,0					12,10	12,89	14,61				
		1:1,5	T3,5 A1,5						16,13	17,51	17,91			

(fonte: a autora)

Figura 54 – Coeficiente de capilaridade em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

Na Tabela 48 verifica-se que o coeficiente de capilaridade sofre influência significativa da relação água/aglomerante. Nos gráficos acima pode-se identificar também a influência do teor de cal nesta propriedade.

Tabela 48 – Resultados sintetizados da ANOVA do coeficiente de capilaridade das argamassas

TABELA ANOVA – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	S	NS	S	NS	NS	S	NS	S	NS
Composição Granulométrica	S	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	NS	NS	S	S	S	NS	NS
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	S	S	S	S	S	NS	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	S	S	S	S	S	NS	S	S

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Relação água/aglomerante: Mantendo-se a proporção entre os materiais, o aumento da relação água/aglomerante gera o aumento da porosidade do material, resultando em uma maior absorção. Segundo Recena (2012), a água tende a formar uma rede de canais dentro da argamassa, buscando uma área de menor pressão, localizada na superfície.

Teor de cal: Conforme estudo de Arandigoyen e Alvarez (2006), o incremento de cimento na pasta de cal reduz tanto a porosidade quanto o coeficiente de capilaridade. Recena (2012) comenta que argamassas de cimento são utilizadas em regiões em contato com a ação deletéria da água e umidade. Selmo (1989) acrescenta que argamassas com maior teor de cal possuem maior porosidade aparente e absorção total. Porém, é importante salientar que tais argamassas não estavam carbonatadas. Arandigoyen *et al.* (2006), como exemplo, verificaram uma redução na porosidade e no volume dos poros com o aumento da carbonatação de pastas de cimento e cal.

6.3.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido

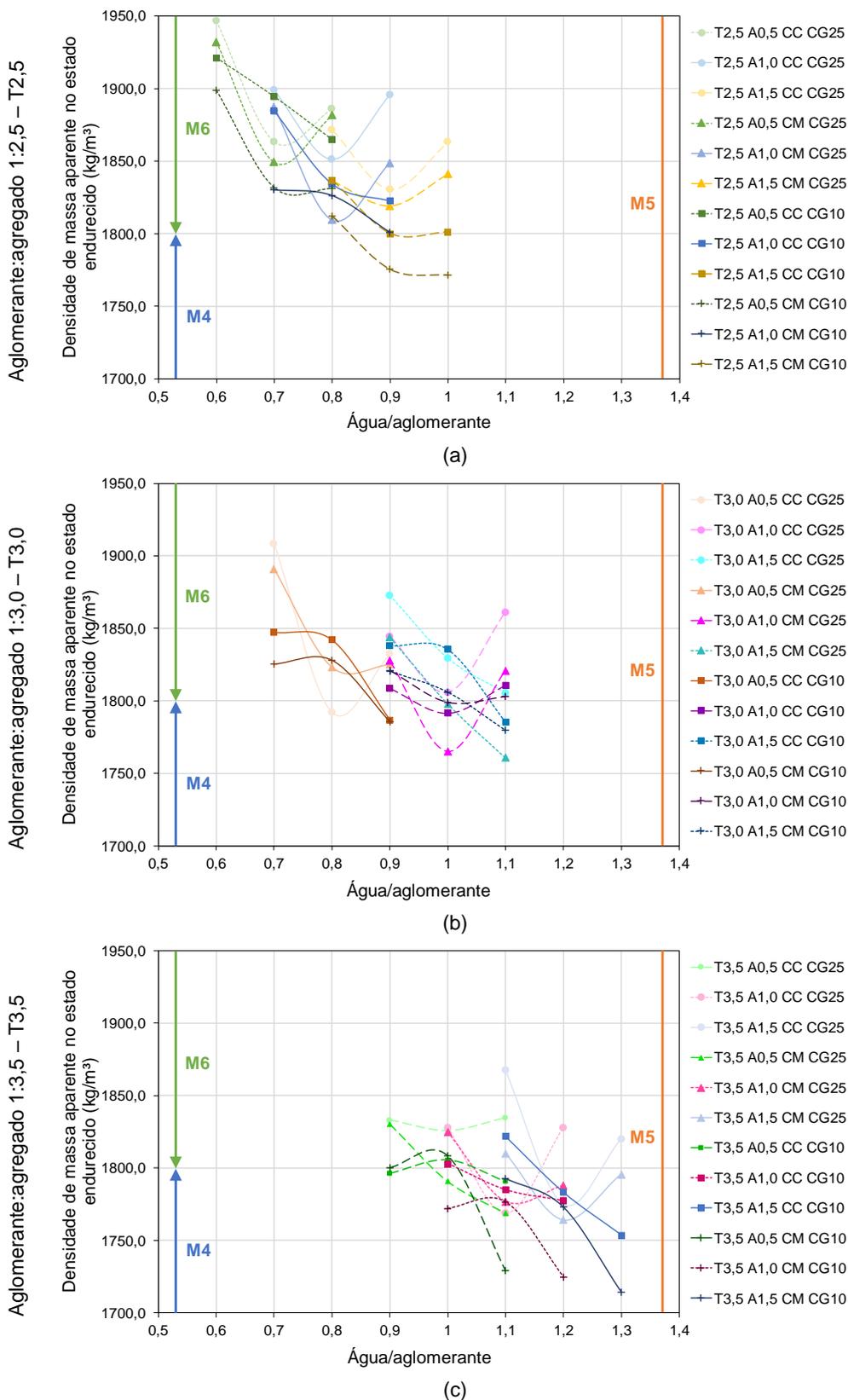
Os valores de densidade de massa aparente no estado endurecido (Tabela 49 e Figura 55) variam entre 1700 kg/m³ e 1950 kg/m³. Todas as argamassas podem ser enquadradas como M5; ou ainda, algumas delas podem ser classificadas como M4 e outras, como M6 (NBR 13281; ABNT, 2005e).

Tabela 49 – Valores médios de densidade de massa aparente no estado endurecido

		Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)											
Variáveis de controle		Grupo		Água/Aglomerante									
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	1946,7	1863,5	1886,2						
			1:1	T2,5 A1,0		1899,1	1851,4	1896,0					
			1:1,5	T2,5 A1,5			1871,7	1830,5	1863,2				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		1908,4	1792,1	1832,2					
			1:1	T3,0 A1,0				1844,4	1805,8	1861,0			
			1:1,5	T3,0 A1,5				1872,8	1829,4	1805,4			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				1833,1	1825,9	1834,7				
		1:1	T3,5 A1,0					1828,0	1768,9	1828,2			
		1:1,5	T3,5 A1,5						1867,6	1774,9	1820,2		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	1932,2	1849,4	1881,8						
			1:1	T2,5 A1,0		1887,3	1809,5	1848,8					
			1:1,5	T2,5 A1,5			1836,3	1819,4	1841,2				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		1890,9	1823,3	1825,2					
			1:1	T3,0 A1,0				1827,6	1765,0	1820,9			
			1:1,5	T3,0 A1,5				1843,9	1798,1	1760,9			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				1830,4	1790,9	1768,9				
		1:1	T3,5 A1,0					1824,9	1777,0	1788,3			
		1:1,5	T3,5 A1,5						1810,2	1764,3	1795,8		
Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	1921,3	1894,5	1865,0						
			1:1	T2,5 A1,0		1884,8	1834,5	1822,8					
			1:1,5	T2,5 A1,5			1837,0	1800,1	1801,2				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		1847,5	1842,1	1786,7					
			1:1	T3,0 A1,0				1808,6	1791,6	1810,7			
			1:1,5	T3,0 A1,5				1838,1	1835,6	1785,6			
	1:3,5	1:0,5	T3,5 A0,5				1796,3	1805,5	1790,8				
		1:1	T3,5 A1,0					1803,2	1785,1	1777,6			
		1:1,5	T3,5 A1,5						1822,1	1783,4	1753,8		
	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5	T2,5 A0,5	1898,9	1831,7	1831,2						
			1:1	T2,5 A1,0		1830,5	1826,4	1800,8					
			1:1,5	T2,5 A1,5			1812,1	1775,6	1771,5				
		1:3	1:0,5	T3,0 A0,5		1825,3	1827,9	1785,6					
			1:1	T3,0 A1,0				1820,9	1799,1	1803,1			
			1:1,5	T3,0 A1,5				1820,4	1806,0	1779,9			
1:3,5		1:0,5	T3,5 A0,5				1800,4	1808,5	1729,6				
		1:1	T3,5 A1,0					1772,3	1776,7	1724,8			
		1:1,5	T3,5 A1,5						1793,0	1773,3	1714,6		

(fonte: a autora)

Figura 55 – Densidade de massa aparente no estado endurecido em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

A ANOVA da densidade de massa (Tabela 50) apresenta que os três fatores analisados influenciaram significativamente na resposta. Esta propriedade obteve maiores valores com a cal cálcica e com a composição granulométrica CG25, reduziu com o aumento da relação água/aglomerante. Além deles, o aumento do teor de cal e do volume de agregado também resultaram em um aumento da densidade de massa no estado endurecido.

Tabela 50 – Resultados sintetizados da ANOVA da densidade de massa aparente no estado endurecido

TABELA ANOVA – DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	S	S	S	NS	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	S	S	S	S	NS	S	S	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	S	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S	S	NS
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	NS	S	NS						

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Tipo de cal: as argamassas com cal cálcica apresentaram maior densidade que as de cal magnesiana. Considerando que a densidade dos materiais definem a densidade de massa da argamassa, o comportamento apresentado foi divergente do esperado, uma vez que a cal hidratada de maior massa unitária é a magnesiana.

Composição granulométrica: Recena (2012, p. 40) coloca que:

[...] o aumento da resistência mecânica em argamassas é obtido a partir do aumento de sua densidade, por sua vez obtido com o correto proporcionamento dos materiais empregados, não raramente sendo necessário recorrer à mistura de agregados para a obtenção de granulometrias contínuas.

A CG 25, por apresentar maior continuidade em sua curva granulométrica, com consequentes menores índices de vazios, pode ter contribuído para uma maior densidade de massa no estado fresco e endurecido das argamassas.

Relação água/aglomerante: A densidade de massa depende da densidade dos materiais da mistura (Recena, 2012) e, visto que a água é o material com menor massa dentre todos os componentes, o aumento da relação água/aglomerante reduziu este fator.

Teor de cal: Selmo (1989) verificou que, mantendo-se a relação entre agregado e aglomerante, o aumento do teor de cal em relação ao de cimento resultou em uma redução da massa específica. Porém, deve-se salientar que a autora também variou a relação água/aglomerante, o que pode ter auxiliado na redução da massa unitária. Neste trabalho, foi verificado que, mantendo-se tanto o volume de agregado quanto a relação água/aglomerante, ocorreu aumento da densidade de massa, nos dois estados. Este resultado pode estar relacionado ao fato de que a cal é um material mais fino e preenche mais os vazios, possibilitando o aumento da densidade de massa.

Volume de agregado: Observa-se uma tendência de aumentar a densidade de massa no estado fresco e endurecido com o aumento do volume de agregado, considerando uma mesma relação água/aglomerante e teor de cal. A densidade é determinada tanto pela massa específica dos materiais constituintes, principalmente do agregado, quanto pelo teor de ar incorporado (Carasek, 2007).

