

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FÁBIO LUIZ NAVARRO BERGOSSI
RENAN KIAPUCHINSKI BORGES

**IMPACTO DO TEOR DE ÁGUA E DE FINO CALCÁRIO NO
DESEMPENHO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS**

CURITIBA
2017

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FÁBIO LUIZ NAVARRO BERGOSSI
RENAN KIAPUCHINSKI BORGES

IMPACTO DO TEOR DE ÁGUA E DE FINO CALCÁRIO NO DESEMPENHO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

CURITIBA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

**IMPACTO DO TEOR DE ÁGUA E DE FINO CALCÁRIO NO
DESEMPENHO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Por

FÁBIO LUIZ NAVARRO BERGOSSI

RENAN KIAPUCHINSKI BORGES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de junho de 2017, pela seguinte banca de avaliação:

Profa. Orientadora – Eliane Betânia Carvalho Costa, Dra.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof. Arthur Medeiros, Dr.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Após alguns anos da jornada que se iniciou no ano de 2011, chegamos ao fim de mais uma etapa de nossas vidas. Nesse instante, ao olhar para o passado e relembrar cada momento vivenciado, cada obstáculo superado nessa caminhada, somos tomados pelos sentimentos de orgulho e gratidão.

Aos nossos pais, pela vida, pelo amor incondicional e todo o apoio que nos deram desde o início. Sem nenhuma dúvida, sem vocês nada disso seria possível, nem ao menos escolher um caminho para percorrer, um sonho para sonhar. Aos nossos amigos, por todos os momentos de alegria, motivação e até mesmo consolação. Sabemos que pelo fato de termos vocês, muitas das adversidades e dificuldades encontradas se tornaram mais amenas e superáveis. Aos nossos professores, pela sabedoria, paciência e comprometimento. Vocês moldaram simples alunos vindos do ensino médio para que, agora, se tornassem engenheiros civis. Em particular, à nossa orientadora Eliane, pela disponibilidade, proatividade e auxílio em tudo que foi necessário. Agradecemos muito por estar tão presente no desenvolvimento dessa pesquisa, nos esclarecendo as dúvidas nos momentos de incerteza e nos mostrando o foco a ser seguido nos momentos mais necessários. A todos vocês, nosso muitíssimo obrigado. Com certeza, esse trabalho é decorrente do apoio que cada um, da sua maneira, nos transmitiu.

A Deus, criador de todas as coisas, obrigado por cada dia que nos deu forças para encarar e conduzir nossa jornada.

Por último, e não menos importante, nossa gratidão um ao outro, pela compreensão e suporte inestimáveis durante o desenvolvimento desse projeto. Embarcamos juntos nessa caminhada e juntos nos fortalecemos para seguir com êxito até o final.

RESUMO

BERGOSSI, F. L. N.; BORGES, R. K. **Impacto do teor de água e de fino calcário no desempenho de matrizes cimentícias.** 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

O presente trabalho tem o objetivo de analisar o impacto do uso de diferentes teores de água e da substituição parcial de 30% do cimento por carbonato de cálcio no desempenho de matrizes cimentícias. A intenção pela substituição parcial do cimento por outro composto deve-se à possibilidade de apresentação de uma alternativa que atenda aos requisitos exigidos pela legislação e ao mesmo tempo minimize a dependência do cimento, visto que sua produção gera grandes emissões de dióxido de carbono na atmosfera. O calcário é um material não reativo que, por possuir distribuição granulométrica menor que a do cimento, apresenta efeito positivo no preenchimento de vazios. Nos estudos dos efeitos da substituição de 30% do cimento por carbonato de cálcio, avaliaram-se os teores de água de 13, 15 e 17% em relação a massa de sólidos (ligante cimentício, calcário e agregado). A aglomeração de partículas causada pela inserção de um material de menor granulometria foi minimizada com a utilização de aditivo dispersante e, para isso, foi determinado o teor ótimo de aditivo a ser utilizado para cada concentração de água. As argamassas foram analisadas no estado fresco pelos ensaios de densidade de massa, teor de ar incorporado, índice de consistência e *squeeze-flow*. Este último realizado em superfície não absorvente e em superfície cerâmica, ambos após 5 minutos de contato com as devidas superfícies. No estado endurecido, foram realizados ensaios de porosidade, resistência à compressão uniaxial e resistência de aderência à tração. Os ensaios de compressão e aderência à tração foram realizados na idade de 14 dias após a moldagem dos corpos de prova. Os resultados obtidos evidenciam que as matrizes com presença de fino calcário possuem maior trabalhabilidade, por apresentarem maiores índices de consistência e espalhamentos nos ensaios de *squeeze-flow*. Além disso, a substituição parcial do cimento tem efeito mais impactante na compressão, com redução de 29,9% a 37,8% em suas resistências. Quanto à tração, houve um leve incremento na aderência para o teor com 17% de água (0,01 MPa), sendo que os demais teores não apresentaram as resistências mínimas requeridas por norma. Dessa forma, a utilização de carbonato de cálcio na confecção de matrizes cimentícias pode ser vantajosa, desde que se verifique o desempenho mecânico requerido para a utilização desejada da argamassa.