6.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

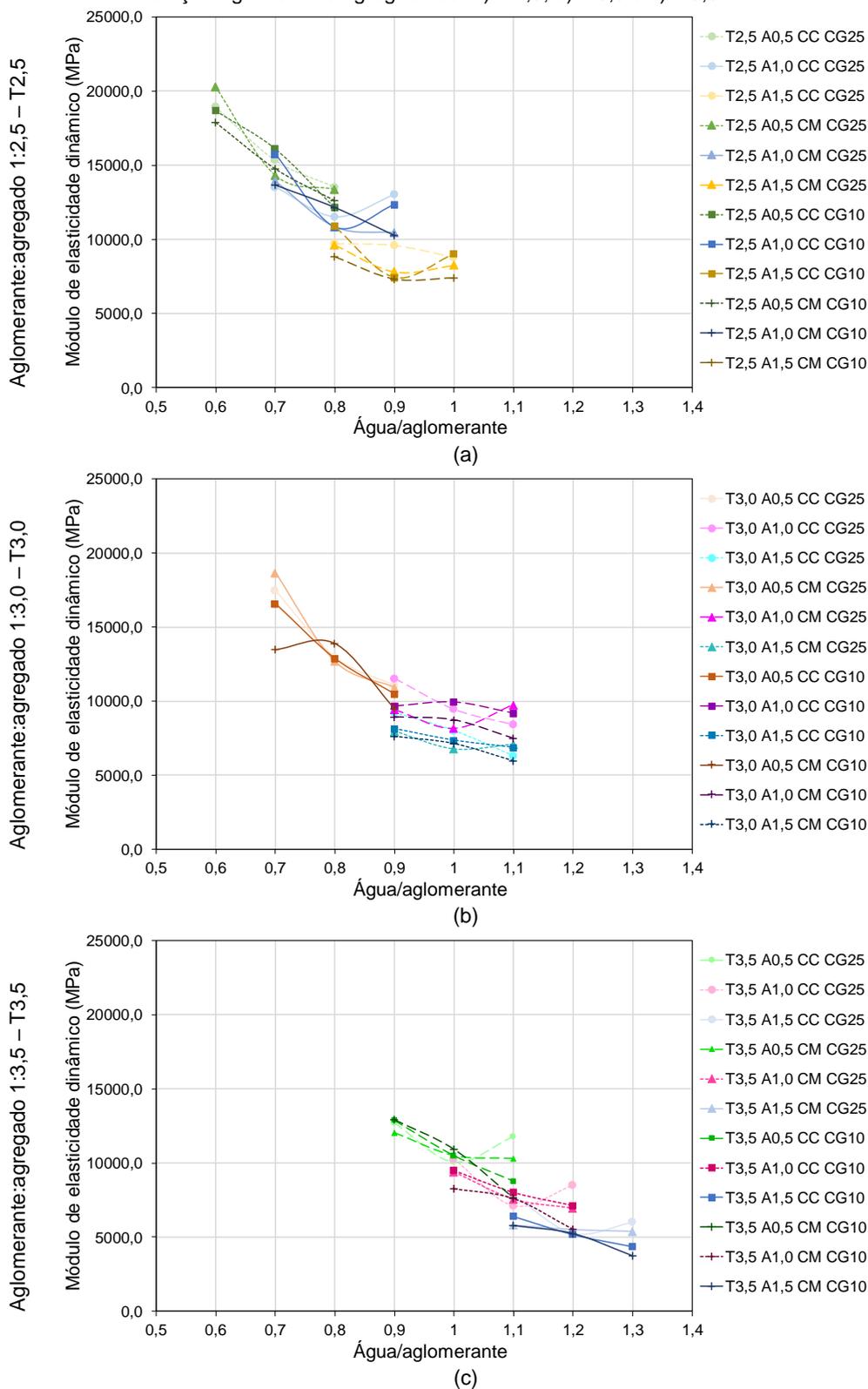
Os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico são apresentados na Tabela 51 e Figura 56. Os valores deste fator variam entre 3,7 GPa a 20,3 GPa. Este fator reduziu com o aumento do teor de cal e da relação água/aglomerante, e manteve-se muito semelhante com o aumento do volume de agregado.

Tabela 51 – Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico

Variáveis de controle			Grupo	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)									
				Água/Aglomerante									
				0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
Composição Granulométrica CG25	Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5 T2,5 A0,5	18928,2	15321,4	13514,4							
			1:1 T2,5 A1,0		13522,5	11503,7	13008,4						
			1:1,5 T2,5 A1,5			9723,5	9602,0	8779,7					
		1:3	1:0,5 T3,0 A0,5			17467,0	12962,1	11064,8					
			1:1 T3,0 A1,0					11526,6	9460,8	8432,7			
			1:1,5 T3,0 A1,5					9232,6	8012,2	6314,2			
	1:3,5	1:0,5 T3,5 A0,5					12683,6	10074,0	11776,0				
		1:1 T3,5 A1,0						10247,2	7100,7	8488,0			
		1:1,5 T3,5 A1,5							7817,0	5252,8	5999,7		
	Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5 T2,5 A0,5	20275,3	14312,2	13354,7						
				1:1 T2,5 A1,0		13907,4	10833,0	10443,6					
				1:1,5 T2,5 A1,5			9623,7	7812,2	8245,4				
1:3			1:0,5 T3,0 A0,5			18683,0	12681,0	10931,6					
			1:1 T3,0 A1,0					9419,4	8167,5	9748,5			
			1:1,5 T3,0 A1,5					7966,3	6782,4	7089,7			
1:3,5		1:0,5 T3,5 A0,5					12037,1	10496,6	10299,0				
		1:1 T3,5 A1,0						9379,3	7554,3	6953,8			
		1:1,5 T3,5 A1,5							5816,6	5511,0	5386,6		
Composição Granulométrica CG10		Cal Hidratada Cálcica	1:2,5	1:0,5 T2,5 A0,5	18675,7	16121,1	12154,4						
				1:1 T2,5 A1,0		15726,6	10826,2	12336,8					
				1:1,5 T2,5 A1,5			10884,4	7423,1	9019,7				
	1:3		1:0,5 T3,0 A0,5			16573,6	12872,2	10490,1					
			1:1 T3,0 A1,0					9673,0	9950,5	9192,6			
			1:1,5 T3,0 A1,5					8144,8	7362,7	6875,9			
	1:3,5	1:0,5 T3,5 A0,5					12890,2	10505,3	8778,7				
		1:1 T3,5 A1,0						9479,1	8008,5	7127,4			
		1:1,5 T3,5 A1,5							6406,4	5177,4	4355,4		
	Composição Granulométrica CG10	Cal Hidratada Magnésiana	1:2,5	1:0,5 T2,5 A0,5	17889,6	14754,3	12595,1						
				1:1 T2,5 A1,0		13637,1	12129,7	10256,3					
				1:1,5 T2,5 A1,5			8819,2	7321,3	7405,4				
1:3		1:0,5 T3,0 A0,5			13498,7	13905,9	9519,6						
		1:1 T3,0 A1,0					8939,7	8734,1	7483,5				
		1:1,5 T3,0 A1,5					7632,6	7141,3	5975,4				
1:3,5		1:0,5 T3,5 A0,5					12898,1	10919,6	7654,5				
		1:1 T3,5 A1,0						8249,4	7594,0	5535,8			
		1:1,5 T3,5 A1,5							5770,3	5233,1	3739,7		

(fonte: a autora)

Figura 56 – Módulo de elasticidade dinâmico em relação à água/aglomerante das argamassas com relação aglomerante:agregado de: a) 1:2,5; b) 1:3,0 e c) 1:3,5



(fonte: a autora)

A ANOVA do módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 52) apresenta resultados semelhantes à densidade de massa. Esta propriedade obteve maiores valores com a cal cálcica e com a

composição granulométrica CG25, reduziu com o aumento da relação água/aglomerante. Além deles, o aumento do teor de cal e do volume de agregado também resultaram em um aumento do módulo de elasticidade.

Tabela 52 – Resultados sintetizados da ANOVA do módulo de elasticidade dinâmico

TABELA ANOVA – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO									
	T2,5 A0,5	T2,5 A1,0	T2,5 A1,5	T3,0 A0,5	T3,0 A1,0	T3,0 A1,5	T3,5 A0,5	T3,5 A1,0	T3,5 A1,5
Tipo de Cal	NS	S	S	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica	S	NS	S	S	S	S	S	S	S
Relação Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
Tipo de Cal*Água/Aglomerante	S	S	NS	S	S	S	S	S	S
Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	NS	S	S	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica*Água/Aglomerante	S	S	S	S	S	S	NS	NS	S

S - variável de controle exerce influência significativa sobre a variável de resposta

NS - variável de controle não exerce influência significativa sobre a variável de resposta

(fonte: a autora)

Tipo de cal e composição granulométrica: o que foi observado nos resultados de densidade de massa, em geral, também se aplicam aqui, uma vez que o módulo é calculado a partir desta propriedade. Porém, não foi possível estabelecer uma tendência de comportamento padrão para todos os casos de módulo de elasticidade dinâmico em função destas duas variáveis controláveis.

Relação água/aglomerante: Recena (2012) comenta que materiais com menor módulo de elasticidade, ou seja, mais deformáveis, apresentam também menores resistências à compressão; e esta resistência é influenciada diretamente pela relação água/aglomerante, conforme verificado nos resultados.

Teor de cal: Verifica-se uma redução no módulo de elasticidade das argamassas com o aumento do teor de cal. Argamassas com maior quantidade de cimento pouco absorvem as deformações (CARASEK, 2007). Cincotto (1985) comenta que a capacidade de absorver deformações de argamassas de cimento aumenta mesmo com a adição de pequeno volume de cal. Esta adição de cal provoca a redução do módulo de deformação/elasticidade (SABBATINI, 1985; SELMO, 1989) e maior capacidade de absorver deformações (RECENA, 2012).

Volume de agregado: Com o aumento do volume de agregado miúdo nas argamassas, considerando-se a mesma relação água/aglomerante, verificou-se que o módulo destas não foi modificado de forma expressiva. Embora neste trabalho tenha-se obtido tal resultado, é referenciado que o aumento do teor de agregado nas argamassas contribui para o aumento do módulo (PINTO, 1996). A explicação pode residir no fato de que utilizaram-se pequenas variações no volume do agregado no programa experimental.

6.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS ARGAMASSAS

No Quadro 7 é possível identificar a influência de cada uma das variáveis controláveis nas propriedades das argamassas estudadas.

Quadro 7 – Quadro resumo da influência das variáveis controláveis nas propriedades das argamassas estudadas

Tendência de Comportamento								
ABNT NBR	Ensaio	Cal		CG		↑A	↑T	↑H
		CC	CM	CG25	CG10			
13276/2016b	Índice de consistência	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
-	Tensão de cisalhamento	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↓
13278/2005b	Densidade de massa no estado fresco	↑	↓	Δ	Δ	↑	↑	↓
13280/2005d	Densidade de massa no estado endurecido	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↓
15259/2005f	Coeficiente de capilaridade	Δ	Δ	Δ	Δ	↑	≈	↑
15630/2008	Módulo de elasticidade dinâmico	Δ	Δ	Δ	Δ	↓	≈	↓
13279/2005c	Resistência à tração na flexão	Δ	Δ	Δ	Δ	↓	≈	↓
13279/2005c	Resistência à compressão	Δ	Δ	Δ	Δ	↓	≈	↓
Legenda								
CC	Cal Cálctica	↑		Comportamento crescente				
CM	Cal Magnésiana	↓		Comportamento decrescente				
CG	Composição Granulométrica	Δ		Comportamento teve alteração, no entanto não foi possível observar tendências				
A	Relação Cimento:Cal	≈		Não foram observadas alterações no comportamento				
T	Relação Aglomerante:Agregado							
H	Relação Água/Aglomerante							

(fonte: a autora)

Com relação ao tipo de cal, observou-se influência, principalmente, em todos os ensaios do estado fresco, bem como na densidade de massa no estado endurecido.

A composição granulométrica do agregado miúdo impactou principalmente nos resultados dos três ensaios no estado fresco e na densidade de massa no estado endurecido.

A relação água/aglomerante foi o fator predominante, que influenciou todos os ensaios do estado fresco e endurecido, sem exceção.

A modificação do teor de cal também foi bastante importante para todos os ensaios avaliados.

O volume de agregado miúdo influenciou tanto nos ensaios do estado fresco quanto na densidade de massa no estado fresco e endurecido.

6.4.1 Observações quanto a variações nos resultados

Para a maioria das argamassas com a CG 25, a densidade de massa no estado fresco e endurecido diminuem para a relação água/aglomerante intermediária e, aumenta para a maior. Este fator pode estar relacionado com o procedimento do ensaio.

No estado fresco, a densidade é realizada aplicando golpes de espátula e quedas no recipiente, o que pode acarretar na segregação exsudação de amostras com maiores

quantidades de água. Por fim, ocorre o nivelamento desta parte superficial, contendo pasta com elevada relação água/aglomerante, o que pode resultar em um volume final de material mais denso. No estado endurecido, a moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em mesa vibratória, procedimento em que pode ter ocorrido segregação dos agregados e exsudação da pasta; e seguia com o nivelamento desta camada superior, a qual possui elevada relação água/aglomerante.

Carasek (2007) comenta que a exsudação ocorre em argamassas fluidas, nas quais a água separa-se da argamassa e sobe, enquanto que os agregados, por gravidade, sedimentam. Considerando-se que a CG 25 possui um menor índice de vazios que a CG10, com uma mesma quantidade de pasta, a primeira apresentaria um preenchimento destes vazios e maior separação entre partículas e, conseqüentemente, maior fluidez (CARDOSO, 2009). Além destas características em vista, Recena (2012, p. 104) também comenta que “A movimentação desta água será tão mais intensa quanto menor a capacidade do aglomerado, argamassa ou concreto, em retê-la no seu interior e quanto maior a quantidade de água empregada.”.

Soma-se a isto o fato de que as argamassas que apresentaram tais fenômenos possuem água em excesso. Desta forma, não foi mais possível a completa retenção desta água pelos materiais, inclusive pela cal, que possui elevada capacidade para tal.

O possível efeito desta moldagem foi observado nos demais ensaios do estado endurecido, como coeficiente de capilaridade e no módulo de elasticidade dinâmico (sendo bastante evidenciado neste último, uma vez que é calculado de acordo com a densidade de massa).

A redução do coeficiente de capilaridade das argamassas com elevadas relações água/aglomerante foi verificado em diversos proporcionamentos. Para as argamassas que sofreram exsudação na moldagem, a relação água/aglomerante pode ter sido reduzida neste processo, resultando em uma conseqüente redução do coeficiente de absorção. Para as demais, a explicação pode estar relacionada com o procedimento de ensaio. Por serem argamassas mais porosas, possuem uma maior absorção; mas podem também possuir uma elevada evaporação pela lateral do corpo-de-prova durante os 90 minutos de ensaio. Desta forma, por não existir um selamento lateral para evitar esta perda de massa, a massa medida da amostra pode ter sido menor, causando uma redução neste coeficiente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda produzidas e utilizadas em obras de edificações, as argamassas mistas de cimento e cal possuem propriedades intermediárias entre argamassas contendo apenas um destes aglomerantes e, dependendo da utilização, podem trazer benefícios para o sistema de revestimento. Este trabalho visou contribuir com a avaliação de tais argamassas mistas, principalmente no estado fresco, mas também no estado endurecido.

Verificou-se que foi possível avaliar as variáveis controláveis das argamassas utilizando a tensão de cisalhamento inicial obtida por reometria rotacional, com ressalvas. Considerando que se propôs a ser um estudo comparativo e inicial entre o comportamento do material analisado, o trabalho limitou-se a utilizar a rotina de ensaio descrita anteriormente e o *spindle* tipo vane 30x15, conforme outros ensaios realizados no grupo de pesquisa. Outras análises, outros tipos de ensaio, bem como adaptações dos modelos propostos podem ser realizados neste mesmo equipamento. Sugere-se, inclusive, que a rotina, tamanho do *spindle*, gap entre o *spindle* e o recipiente de ensaio sofra adaptações para melhor caracterizar este material. É importante observar que o programa experimental precisou ser modificado de forma que pudesse ser realizado no equipamento disponível, uma vez que seu torque é limitado.

Identificou-se que os fatores controláveis influenciaram na caracterização do estado fresco das argamassas, tanto com relação ao índice de consistência, quanto com relação à tensão de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração, obtida através de reometria rotacional.

De forma geral, verificou-se que o tipo de cal possui elevada influência no estado fresco. Argamassas com cal magnesiana apresentaram menores índices de consistência e maiores tensões de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração. O resultado apresentado pode estar relacionado com a maior área superficial da cal magnesiana, verificada por BET e pelo tamanho das partículas, identificados por imagem no MEV. Pode sofrer influência também do seu maior índice de plasticidade; bem como com o resultado do empacotamento e interação das partículas desta cal hidratada e do cimento.

A composição granulométrica CG25 resultou em argamassas com maiores índices de consistência e menores tensões de cisalhamento na taxa de 20s^{-1} na aceleração, do que aquelas com a CG 10. A explicação reside no fato da primeira ser uma composição contínua, com menor volume de vazios, resultando uma maior quantidade de pasta para envolver os grãos. Desta forma, possibilita um melhor rolamento entre partículas e conseqüente melhor movimentação nas argamassas.

A relação água/aglomerante foi dominante tanto nos ensaios do estado fresco quanto endurecido. Conforme esperado, o aumento deste teor aumentou o índice de consistência e reduziu os valores de tensão de cisalhamento inicial. Portanto, argamassas com maiores quantidades de água apresentaram-se mais fluidas.

O proporcionamento das argamassas influenciou as variáveis de resposta conforme esperado. Verificou-se que, para os traços com maior volume de agregado ou com maior volume de cal em substituição ao volume de cimento foi necessário aumentar a relação água/aglomerante gradativamente, de forma a caracterizar estas argamassas, tanto por motivos operacionais (limitação no torque do reômetro rotacional), quanto por motivos de utilização do material.

A correlação entre os valores de índice de consistência e tensão de cisalhamento inicial é inversa, e foi melhor caracterizada por uma equação do tipo exponencial, sendo o R^2 de 0,8456. Porém, identificou-se uma elevada dispersão dos resultados em relação à equação na faixa de argamassas com consistência entre 200mm e 250mm. Esta correlação deve ser utilizada com ressalvas, uma vez que não abrange uma faixa contínua de argamassas.

Os ensaios no estado endurecido, de maneira geral, podem ser relacionados. Argamassas com maiores densidades apresentaram maior módulo de deformação, maior resistência e menor coeficiente de capilaridade.

A relação água/aglomerante influenciou de forma significativa e irrestrita todas as propriedades do estado endurecido, revelando-se ser o parâmetro mais influente.

O tipo de cal e composição granulométrica, apesar de serem significativos em diversos casos, em geral não apresentaram um padrão de comportamento que pudesse diferenciá-los de forma conclusiva. Isso ocorreu nos ensaios de resistência e coeficiente de capilaridade. Para a densidade de massa no estado endurecido, observou-se maiores valores para a cal cálcica e para a CG 25.

Foi observado que o teor de cal também alterou todas as propriedades, e o volume de agregado influenciou na densidade no estado endurecido. No entanto não foi realizada a análise de variância para determinação da significância destas duas variáveis.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a complementar as análises e resultados obtidos neste trabalho, são sugeridos os seguintes temas para avaliação em trabalhos futuros:

- a) Com relação aos aglomerantes:
 - a busca por métodos de dispersão mais eficientes para a avaliação do tamanho das partículas de cal no ensaio de granulometria a laser;
 - a análise do potencial zeta de misturas de cimento e cal hidratada;
 - a identificação da influência da cal hidratada dolomítica (com maior teor de MgO), de cales com diferentes classificações (CHI, CHII e CHIII) e da maturação da cal hidratada nos parâmetros analisados neste trabalho;
 - a avaliação da reologia apenas de pastas de cimento e cal hidratada, separadamente e de forma mista, e ao longo do tempo.

b) Com relação à composição granulométrica:

- o teste de argamassas com outras composições granulométricas do agregado miúdo;
- a avaliação do empacotamento total da mistura, incluindo aglomerantes e agregados.

c) Considerando-se o ensaio de reometria rotacional:

- a adaptação da rotina, tamanho do *spindle* e dimensões do recipiente de ensaio para que possam ser obtidos mais dados, de forma a melhor caracterizar a argamassa.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, R. dos S. A. de. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados**. 2008. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.
- ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 175 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- ANTMAN, S. S.; MARSDEN, J. E. SIROVICH, L. (Ed.). **Prandtl – Essentials of Fluid Mechanics**. 3. ed. New York: Springer, 2008.
- ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. Blended pastes of cement and lime: pore structure and capillary porosity. **Applied Surface Science**, v. 252, p. 8077-8085, 2006.
- ARANDIGOYEN, B.; BICER-SIMSIR, B.; ALVAREZ, J. I.; LANGE, D. A. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. **Science Direct**. v. 252, p. 7562-7571, 2006.
- ARIZZI, A. CULTRONE, G. The difference in behavior between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical–mechanical properties. **Cement and Concrete Research**. v. 42, p.818-826, 2012.
- ARIZZI, A.; HENDRICKX, R.; CULTRONE G.; VAN BALEN, K. Diferencias en las propiedades reológicas de suspensiones de cal calcítica y dolomítica: influencia de las características de las partículas e implicaciones prácticas en la fabricación de morteros de cal. **Materiales de Construcción**. v.62, p. 231-250, abr.-jun. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996a.
- _____. **NBR 9290**: Cal hidrata para argamassas - Determinação de retenção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1996b.
- _____. **NBR 7200**: Execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- _____. **NBR 9207**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss. Rio de Janeiro: ABNT, 2000a.
- _____. **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura. Rio de Janeiro: ABNT, 2000b.

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

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

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001c.

_____. **NBR 6473:** Cal virgem e cal hidratada – Análise química. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland - Análise química. Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a. Cancelada em 28.09.2016 e substituída pela NBR 13276 (ABNT, 2016b).

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

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

_____. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

_____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005e.

_____. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005f.

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

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

_____. **NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

_____. **NBR 7211.** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

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

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

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

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

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

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 9206:** Cal hidratada para argamassas — Determinação da plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

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

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa.** 4. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2002.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar – a review. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, n. 6, e International Symposium on Mortars Technology, n. 1, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005, p. 73-82.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G; GUIMARÃES, E. A.; Silva, F. G. S. Study of the laboratory Vane test on mortars. **Building and Environment.** v.42, p 86–92, 2007.

BONIN, L. C.; FEUERHARMEL, C.; CARNEIRO, A.M.P. Estudo da influência da distribuição granulométrica da areia na trabalhabilidade da argamassa. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, n. 3, 1999, Vitória. **Anais...** Vitória: SBTA, 1999. p. 371-378.