Palavras-chave: teor de água; fino calcário; trabalhabilidade; desempenho mecânico; matrizes cimentícias.

ABSTRACT

BERGOSSI, F. L. N.; BORGES, R. K. **Impact of water content and limestone fine on the performance of cementitious matrices.** 2017. 57 f. Final course assignment – Federal University of Technology - Paraná, Curitiba, 2017.

The main purpose of this research is to analyse the impact of the use of different water contents and the partial replacement of 30% of cement by calcium carbonate in the performance of cementitious matrices. The reason behind a partial substitution of cement by another compound is due to the possibility of presenting an alternative that meets the legislation requirements and, at the same time, minimizes the dependence on cement, since its production generates large emissions of carbon dioxide in the atmosphere. Limestone is a non-reactive material that has a positive effect on filling voids, because it has a smaller particle size distribution when compared with cement. In order to investigate the effects when 30% of the cement is replaced by calcium carbonate, different water contents of 13, 15 and 17% in relation to the mass of solids (cementitious binder, limestone and aggregate) were determined. The agglomeration of particles caused by the insertion of a material with smaller particle size was minimized with the use of dispersant additive, which was determined by its optimum quantity accordingly each water content given. The mortars were analysed in the fresh state by the tests of mass density, incorporated air content, consistency index and squeeze-flow. The latter was done on a non-absorbent surface and on a ceramic surface, both after 5 minutes of contact with their respective surfaces. In the hardened state, porosity, compression strength and tensile adhesion strength tests were performed. The compression and tensile adhesion tests were conducted at the age of 14 days after molding the specimens. The results show that the matrixes with the presence of fine limestone have a higher workability because they have presented higher consistency indices and spreads in the squeeze-flow tests. In addition, the partial replacement of cement has shown a more impactful effect on compression, with a reduction of 29.9% to 37.8% in its strengths. Regarding the tensile strength, there was a slight increase in the adhesion to the mixture with 17% of water (0.01 MPa), while for the other water contents, the minimum resistance required by standard were not achieved. Hence, the use of calcium carbonate in the manufacture of cementitious matrices can be advantageous, provided that the mechanical performance required for the desired use of the mortar is verified.

Keywords: water content; limestone fine; workability; mechanical performance; cementitious matrices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão da demanda de água numa matriz cimentícia: água de superfície e água de preenchimento	18
Figura 2 - Matrizes cimentícias (a) aglomerada e (b) dispersa.....	20
Figura 3 - Estabilização do teor de aditivo utilizando pasta com teor de água de 17%	23
Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a porosidade da pasta de cimento para várias condições de pressão e alta temperatura	25
Figura 5 - Comparativo de sistemas cimentícios constituídos por cimento (C) e calcário (F) com granulometrias distintas: (a) calcário com granulometria similar ao cimento e (b) com a incorporação de calcário com granulometria inferior ao cimento	26
Figura 6 - Influência da relação água/cimento e grau de hidratação na porosidade da pasta de cimento.....	27
Figura 7 - Resistência de aderência à tração (MPa) x Teor de substituição do cimento das argamassas	31
Figura 8 - Distribuição granulométrica do cimento e do calcário utilizados	33
Figura 9 - Distribuição discreta granulométrica da areia utilizada	34
Figura 10 - Absorção de água em função da raiz quadrada do tempo para o bloco cerâmico estudado.....	35
Figura 11 - Ensaio de mini abatimento realizado em pastas de mesma composição, porém com teores de aditivos diferentes: (a) pasta com espalhamento próximo a 160mm (0,05% de aditivo); (b) pasta com espalhamento próximo a 200mm, já perdendo forma (0,10% de aditivo); (c) pasta com espalhamento desuniforme maior que 200mm (0,15% de aditivo)	38
Figura 12 - Ensaio de <i>squeeze-flow</i> sendo realizados: (a) no bloco cerâmico; (b) em superfície lisa	40
Figura 13 - (a) Parte das amostras aderidas ao substrato cerâmico; (b) detalhe do encaixe entre dinamômetro de tração acoplado à pastilha; (c) ensaio de aderência á tração sendo executado	41
Figura 14 - Curvas obtidas no ensaio de mini-abatimento pelo tronco de cone para as argamassas a) sem calcário e b) com calcário para os diferentes teores de água	42
Figura 15 - Curvas de espalhamento das argamassas com e sem calcário nas diferentes superfícies estudadas	44
Figura 16 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios	47