BOYNTON, R. S. **Chemistry and technology of lime and limestone.** Universidade de Michigan: Wiley, 1980.

BROOKFIELD Engineering Laboratories, Inc. **Brookfield R/S+ Rheometer**: Operating Instructions. n. M08-219-B1211. Middleboro: Brookfield Engineering Laboratories, Inc., [entre 2005 e 2017]a. 81 p. Disponível em: <<http://www.brookfieldengineering.com/support/documentation/operator-manuals.asp?fid=20>>. Acesso em: mai. 2017.

BROOKFIELD Engineering Laboratories, Inc. **Vane Spindles**: Assembly & Operating Instructions. n. M02-290-C0809. Middleboro: Brookfield Engineering Laboratories, Inc., [entre 2005 e 2017]b. 2 p. Disponível em: <http://www.brookfieldengineering.com/download/download_form.asp?uid=&fid=46>. Acesso em: mai. 2017.

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

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2. p. 863-904.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método do squeeze-flow. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, n. 6, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005. p. 121-143.

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

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.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1999.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos.

CHHABRA, P. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications**. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2008.

CINCOTTO, M. A. Conceitos básicos sobre a tecnologia da cal. In: Reunião Aberta da Indústria da Cal, n. 5, 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABPC, 1985.

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 de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1, p. 695-725.

CINCOTTO, M. A.; ÂNGULO, S. C.; CARNEIRO, A. M. P. Composições granulométricas de argamassas e seus efeitos no estado fresco e endurecido. In: Congresso Português de Argamassas e Etics, n. 4, 2012, Coimbra. **Anais...** Coimbra: APFAC, 2012.

CORATHERS, L. A. **Lime**. U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Sumaries, Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/mcs-2016-lime.pdf>>. Acesso em: jul. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário mineral brasileiro**. Brasília, v. 35, 2010.

DHEILLY, R. M.; BOUGUERRA, A.; BEAUDOIN, B.; TUDO, J.; QUENEUDEC, M. Hydromagnesite development in magnesian lime mortars. **Materials Science & Engineering A**. v. 268, p. 127-131, 1999.

DINGER, D. **Medidas de Pontos isoelétricos sem o Uso de Analisador de Potencial Zeta**. Cerâmica Industrial, v. 11, n. 3, maio-junho 2006.

FRANÇA, M. S. de. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. **Ambiente Construído**. v.12, p.165-174, abril-junho 2012.

GIROTTTO, L. S. **Investigação da retração plástica da argamassa do concreto auto-adensável**. 2012. 221f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, São Paulo.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. São Paulo: Pini, 1998.

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P.B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 2980-2987, 2011.

HOPPE FILHO, J.; CARDOSO, F. A.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de argamassas. **E-Mat: Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**. v. 3, n. 2, p. 103-120, nov. 2006.

KIRYU, H. dos S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira.

KLEIN, C.; HURLBUT JR., C. S. **Manual de Mineralogía**. Barcelona: Editorial Reverté, 1997. v. 2.

KUDO, E. K. **Caracterização reológica de argamassas colantes**. 2012. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. I. R. **Fluid mechanics**. 5. ed. Oxford: Elsevier, 2012.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos**: ênfase na indústria do petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MEDEIROS, M. H. F. de; HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente Construído**, v. 15. n. 3. Porto Alegre, set. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000300019>. Acesso em: set. 2016.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E.; ANAGNOSTOPOULOU, S. Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. **Cement & Concrete Composites**. v. 27, p. 289-294, 2005.

NATURAL LIME ASSOCIATION. **Fact Sheet**. Lime: The versatile chemical – Lime terminology, standards and properties. Arlington, 2007. Disponível em: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/fact-properties2007rev.pdf. Acesso em: mai. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2013.

PAIVA, H. M. de. **Caracterização reológica de argamassas**. 2005. 85p. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, Aveiro.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco**. 2015. 180f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós - Graduação Em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

PILAR, R.; SCHANKOSKI, R. A.; DAL MORO, A. J.; REPETTE, W. L. Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 92-104. Rio de Janeiro, 2016.

PINTO, J. A. do N. **Elementos para a dosagem de argamassa**. 2. ed. Santa Maria: Multipress, 1996.

QIAN, Y.; S. KAWASHIMA. Flow onset of fresh mortars in rheometers: Contributions of paste deflocculation and sand particle migration. **Cement and Concrete Research**. v. 90, p. 97-103, 2016.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland**: estudo em pasta. 2008. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1999.

RAO, M.A. **Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications**. 3. ed. Nova York: Springer, 2013.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado**: estudo de caso. 2008. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, 2008.

RHEOTEC Messtechnik GmbH. **RHEO3000**, versão 1.2: Brookfield, 2008. 1 CD-ROM.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; RUIZ-AGUDO, E.; ORTEGA-HUERTAS, M.; HENSEN, E. Nanostructure and irreversible colloidal behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Implications in cultural heritage conservation. **Langmuir**. v. 21, p. 10948-10957, 2005.

RUIZ-AGUDO, E.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. Microstructure and Rheology of Lime Putty. **Langmuir**. v.26, p. 3868-3877, 2010.

SABBATINI, F. H. O uso da cal em argamassas de assentamento. In: Reunião Aberta da Indústria da Cal, n. 5, 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABPC, 1985.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e dolomito. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil**: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 363-387.

SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. **Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars**. Journal of the European Ceramic Society, v. 27, p. 1735-1741. 2007.

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.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M. QUÉNEUDEC, M. A study of the viscosity of lime–cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime. **Construction and Building Materials**. v.18, p. 653-660, 2004.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M.; BEAUDOIN, B.; QUÉNEUDEC, M. The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime–cement–sand mortar. **Concrete and Concrete Research**. v. 36, p. 971-978, 2006.

SELMO, S. M. de S. **Dosagem de Argamassas de Cimento Portland e Cal para Revestimento Externo de Fachada dos Edifícios**. 1989. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco**. 2005. 233 p. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

SOUSA, J. G. G. de; LARA, P. L. de O. Reologia e trabalhabilidade das argamassas. In: BAUER, E. (Cord.). **Revestimentos de argamassa** – características e peculiaridades. Brasília: Sinduscon, 2005. p. 23-29.

SPURK, J. H.; AKSEL, N. **Fluid Mechanics**. 2. ed. Berlin: Springer, 2008.

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

STRUBLE, L. J.; JI, X. Rheology. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**. New York, Elsevier: 2001. p. 333-367.

THOMSON, M. L. Plasticity, water retention, soundness and sand carrying capacity: what a mortar needs. In: **International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests**. Part Five: Physical Characterisation and testing. The Publishing Company of RILEM: Scotland, May 1999.

YAMAGUCHI, H. **Engineering of fluid mechanics**. Dordrecht: Springer, 2008.

APÊNDICE A – Curvas da tensão de cisalhamento e da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento das argamassas

Tabela 53 – Argamassas T2,5 A0,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

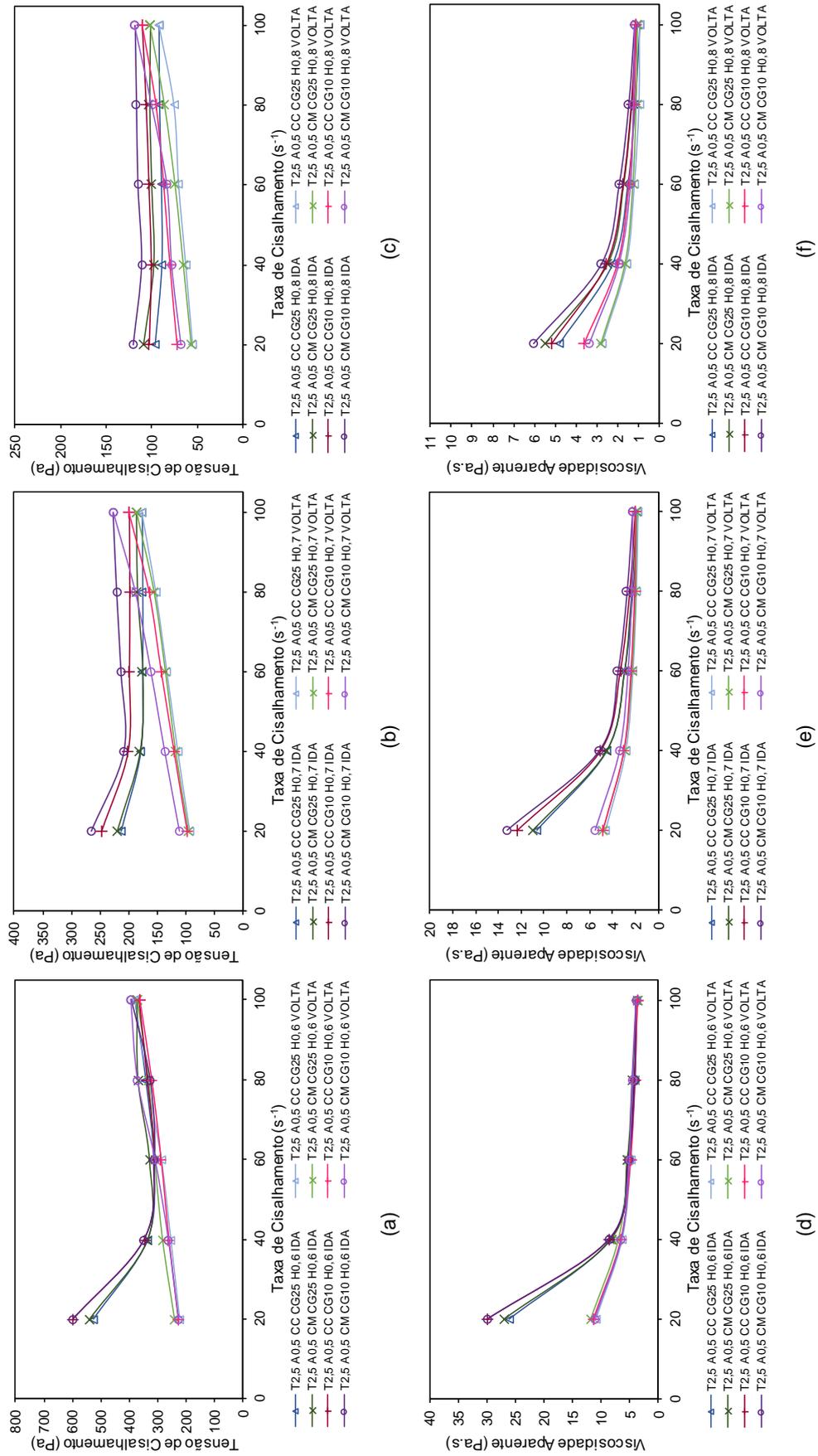


Figura 57 – Argamassas T2.5 A1.0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,7, 0,8 e 0,9, respectivamente