Figura 17 - Pequena parte do bloco arrancado em ensaios de aderência49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas da areia, cimento e calcário utilizados na produção das argamassas.....	33
Tabela 2 - Diâmetros equivalentes (μm)	34
Tabela 3 - Composição das matrizes cimentícias estudadas: teor de água e de aditivo dispersante e traços unitários em massa.	36
Tabela 4 - Teores ótimos de aditivo das argamassas	43
Tabela 5 - Caracterização das argamassas no estado fresco.....	43
Tabela 6 - Quantidade de água absorvida pelo bloco cerâmico após um e cinco minutos de contato com a água.	45
Tabela 7 - Teor ótimo de aditivo encontrado pela raiz de menor valor de cada equação	46
Tabela 8 - Resistência de aderência à tração aos 14 dias e capacidade de espalhamento máximo medido pelo ensaio de <i>squeeze-flow</i> das argamassas estudadas.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO.....	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 INFLUÊNCIA DOS FINOS NO DESEMPENHO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	14
3.2 TRABALHABILIDADE.....	15
3.2.1 Demanda de água	17
3.2.2 Formação de aglomerados	19
3.2.3 Aditivos redutores de água	21
3.3 RETRAÇÃO PLÁSTICA.....	24
3.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MATRIZ CIMENTÍCIA	25
3.5 INTERFACE SUBSTRATO-MATRIZ CIMENTÍCIA.....	28
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	32
4.1.1 Particulados	32
4.1.2 Substrato	35
4.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	36
4.2.1 Definição do teor ótimo de aditivo dispersante	36
4.2.2 Mistura das argamassas.....	38
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	38
4.4 CAPACIDADE DE ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA SOBRE SUBSTRATO.....	39
4.5 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1 DEFINIÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE ADITIVO	42
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	43
5.2.1 Capacidade de espalhamento da argamassa – <i>Squeeze-flow</i>	44
5.3 DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS.....	46
5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DA INTERFACE ARGAMASSA- SUBSTRATO	47
6 CONCLUSÕES.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

A construção civil vem alcançando conquistas significativas no que se refere a construções sustentáveis. Esse avanço só tem sido possível devido à constante melhora de técnicas e de recursos. Um dos materiais que tem contribuído para se atingir tal façanha é o cimento e suas composições.

Largamente utilizado nos dias de hoje, com produção de aproximadamente 65 milhões de toneladas no ano de 2015 em todo o Brasil (SNIC, 2015), o cimento é o fator chave no ganho de resistência de matrizes cimentícias. Para obtenção de um desempenho ainda maior, tem sido empregado adições minerais e aditivos químicos na confecção dessas matrizes. Tais materiais proporcionam variações desde a plasticidade da mistura até a resistência mecânica final.

Além da melhoria das propriedades das matrizes cimentícias, a substituição parcial ou complementação de cimento por adições minerais também é responsável por aspectos econômicos e ambientais positivos, ressaltando assim, sua importância no desenvolvimento de novas matrizes. Uma menor concentração de cimento, além de reduzir a quantidade de dióxido de carbono gerado durante a sua produção, se for substituído por subprodutos industriais ou matérias-primas mais baratas, apresenta vantagens econômicas visto que diminui o custo das matrizes e as áreas reservadas para descarte desses resíduos industriais (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001).

As adições minerais divergem do cimento Portland nos seguintes aspectos, os quais são: possuem maior área superficial, pois apresentam partículas com menores diâmetros; e, podem apresentar, ou não, atividade pozolânica (ZHANG *et al.*, 1996). Contudo, não há uma constante para a porcentagem ótima de substituição de cimento por adições minerais sem que esse percentual dependa fortemente do teor de água presente na mistura (BHANJA; SENGUPTA, 2003).

Nas matrizes cimentícias, a água é adicionada para obtenção de trabalhabilidade e desenvolvimento da hidratação do cimento, conferindo-lhe a capacidade ligante, e para a obtenção de trabalhabilidade. Ao adicionar materiais de granulometria fina a uma dada matriz cimentícia, há um aumento da superfície de contato das partículas presentes na mistura que, por sua vez, tendem a se aglomerar em razão das forças de atração, carecendo de uma maior demanda de água para

eliminar estes aglomerados e obter uma trabalhabilidade adequada (AÏTCIN; JOLICOEUR; MCGREGOR, 1994).

Para reduzir o teor de água das misturas cimentícias tem se utilizado aditivos dispersantes ou superplastificantes. Esses aditivos garantem maior plasticidade à mistura sem que haja necessidade do aumento de água. Sendo, portanto, essencial na produção de matrizes cimentícias com elevado teor de partículas finas.

A quantidade de água na mistura é crucial para a resistência final e durabilidade das matrizes cimentícias, pois com o acréscimo da relação água/cimento, o sistema perde resistência numa determinada idade devido ao aumento da porosidade, tal como demonstrado pela Lei de Abrams (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Do ponto de vista do desenvolvimento da aderência entre a matriz cimentícia e um dado substrato, a quantidade de água da matriz é fundamental, pois deve garantir o espalhamento da matriz sobre a superfície do substrato. Se o teor de água for inferior, a matriz não irá espalhar adequadamente sobre o substrato minimizando a área de contato e, conseqüentemente a aderência. No caso do teor elevado, poderá haver segregação e a formação de uma película de água na superfície (efeito parede), o que tende a aumentar a relação água/cimento na interface. Esse aumento da relação água/cimento irá reduzir a resistência dessa região. A quantidade de água ideal para promover o espalhamento da matriz e garantir uma aderência adequada também irá depender da absorção do substrato e das interações com o meio ambiente (COSTA, 2014).