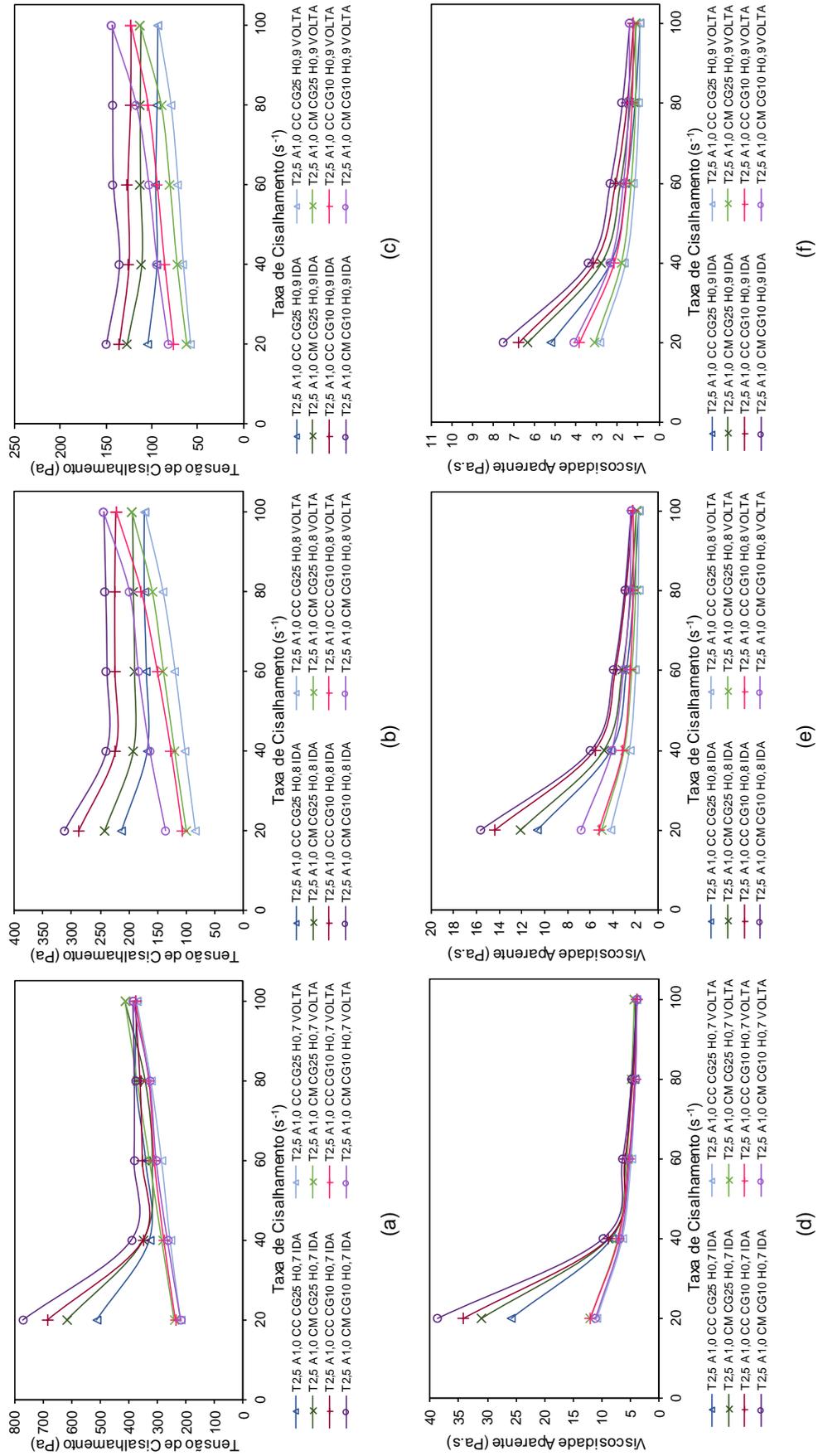


Figura 58 – Argamassas T2.5 A1.5: a, b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,8, 0,9 e 1,0, respectivamente

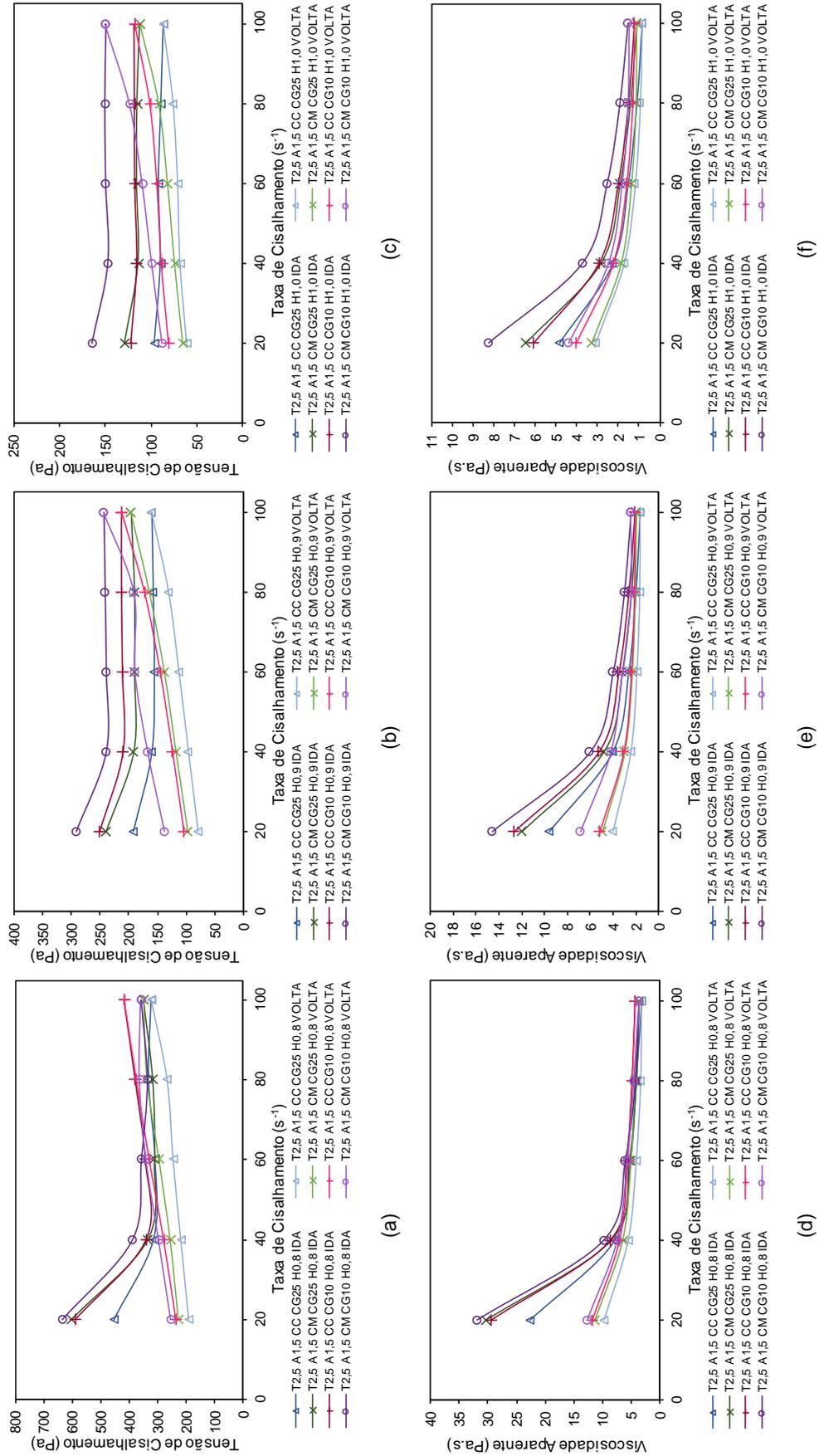


Figura 59 – Argamassas T3,0 A0,5: a, b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

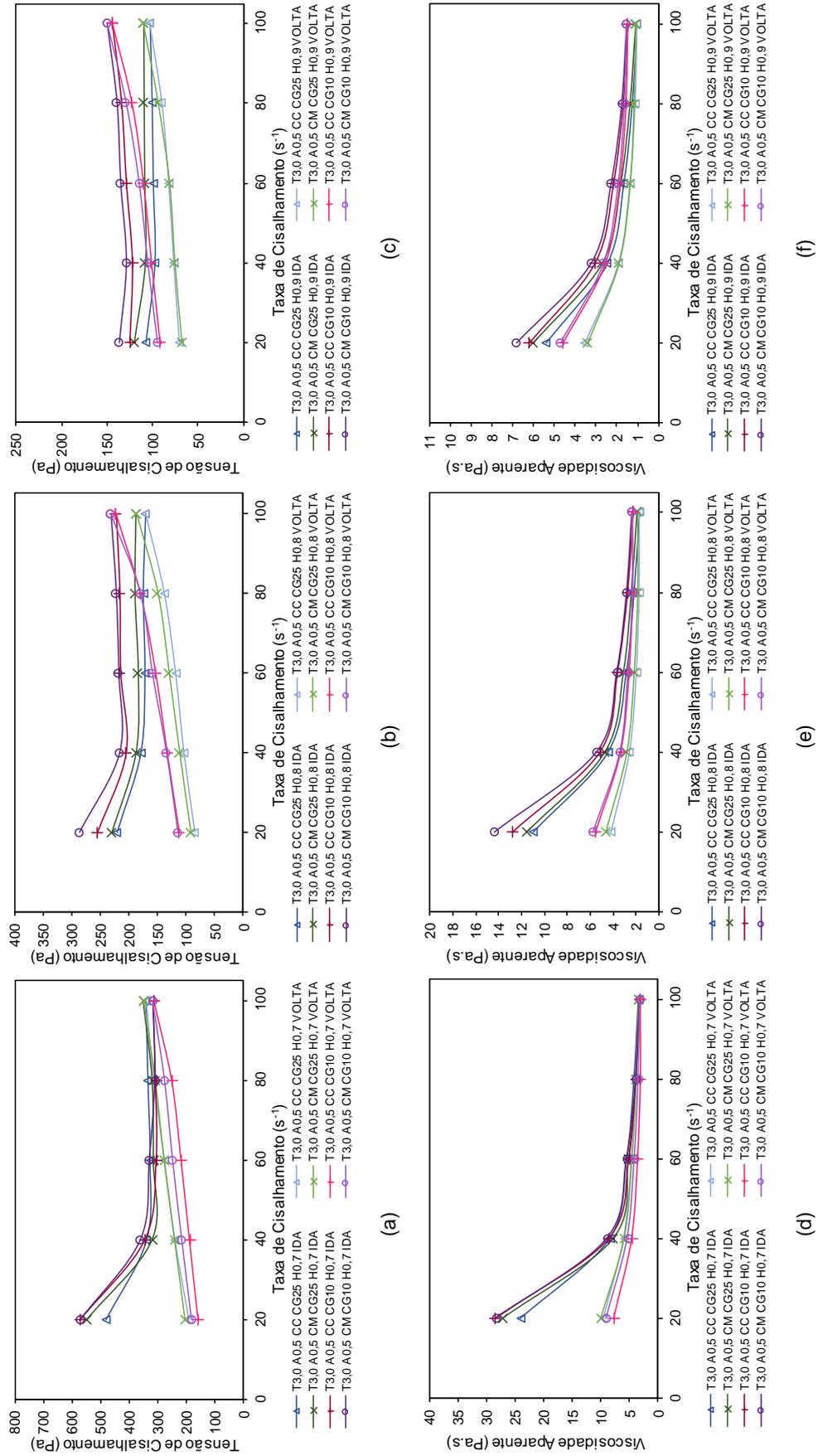


Figura 60 – Argamassas T3,0 A1,0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