Algumas pesquisas têm mostrado que o uso de fino calcário em substituição ao cimento, num teor de 30%, na produção de argamassas tem sido satisfatório para a obtenção de resistência de aderência quando aplicadas em substratos graníticos (BERTON; MAGRI, 2016) e cerâmicos hidrofugados (COSTA, 2014). Por ser mais fino que o cimento, os finos calcários densificam a interface melhorando a aderência. Apesar dos resultados promissores, ainda não há uma comprovação da influência do teor de água e de fino calcário quando utilizado um substrato absorvente, tendo em vista que nos trabalhos supracitados, o teor de água foi mantido constante. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do teor de água e de fino calcário, num teor de 30%, no desempenho de matrizes cimentícias.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto do teor de água e de fino calcário no desempenho de matrizes cimentícias.

São objetivos específicos:

- determinar o teor ótimo de aditivo dispersante por meio do ensaio de mini abatimento pelo tronco de cone para as matrizes cimentícias estudadas;
- avaliar a partir de ensaios de *squeeze-flow* a influência do teor de água na capacidade de espalhamento da argamassa em função do tipo de substrato;
- analisar a influência do teor de água na porosidade e na resistência à compressão das matrizes cimentícias com e sem o uso de fino calcário;
- verificar o efeito do teor de água na resistência de aderência das matrizes cimentícias quando aplicadas sobre o bloco cerâmico.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 INFLUÊNCIA DOS FINOS NO DESEMPENHO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

Os materiais cimentícios, tais como argamassas e concretos, são compósitos particulados constituídos por duas fases: uma é denominada matriz ou pasta e a outra os agregados (fase dispersa) (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). A matriz ou pasta tem a finalidade de envolver os agregados, sendo constituída principalmente por um ou mais aglomerantes, tal como cimento, cal ou gesso, juntamente com a água, podendo-lhe ser incorporada adições minerais e aditivos químicos. No caso dos sistemas de revestimento, a argamassa (fase matriz) tem como função recobrir toda a superfície do substrato (fase dispersa) garantindo a aderência entre as fases.

Nos últimos anos, a inserção de materiais alternativos em substituição ao cimento vem ganhando atenção. Especialmente, os materiais com granulometria inferior aos grãos de cimento, cerca de 10 μm (VOIGT, 2010). Quando adicionados na matriz, esses finos podem proporcionar uma densificação do sistema na medida em que preenchem vazios que antes não eram preenchidos. Segundo Oliveira *et al.* (2000), esse preenchimento está relacionado com a proporção e o tamanho ideal das partículas do material, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim sucessivamente.

Dentre as principais partículas finas utilizadas nas matrizes cimentícias, pode-se citar: os materiais pozolânicos como a cinza volante, a cinza de casca de arroz, a escória de alto forno, a sílica ativa e os denominados inertes, como o fíler calcário e o fíler quartzoso. Além do efeito fíler, os materiais pozolânicos podem contribuir com a melhoria das propriedades de argamassas e concretos devido à reação pozolânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O carbonato de cálcio (CaCO_3), também denominado fíler calcário, tem sido incorporado na produção de argamassas e concretos, com a finalidade de melhorar o empacotamento das misturas, devido ao efeito fíler ou de preenchimento. Trata-se de um material constituído principalmente de carbonato de cálcio, podendo conter traços de dolomita, praticamente inerte quimicamente, pois pouco reage com a água

ou com componentes advindos da hidratação do cimento. Portanto, equivale dizer que não possui atividade pozolânica, por produzir praticamente efeitos físicos na mistura, como o preenchimento dos vazios e, conseqüente, diminuição dos poros. Além disso, por apresentar uma área superficial elevada, atuam como pontos de nucleação da matriz modificando o processo de hidratação do cimento. Isso proporciona o aumento da quantidade de produtos hidratados do cimento nas idades iniciais, ocasionando uma resistência maior nessas primeiras idades. Contudo, nos finos inertes, esse efeito concorre com o de diluição, pois há uma diminuição da quantidade de cimento e um aumento da quantidade de finos, o que tende a reduzir a resistência mecânica (MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003; NEVILLE; BROOKS, 2013).

A incorporação de finos em matrizes cimentícias são responsáveis por algumas melhorias nas propriedades gerais da matriz, tal como a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade, proporcionadas conforme características particulares de cada material (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001; MORAES, 2001; ALBUQUERQUE; LIMA, 2014). Nos compósitos, além da melhoria das propriedades da matriz, os finos contribuem para a densificação da interface melhorando a aderência entre a superfície do substrato e a pasta e/ou argamassa (SOUSA; BAUER 2002).

Um exemplo de aplicação de tais materiais para melhorar as propriedades de compósitos cimentícios consiste no desenvolvimento de concretos de alto desempenho (CAD), o qual possui grande resistência à compressão e significativo incremento em sua durabilidade quando comparado ao concreto convencional. Em termos de resistência à compressão, o CAD chega a alcançar 125 MPa, propiciando construções de maiores portes (SILVA, 2006).

A seguir, são abordados alguns aspectos sobre a inserção de partículas finas em matrizes cimentícias no que se refere as propriedades no estado fresco e endurecido.

3.2 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade é comumente utilizada para se referir ao comportamento físico de concretos ou argamassas ainda no estado fresco, antes que se inicie a pega

e o endurecimento. Iwasaki (1983) listou as principais definições para trabalhabilidade conforme o seguinte:

- *American Concrete Institute*: propriedade do concreto ou argamassa, no estado fresco, que determina a facilidade e a homogeneidade com as quais o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado.
- *British Standards Institution*: propriedade do concreto, argamassa ou semelhante, no estado fresco, que determina a facilidade com a qual o material pode ser manipulado ou completamente adensado.
- *Association of Concrete Engineers* (Japão): propriedade do concreto ou argamassa, no estado fresco, que determina a facilidade com a qual o material pode ser misturado, lançado e adensado devido à sua consistência.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a trabalhabilidade é uma propriedade resultante de duas características principais, a saber: a consistência que descreve a facilidade de escoamento do material e a coesão que prevê a resistência à exsudação e à segregação.

Vários tipos de métodos são usados para medir esta trabalhabilidade e, dependendo do método, diferentes propriedades são usadas para descrevê-la, tais como consistência - determinada por ensaios de abatimento pelo tronco de cone (*slump test*) e pelo índice de espalhamento - tensão de escoamento, viscosidade plástica, tempo de escoamento, entre outros (FENNIS, 2011).

Diversos fatores afetam a trabalhabilidade das matrizes cimentícias, como o tipo e a granulometria das partículas, a razão entre agregado/cimento, o consumo de cimento e de água, a presença de adições minerais e de aditivos químicos.

A forma das partículas também influencia a trabalhabilidade das matrizes cimentícias. Considerando constante as demais características e materiais, quanto mais esféricas forem as partículas menor quantidade de água será necessária para revesti-las e proporcionar a fluidez/trabalhabilidade do sistema (CASTRO, 2007). Isso ocorre devido ao efeito de rolamento, o qual destaca a facilidade de movimento relativos das partículas esféricas uma em relação as outras quando comparado às partículas irregulares.

Para Selmo (1989) a inclusão de partículas com diâmetro inferior a 75 μm melhora a coesão interna da mistura, pois as partículas finas apresentam maior tensão superficial. Concomitantemente, a exsudação é diminuída, uma vez que a fixação de água pelas partículas é facilitada pela maior superfície de contato entre partículas e água (MORAES, 2001).

Contudo, a principal causa de alteração da trabalhabilidade é a quantidade de água, pois sua simples adição proporciona uma lubrificação interpartículas (NEVILLE; BROOKS, 2013). Habitualmente, tem-se o emprego instintivo de água como agente solucionador dos problemas de má trabalhabilidade.

Segundo Fennis (2011), há duas teorias gerais para prever a trabalhabilidade de uma mistura: a teoria da camada de água e a teoria de empacotamento. A primeira assume que a demanda de água de uma mistura depende da área superficial das partículas presentes na mesma. Ou seja, aumentando a área de superfície pela adição de finos haverá a necessidade de aumentar a quantidade de água. A segunda teoria supõe que a adição de partículas finas ajuda a preencher os espaços vazios na estrutura de partículas, deixando apenas um espaço mínimo para a água. Desta forma, a adição de partículas finas irá reduzir a necessidade de água.

3.2.1 Demanda de água

A água é um elemento fundamental para a confecção das matrizes cimentícias. Primeiro, porque atua quimicamente no desenvolvimento das reações de hidratação do cimento. A formação de cristais de etringita corresponde ao mecanismo inicial de hidratação do cimento, iniciado após o contato dos aluminatos com a água. Esses cristais de etringita são produzidos em questão de horas; seguido da formação de hidróxido de cálcio (placas hexagonais) e, posteriormente, do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Os produtos hidratados preenchem os espaços antes ocupados pela água e partículas de cimento, contribuindo com a densificação da matriz e, conseqüentemente, com a resistência mecânica (MORAES, 2001).

Segundo porque a água é um componente crucial para obtenção de uma trabalhabilidade adequada das matrizes cimentícias. Tal como mencionado

anteriormente, um dos fatores que afetam a demanda de água nas matrizes cimentícias é a adição de partículas finas ao sistema.

De acordo com Castro e Pandolfelli (2009), numa matriz cimentícia a demanda de água pode ser dividida em duas partes: água de preenchimento dos vazios entre as partículas e a água de superfície, responsável por formar uma camada de água na superfície das partículas (Figura 1). A demanda de água de preenchimento é determinada pela densidade de empacotamento da mistura (fração de sólidos), enquanto que a água de superfície depende da área específica do conjunto.