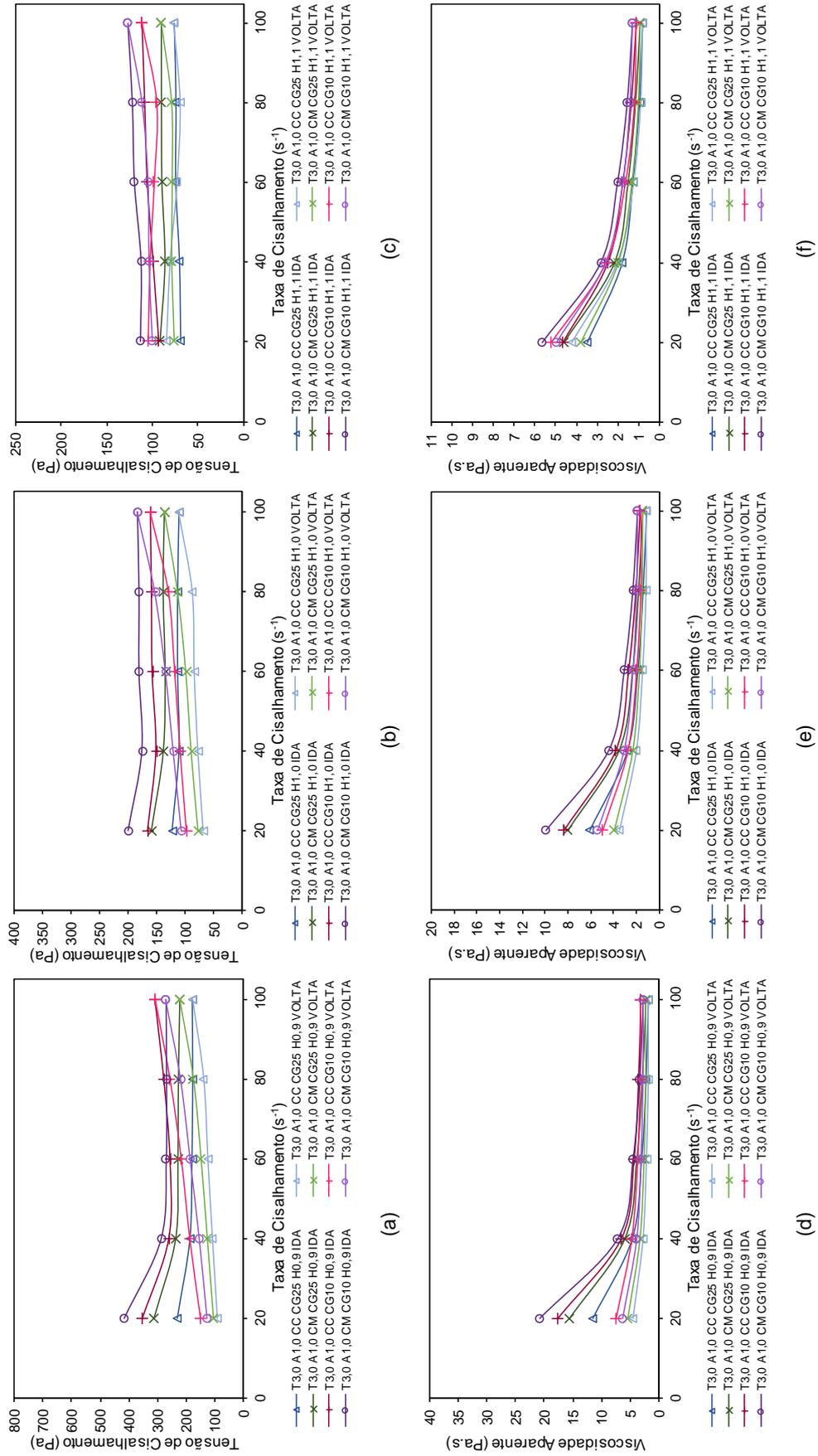


Figura 61 – Argamassas T3,0 A1,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

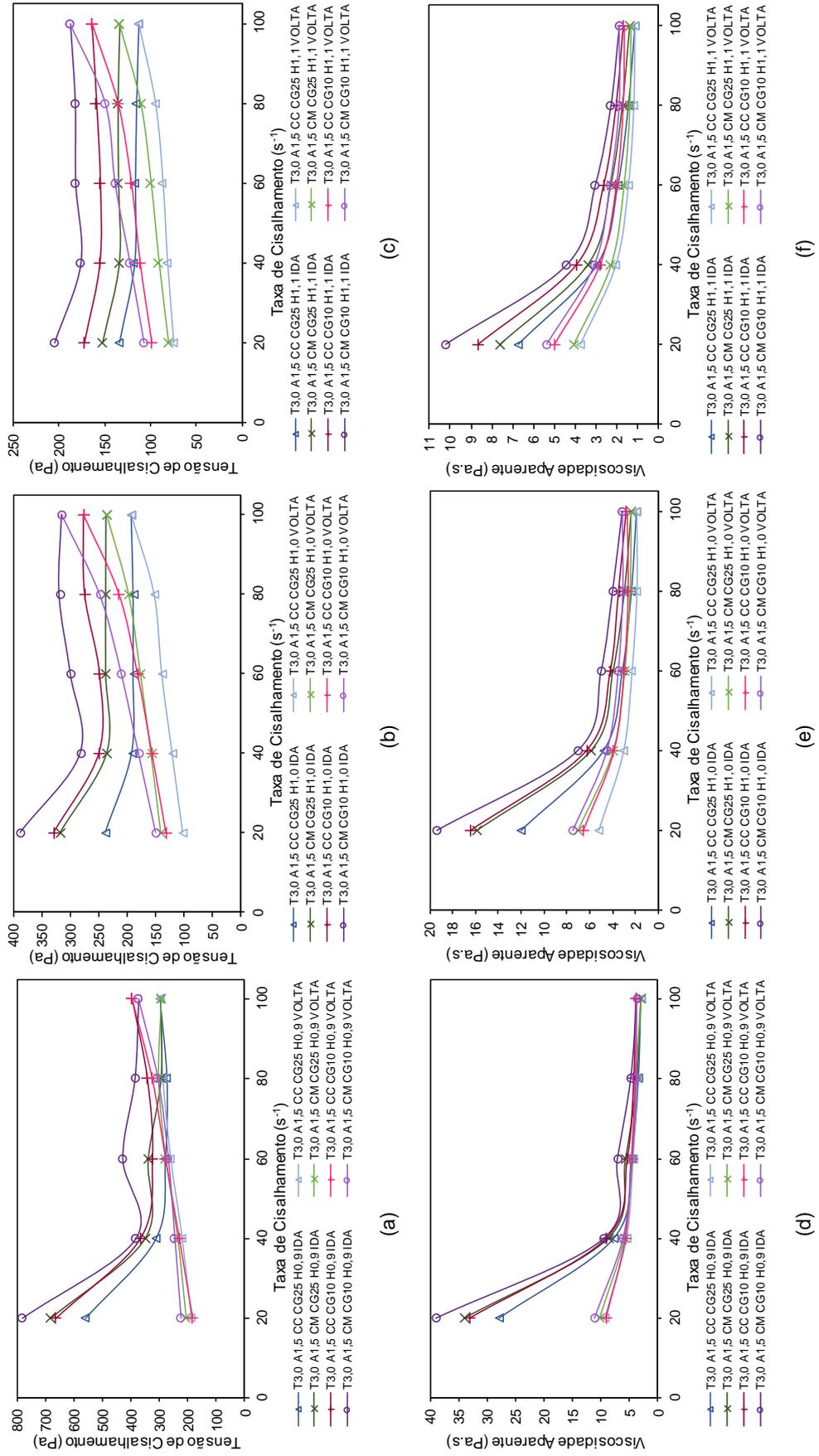


Figura 62 – Argamassas T3,5 A0,5: a, b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

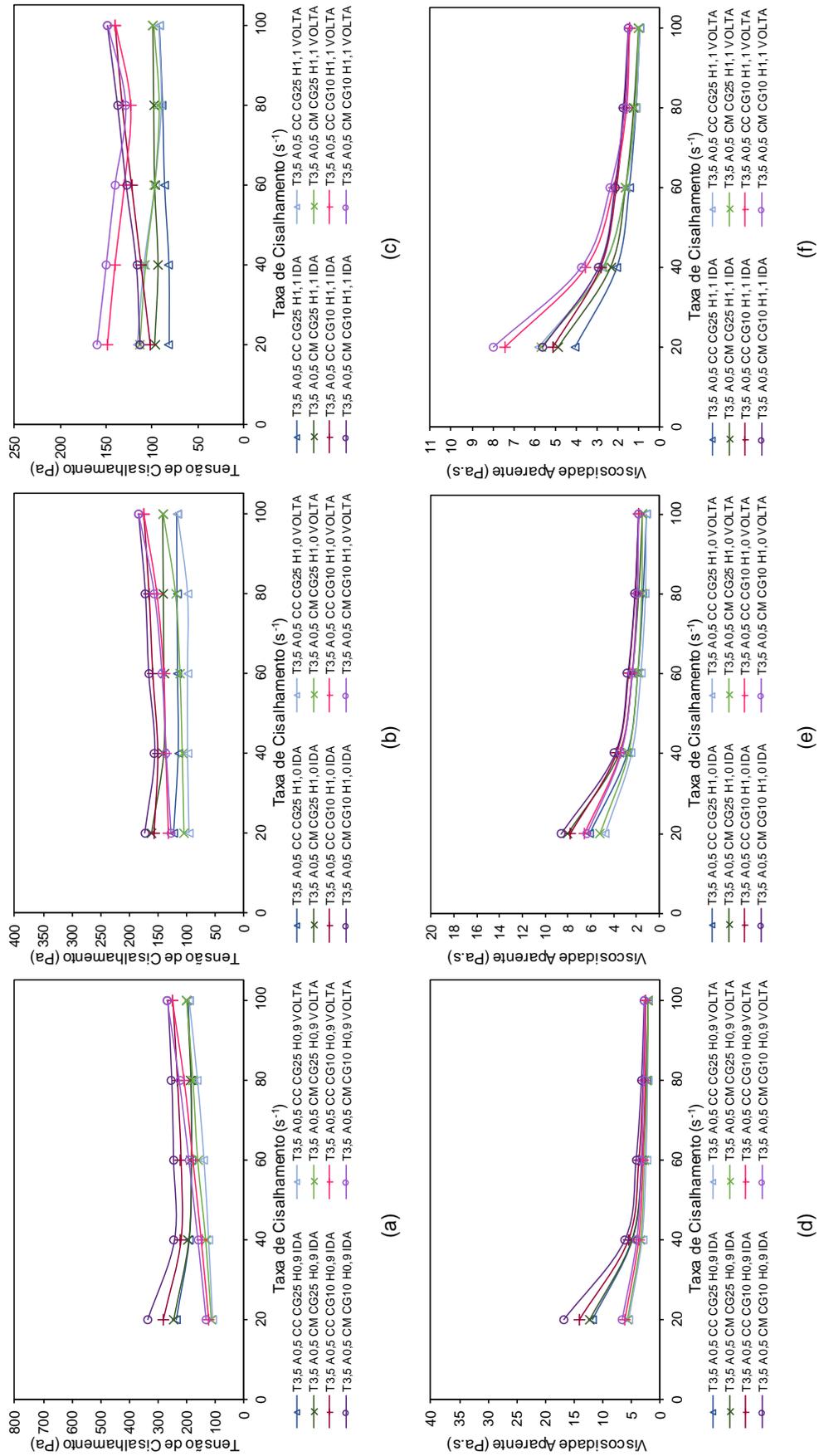


Figura 63 – Argamassas T3,5 A1,0: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente