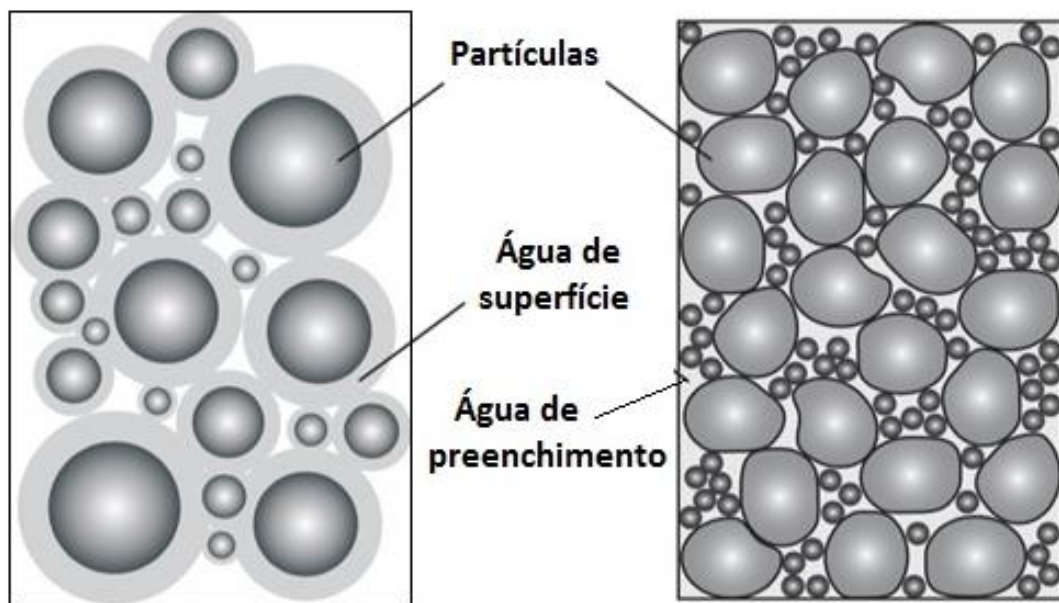


Figura 1 - Divisão da demanda de água numa matriz cimentícia: água de superfície e água de preenchimento
Fonte: Fennis (2011).

A matriz cimentícia apresentará boa fluidez, somente quando o teor de água for suficiente para exceder a porosidade e recobrir a superfície das partículas provocando uma separação interparticular de no mínimo 50 nm (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Num primeiro momento, supõe-se que ao aumentar a quantidade de partículas finas numa matriz cimentícia, há a necessidade do aumento da demanda de água justamente porque houve um incremento da área superficial total das partículas. Dessa forma, é importante observar algumas relações entre água e tamanho da partícula. Por exemplo, se for feita a adição de partículas com área superficial não elevada, praticamente não há alteração da quantidade total de água, visto que a água de preenchimento diminui e a de superfície aumenta. Em contrapartida, se a área

específica das partículas for considerável, há um acréscimo significativo da água de superfície (como suposto anteriormente) mesmo com a quantidade de água de preenchimento sendo reduzida, o que aumenta a demanda total de água (ZHANG *et al.*, 1996 *apud* CASTRO, 2007; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Ferraris, Obla e Hill (2001) argumentam que para uma mesma relação água/cimento, há uma redução da trabalhabilidade de matrizes com uso de partículas finas, tais como a cinza volante, o metacaulim e a sílica ativa, em comparação com uma mistura sem finos. Em outras palavras, é mais difícil alcançar uma boa trabalhabilidade usando partículas finas sem que haja um aumento da quantidade de água de amassamento.

O aumento da trabalhabilidade com o acréscimo de finos irá depender do tipo, da quantidade e da granulometria da adição mineral utilizada. Em alguns casos, é relatado na literatura que algumas adições minerais podem aumentar a trabalhabilidade (LANGE; MOERTEL; RUDERT, 1997) como por exemplo, as cinzas volantes ou a sílica ativa. Tais adições possuem partículas esféricas que rolam facilmente umas sobre as outras, diminuindo o atrito interparticular durante a mistura e, conseqüentemente, aumentando a trabalhabilidade (RAMACHANDRAN, 1995).

De acordo com Bonavetti *et al.* (1999), o carbonato de cálcio contribui para o empacotamento da matriz cimentícia, complementando a fração fina da distribuição granulométrica do cimento, sem necessidade de incremento na demanda de água. No entanto, para esta afirmação é preciso levar em conta a quantidade e a granulometria de carbonato de cálcio adicionado ao sistema.

3.2.2 Formação de aglomerados

Os grãos de cimento, quando em contato com a água, apresentam grande tendência à aglomeração (floculação) em decorrência das seguintes interações: forças de Van der Waals entre as partículas, forte ligação entre moléculas de água ou de produtos hidratados e forças eletrostáticas. Uma estrutura aglomerada tende a aprisionar determinada quantidade de água de amassamento dentro dos aglomerados, resultando numa rede aberta de canais entre as partículas. A partir do momento que certa quantidade de água fica aprisionada nessa rede de vazios, essa

não estará disponível para hidratar os grãos de cimento e fluidificar a pasta (AÏTCIN; JOLICOEUR; MACGREGOR, 1994).

A aglomeração das partículas pode interferir diretamente no empacotamento e na reologia das matrizes cimentícias, pois são formados aglomerados. Esses aglomerados são unidades móveis de tamanhos efetivos maiores constituídos de várias partículas (Figura 2a). Conforme Castro (2007), normalmente, os aglomerados são porosos, demandam maiores quantidades de água e proporcionam maior instabilidade aos sistemas. A redução da distância de separação entre as partículas originada pela retenção de água no interior desses aglomerados, aumentam a quantidade de colisões entre elas e, conseqüentemente, a viscosidade da mistura. Ocasionalmente, então, matrizes com maior ocorrência de defeitos e com microestruturas desuniformes, fatores que alteram negativamente as propriedades mecânicas.

De acordo com Castro e Pandolfelli (2009) para obtenção de mistura dispersa, com uma relação água/cimento e uma viscosidade satisfatórias, a qual permita a utilização de grandes teores de sólidos (finos), as forças de repulsão entre as partículas devem exceder as forças de atração. As partículas devem estar devidamente desfloculadas e em alto estado de dispersão, como mostrado na Figura 2b.

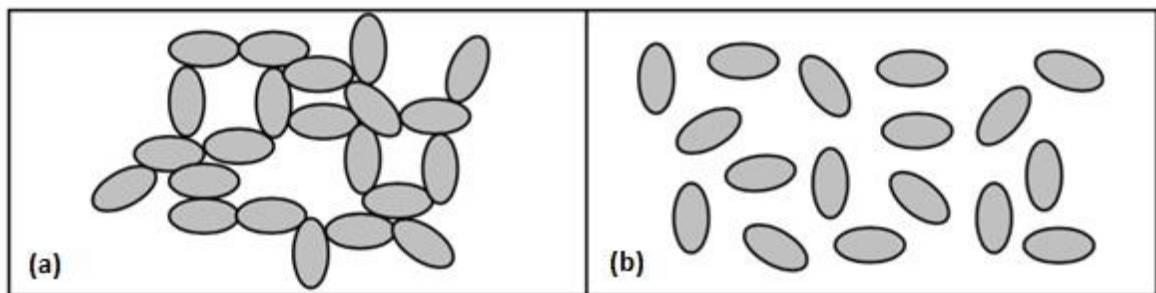


Figura 2 - Matrizes cimentícias (a) aglomerada e (b) dispersa
Fonte: Silva (2006).

Tendo em vista os malefícios causados pela formação de aglomerados nas matrizes cimentícias, faz-se necessário o uso de aditivos dispersantes (ou superplastificantes) para evitar a sedimentação das partículas e decorrente segregação de fases da pasta (líquida e sólida). Com o uso dos aditivos dispersantes, torna-se possível a elaboração de matrizes cimentícias homogêneas e com alta

concentração de sólidos finos. A eficiência dos dispersantes, consiste na quebra das estruturas das partículas de cimento e, também, em sua dispersão, o que evita a ligação prematura formadora dos aglomerados. Com base nisso, minimiza-se a quantidade de água necessária para a matriz e resulta-se em matrizes cimentícias mais trabalháveis durante o intervalo de tempo requerido (DAIMON; ROY, 1978).

3.2.3 Aditivos redutores de água

A utilização de aditivos em argamassas e concretos é uma técnica utilizada desde os tempos antigos. De acordo com Coutinho (1997), o povo romano acrescentava clara de ovo, sangue, leite ou banha às argamassas e concretos que produziam para poder melhorar a trabalhabilidade das misturas. Para Martin (2005), com a constante evolução nos procedimentos, técnicas e materiais utilizados na construção civil, a indústria química tem criado e disponibilizado uma variedade de produtos para a produção de matrizes e compósitos cimentícios.

Os aditivos redutores de água, plastificantes ou superplastificantes, possuem basicamente a função de reduzir a quantidade de água e/ou a consistência das matrizes cimentícias. De acordo com Collepari *et al.* (1999) as principais finalidades para os aditivos redutores de água utilizados em materiais cimentícios são:

- reduzir a utilização de água na mistura para uma dada consistência, assim, melhorando propriedades como a resistência e a durabilidade;
- melhorar a trabalhabilidade da mistura, tornando-a mais fluida sem alterar o consumo de água; e
- diminuir a demanda de cimento na pasta, mantendo a mesma consistência e resistência à compressão, com objetivo de reduzir os custos, a retração, a fluência e até tensões de origem térmica.

No Brasil, os aditivos redutores de água são classificados, conforme a NBR 11768 (ABNT, 2011) em: plastificantes (P); plastificantes retardadores (PR); plastificantes aceleradores (PA); superplastificantes (SP); superplastificantes aceleradores (SPA); e superplastificantes retardadores (SPR). Os superplastificantes são redutores de água de alto desempenho.

Esses aditivos podem ser obtidos na forma de pó ou líquida. Nos aditivos líquidos, o teor de sólidos pode estar entre 20 e 40%. Para facilitar a dispersão do aditivo em pó, sugere-se que este seja diluído em água antes de ser adicionado as matrizes cimentícias (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Ramachandran *et al.* (1998), os aditivos superplastificantes podem apresentar interações físicas ou químicas com os sistemas cimentícios. Dentre os fenômenos físicos estão: a adsorção física, a repulsão eletrostática, a repulsão estérica e outras, as quais podem ser observadas em qualquer mistura aquosa de materiais relativamente inertes (SiO_2 , CaCO_3 , entre outros). As interações químicas são dependentes das reações provenientes das partículas de cimento e incluem a adsorção preferencial, a adsorção química e as reações químicas para gerar novas fases hidratadas.