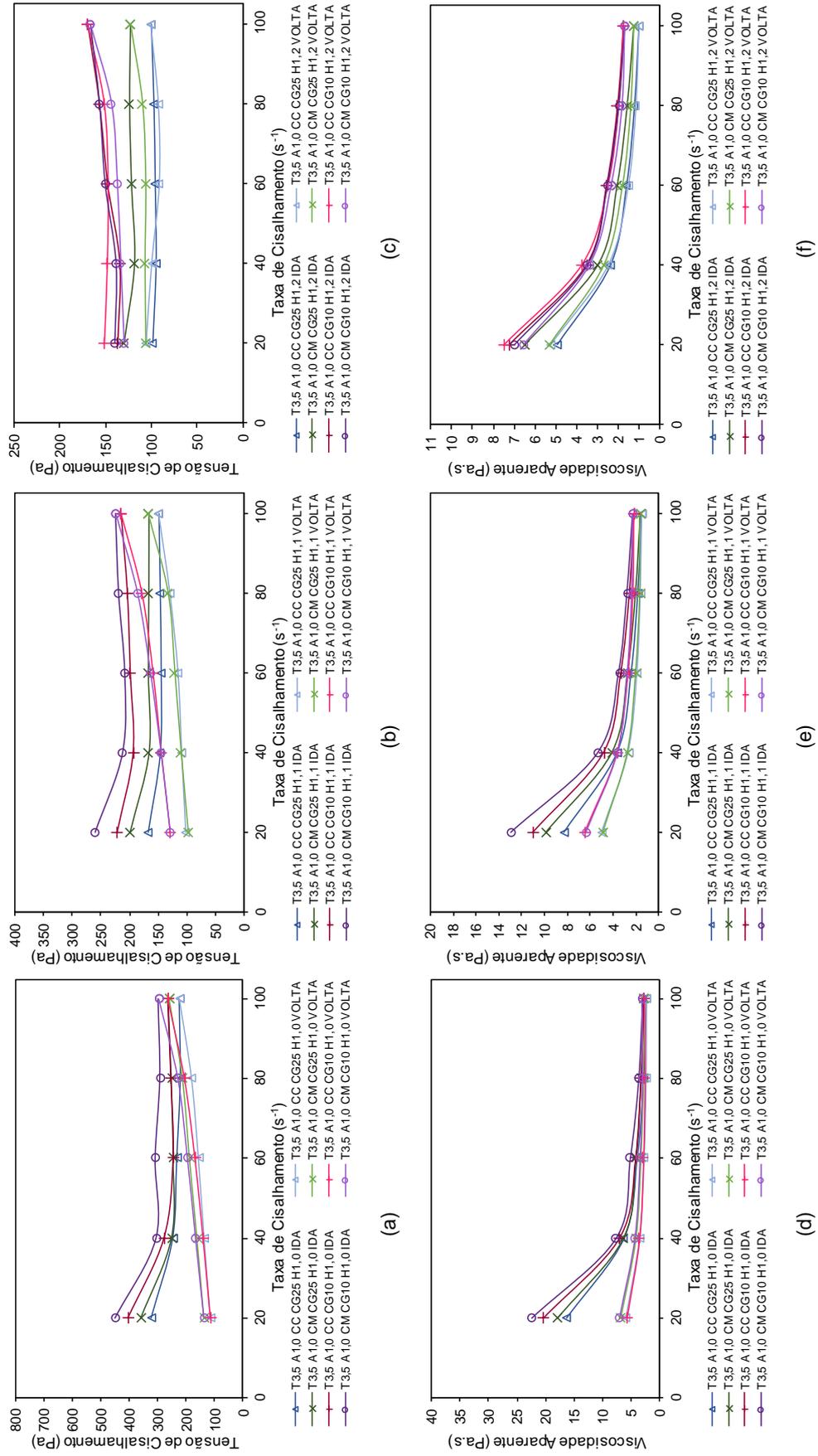
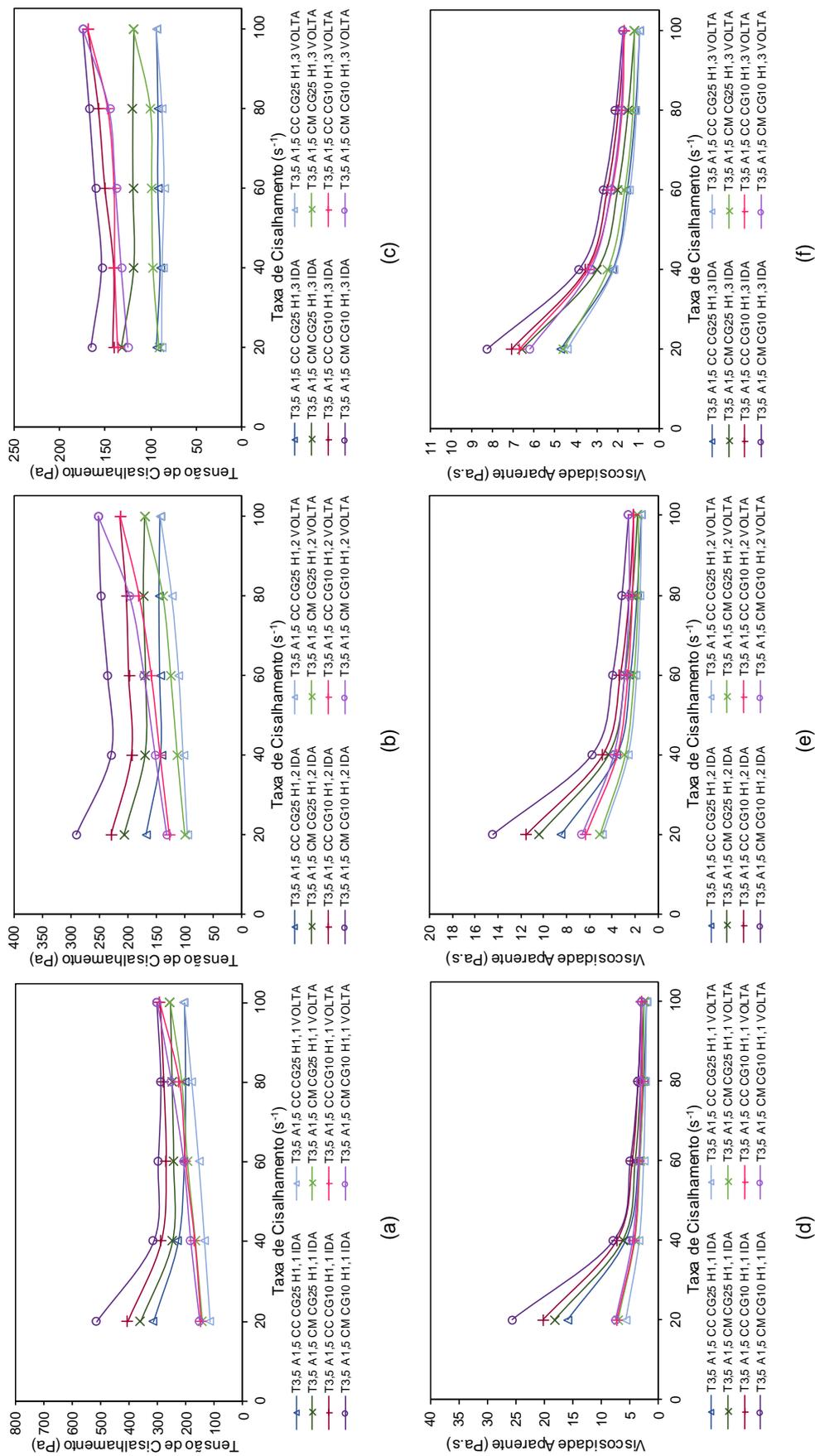


Figura 64 – Argamassas T3,5 A1,5: a), b) e c) curvas de tensão de cisalhamento; d), e) e f) curvas de viscosidade aparente com as relações água/aglomerante de 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente



APÊNDICE B – Análise estatística dos dados da tensão de cisalhamento

Tabela 54 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T2,5 A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T2,5 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	1341355,96	2	670677,98	1154,53	0,00%	S	
Tipo de Cal	1446,67	1	1446,67	2,49	12,76%	NS	
Composição Granulométrica	13545,04	1	13545,04	23,32	0,01%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	72,85	2	36,42	0,06	93,94%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	5247,86	2	2623,93	4,52	2,16%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	0,19	1	0,19	0,00	98,57%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	319,54	2	159,77	0,28	76,19%	NS	
Erro	13941,88	24	580,91				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 55 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T2,5 A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T2,5 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	1743108,76	2	871554,38	800,02	0,00%	S	
Tipo de Cal	20305,76	1	20305,76	18,64	0,02%	S	
Composição Granulométrica	68670,03	1	68670,03	63,03	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	10828,39	2	5414,19	4,97	1,56%	S	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	28203,53	2	14101,76	12,94	0,02%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	200,12	1	200,12	0,18	67,20%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	58,20	2	29,10	0,03	97,37%	NS	
Erro	26145,86	24	1089,41				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 56 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T2,5 A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T2,5 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	1268445,31	2	634222,65	382,41	0,00%	S	
Tipo de Cal	33040,55	1	33040,55	19,92	0,02%	S	
Composição Granulométrica	29230,87	1	29230,87	17,62	0,03%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	7038,99	2	3519,49	2,12	14,17%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	4421,60	2	2210,80	1,33	28,25%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	2623,01	1	2623,01	1,58	22,06%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	5833,67	2	2916,83	1,76	19,37%	NS	
Erro	39803,96	24	1658,50				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 57 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,0 A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,0 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	1115784,33	2	557892,16	609,26	0,00%	S	
Tipo de Cal	4306,40	1	4306,40	4,70	4,02%	S	
Composição Granulométrica	14116,51	1	14116,51	15,42	0,06%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	596,62	2	298,31	0,33	72,51%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	2509,78	2	1254,89	1,37	27,32%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	606,90	1	606,90	0,66	42,36%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	3292,32	2	1646,16	1,80	18,73%	NS	
Erro	21976,59	24	915,69				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 58 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,0 A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,0 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	350690,90	2	175345,45	572,15	0,00%	S	
Tipo de Cal	16676,49	1	16676,49	54,42	0,00%	S	
Composição Granulométrica	31380,49	1	31380,49	102,39	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	4285,45	2	2142,73	6,99	0,40%	S	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	13446,73	2	6723,36	21,94	0,00%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	147,34	1	147,34	0,48	49,47%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	91,01	2	45,51	0,15	86,28%	NS	
Erro	7355,24	24	306,47				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 59 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,0 A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,0 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	1610229,73	2	805114,86	652,02	0,00%	S	
Tipo de Cal	45097,60	1	45097,60	36,52	0,00%	S	
Composição Granulométrica	51239,53	1	51239,53	41,50	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	13529,13	2	6764,56	5,48	1,10%	S	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	4743,68	2	2371,84	1,92	16,83%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	6,53	1	6,53	0,01	94,27%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	428,43	2	214,22	0,17	84,18%	NS	
Erro	29635,14	24	1234,80				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 60 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,5 A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,5 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	193579,63	2	96789,82	1179,82	0,00%	S	
Tipo de Cal	4924,07	1	4924,07	60,02	0,00%	S	
Composição Granulométrica	12575,25	1	12575,25	153,29	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	536,05	2	268,02	3,27	5,56%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	4873,05	2	2436,52	29,70	0,00%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	79,38	1	79,38	0,97	33,51%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1763,89	2	881,94	10,75	0,05%	S	
Erro	1968,90	24	82,04				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 61 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,5 A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,5 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	417832,10	2	208916,05	509,18	0,00%	S	
Tipo de Cal	7898,95	1	7898,95	19,25	0,02%	S	
Composição Granulométrica	27989,06	1	27989,06	68,22	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	746,21	2	373,10	0,91	41,62%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	5737,46	2	2868,73	6,99	0,40%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	53,16	1	53,16	0,13	72,20%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	626,14	2	313,07	0,76	47,72%	NS	
Erro	9847,10	24	410,30				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 62 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (aceleração) – T3,5 A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (ACELERAÇÃO)				T3,5 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	428553,23	2	214276,62	707,61	0,00%	S	
Tipo de Cal	26395,40	1	26395,40	87,17	0,00%	S	
Composição Granulométrica	57245,04	1	57245,04	189,04	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	2595,25	2	1297,62	4,29	2,56%	S	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	8817,07	2	4408,54	14,56	0,01%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1657,00	1	1657,00	5,47	2,80%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1679,50	2	839,75	2,77	8,25%	NS	
Erro	7267,64	24	302,82				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 63 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T2,5 A0,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T2,5 A0,5		
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	457566,425	2	228783,21	767,16	0,00%	S	
Tipo de Cal	1456,123	1	1456,12	4,88	3,69%	S	
Composição Granulométrica	2643,899	1	2643,90	8,87	0,65%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	198,224	2	99,11	0,33	72,05%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	1213,699	2	606,85	2,03	15,26%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	750,506	1	750,51	2,52	12,57%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	609,829	2	304,91	1,02	37,49%	NS	
Erro	7157,270	24	298,22				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 64 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T2,5, A1,0

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T2,5 A1,0		
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	452921,54	2	226460,77	441,74	0,00%	S	
Tipo de Cal	4376,74	1	4376,74	8,54	0,75%	S	
Composição Granulométrica	4767,78	1	4767,78	9,30	0,55%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	43,02	2	21,51	0,04	95,90%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	5891,08	2	2945,54	5,75	0,91%	S	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	330,76	1	330,76	0,65	42,97%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	791,23	2	395,62	0,77	47,34%	NS	
Erro	12303,81	24	512,66				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 65 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T2,5, A1,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T2,5 A1,5		
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	376417,39	2	188208,69	708,26	0,00%	S	
Tipo de Cal	2057,39	1	2057,39	7,74	1,03%	S	
Composição Granulométrica	18892,47	1	18892,47	71,09	0,00%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	4510,06	2	2255,03	8,49	0,16%	S	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	572,49	2	286,25	1,08	35,65%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1814,39	1	1814,39	6,83	1,52%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	3922,65	2	1961,33	7,38	0,32%	S	
Erro	6377,65	24	265,74				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 66 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,0, A0,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,0 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	252426,16	2	126213,08	700,90	0,00%	S
Tipo de Cal	616,44	1	616,44	3,42	7,66%	NS
Composição Granulométrica	3591,87	1	3591,87	19,95	0,02%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	115,51	2	57,75	0,32	72,87%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	11089,64	2	5544,82	30,79	0,00%	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	82,21	1	82,21	0,46	50,57%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	27,06	2	13,53	0,08	92,78%	NS
Erro	4321,76	24	180,07			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 67 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,0, A1,0

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,0 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	126208,93	2	63104,47	364,70	0,00%	S
Tipo de Cal	1767,17	1	1767,17	10,21	0,39%	S
Composição Granulométrica	30364,21	1	30364,21	175,49	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	584,25	2	292,12	1,69	20,61%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	4695,73	2	2347,86	13,57	0,01%	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1758,12	1	1758,12	10,16	0,40%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	3337,34	2	1668,67	9,64	0,08%	S
Erro	4152,71	24	173,03			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 68 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,0, A1,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,0 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	216873,93	2	108436,96	302,34	0,00%	S
Tipo de Cal	2433,78	1	2433,78	6,79	1,55%	S
Composição Granulométrica	49235,15	1	49235,15	137,28	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	4564,13	2	2282,06	6,36	0,61%	S
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	2172,25	2	1086,13	3,03	6,72%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	159,24	1	159,24	0,44	51,16%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	202,37	2	101,19	0,28	75,66%	NS
Erro	8607,70	24	358,65			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 69 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,5, A0,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,5 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	70778,17	2	35389,08	220,45	0,00%	S
Tipo de Cal	1175,53	1	1175,53	7,32	1,23%	S
Composição Granulométrica	25765,98	1	25765,98	160,50	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	121,24	2	60,62	0,38	68,95%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	329,61	2	164,80	1,03	37,34%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	5,02	1	5,02	0,03	86,12%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	308,88	2	154,44	0,96	39,64%	NS
Erro	3852,83	24	160,53			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 70 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,5, A1,0

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,5 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	91932,65	2	45966,33	170,87	0,00%	S
Tipo de Cal	3459,51	1	3459,51	12,86	0,15%	S
Composição Granulométrica	24470,49	1	24470,49	90,97	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	1098,97	2	549,49	2,04	15,16%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	907,40	2	453,70	1,69	20,64%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	396,48	1	396,48	1,47	23,66%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	178,66	2	89,33	0,33	72,07%	NS
Erro	6456,23	24	269,01			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 71 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 100s⁻¹ – T3,5, A1,5

TABELA ANOVA	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 100s ⁻¹				T3,5 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante	90107,74	2	45053,87	262,88	0,00%	S
Tipo de Cal	6500,90	1	6500,90	37,93	0,00%	S
Composição Granulométrica	44672,46	1	44672,46	260,66	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	361,77	2	180,89	1,06	36,36%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	141,86	2	70,93	0,41	66,57%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	523,16	1	523,16	3,05	9,34%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	957,82	2	478,91	2,79	8,11%	NS
Erro	4113,22	24	171,38			
Subtotal		35				
Média Global		1				
Total		36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 72 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T2,5, A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T2,5 A0,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	183135,75	2	91567,88	305,65	0,00%	S	
Tipo de Cal	691,71	1	691,71	2,31	14,23%	NS	
Composição Granulométrica	1002,21	1	1002,21	3,35	8,04%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	361,45	2	180,72	0,60	55,55%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	619,82	2	309,91	1,03	37,14%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	24,81	1	24,81	0,08	77,61%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	556,45	2	278,23	0,93	40,94%	NS	
Erro	6890,44	23	299,58				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 73 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T2,5, A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T2,5 A1,0	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	169328,04	2	84664,02	21,80	0,00%	S	
Tipo de Cal	752,56	1	752,56	0,19	66,45%	NS	
Composição Granulométrica	6645,22	1	6645,22	1,71	20,57%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	847,90	2	423,95	0,11	89,71%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	2028,05	2	1014,03	0,26	77,28%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	35,54	1	35,54	0,01	92,47%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	1258,74	2	629,37	0,16	85,15%	NS	
Erro	77663,98	20	3883,20				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 74 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T2,5, A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T2,5 A1,5	
Fonte de Variação	SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*	
Relação Água/Aglomerante	159402,71	2	79701,36	107,70	0,00%	S	
Tipo de Cal	3528,45	1	3528,45	4,77	3,99%	S	
Composição Granulométrica	12571,12	1	12571,12	16,99	0,04%	S	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal	849,69	2	424,84	0,57	57,14%	NS	
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica	943,37	2	471,69	0,64	53,82%	NS	
Tipo de Cal*Composição Granulométrica	26,33	1	26,33	0,04	85,21%	NS	
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica	359,45	2	179,73	0,24	78,65%	NS	
Erro	16280,60	22	740,03				
Subtotal		35					
Média Global		1					
Total		36					

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 75 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,0, A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,0 A0,5	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		69414,40	2	34707,20	93,45	0,00%	S
Tipo de Cal		361,29	1	361,29	0,97	33,43%	NS
Composição Granulométrica		288,17	1	288,17	0,78	38,75%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		594,51	2	297,25	0,80	46,13%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		5094,77	2	2547,39	6,86	0,46%	S
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		150,33	1	150,33	0,40	53,09%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		190,23	2	95,11	0,26	77,62%	NS
Erro		8542,19	23	371,40			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 76 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,0, A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,0 A1,0	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		6006,34	2	3003,17	10,11	0,07%	S
Tipo de Cal		0,01	1	0,01	0,00	99,49%	NS
Composição Granulométrica		8074,91	1	8074,91	27,19	0,00%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		561,36	2	280,68	0,95	40,32%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		469,79	2	234,89	0,79	46,54%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		412,39	1	412,39	1,39	25,07%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		849,95	2	424,98	1,43	25,96%	NS
Erro		6830,59	23	296,98			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 77 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,0, A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,0 A1,5	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		74742,27	2	37371,13	137,01	0,00%	S
Tipo de Cal		4266,09	1	4266,09	15,64	0,06%	S
Composição Granulométrica		2731,02	1	2731,02	10,01	0,42%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		965,44	2	482,72	1,77	19,19%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		532,70	2	266,35	0,98	39,11%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		8,55	1	8,55	0,03	86,10%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		626,34	2	313,17	1,15	33,40%	NS
Erro		6546,16	24	272,76			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 78 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,5, A0,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,5 A0,5	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		3456,57	2	1728,28	0,84	44,47%	NS
Tipo de Cal		113,85	1	113,85	0,06	81,60%	NS
Composição Granulométrica		7622,55	1	7622,55	3,72	6,75%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		34,46	2	17,23	0,01	99,16%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		1147,12	2	573,56	0,28	75,89%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		70,76	1	70,76	0,03	85,45%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		276,36	2	138,18	0,07	93,51%	NS
Erro		43082,60	21	2051,55			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 79 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,5, A1,0

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,5 A1,0	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		1396,26	2	698,13	0,36	70,12%	NS
Tipo de Cal		36,31	1	36,31	0,02	89,23%	NS
Composição Granulométrica		4574,86	1	4574,86	2,37	13,90%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		2225,96	2	1112,98	0,58	57,10%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		2116,01	2	1058,01	0,55	58,66%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		197,67	1	197,67	0,10	75,23%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		383,10	2	191,55	0,10	90,61%	NS
Erro		40608,96	21	1933,76			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

Tabela 80 – ANOVA da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ (desaceleração) – T3,5, A1,5

TABELA ANOVA		TENSÃO DE CISALHAMENTO NA TAXA DE 20s ⁻¹ (DESACELERAÇÃO)				T3,5 A1,5	
Fonte de Variação		SQ	NGL	MQ	Teste F	Prob.	Sig*
Relação Água/Aglomerante		5416,32	2	2708,16	2,21	13,40%	NS
Tipo de Cal		157,30	1	157,30	0,13	72,38%	NS
Composição Granulométrica		8769,95	1	8769,95	7,14	1,39%	S
Água/Aglomerante*Tipo de Cal		811,89	2	405,94	0,33	72,20%	NS
Água/Aglomerante*Composição Granulométrica		772,44	2	386,22	0,31	73,33%	NS
Tipo de Cal*Composição Granulométrica		360,04	1	360,04	0,29	59,36%	NS
Água/Aglomerante*Tipo de Cal*Composição Granulométrica		290,74	2	145,37	0,12	88,89%	NS
Erro		27012,82	22	1227,86			
Subtotal			35				
Média Global			1				
Total			36				

* Prob. < 5% - efeito é significativo

APÊNDICE C – Comparação de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de $20s^{-1}$ na aceleração

Figura 65 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:2,5



Figura 66 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de 20s-1 na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:3,0



Figura 67 – Comparativo de médias pelo teste de Duncan da tensão de cisalhamento na taxa de 20s⁻¹ na aceleração das argamassas com relação aglomerante:agregado de 1:3,5