Para Uchikawa *et al.* (1997) dentre as interações físicas dos policarboxilatos tem-se a repulsão estérica como a força mais significativa, a qual traz contribuição para a fluidez da pasta de cimento. Ainda segundo os autores, a magnitude dessa interação está diretamente ligada à estrutura molecular do aditivo (tamanho da molécula, tipo e número de ramificações, entre outras).

Apesar dos efeitos de repulsão serem dominantes, outros efeitos como a redução da tensão superficial da água, a formação de um filme lubrificante entre os grãos de cimento e a liberação de água presa nos flocos de cimento também contribuem para a fluidificação e dispersão das matrizes pelo uso de superplastificantes (AÏTCIN; JOLICOEUR; MACGREGOR, 1994; JOLICOEUR; SIMARD, 1998).

A inclusão de aditivos dispersantes é considerada a solução mais adequada para aumentar a trabalhabilidade de misturas com elevado teor de finos sem aumentar a demanda de água. Isso proporciona a diminuição da porosidade e do diâmetro médio dos poros, logo uma estrutura mais resistente e compacta. Ao contrário do que se pode pensar a princípio, os aditivos não representam um custo adicional para a matriz cimentícia. Isso se explica pelo fato de, com a sua utilização, serem reduzidos os seguintes fatores: custos com adensamento e teor de cimento. Além de contribuir para o aumento da durabilidade do produto final (NEVILLE, 1997).

A dosagem de aditivos superplastificantes é um fator importante para a otimização do desempenho da matriz. Dosagens excessivas, além de ser economicamente inviável, pode acarretar efeitos negativos, como o retardo do tempo de pega e endurecimento, a perda de fluidez com o tempo e a segregação excessiva (RAMACHANDRAN *et al.*, 1998). O teor adequado de aditivo pode ser determinado por meio de ensaios de laboratório, como o funil de Marsh, o mini abatimento e a determinação da viscosidade (viscosímetro de Brookfield e reometria rotacional).

O ensaio de mini abatimento foi proposto por Kantro e é muito parecido com o ensaio de abatimento do concreto. As principais vantagens observadas nesse método de ensaio são a pequena quantidade de material utilizada, a possibilidade de verificar a existência de segregação ou exsudação da matriz e a possibilidade de executar uma rápida comparação de fluidez entre várias pastas de cimento com aditivos superplastificantes (MONTE; FIGUEIREDO, 2008).

Para a realização do ensaio de Kantro, varia-se a quantidade de aditivo dispersante para uma determinada matriz cimentícia. A partir daí, com os resultados de espalhamento obtidos, podem ser confeccionados gráficos que relacionam o diâmetro de espalhamento com o teor de aditivo (%). Dessa forma, é possível observar o ponto onde a adição de superplastificante deixa de ser eficaz – esse ponto é denominado ponto de saturação do aditivo. Em outras palavras, o ponto onde, mesmo com aumento do teor de aditivo, o diâmetro de espalhamento tende a estabilizar e permanecer constante (MONTE; FIGUEIREDO, 2008). A estabilização no aumento de diâmetro pode ser evidenciada na Figura 3:

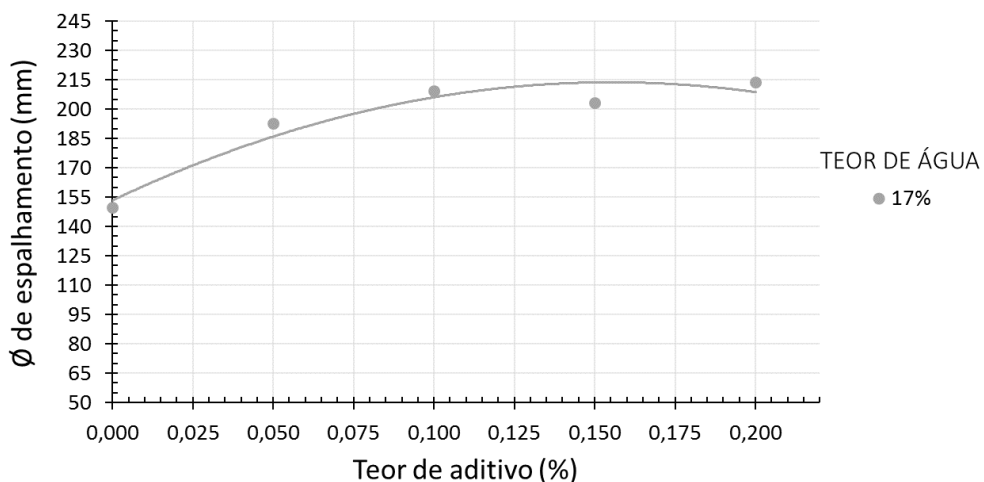


Figura 3 - Estabilização do teor de aditivo utilizando pasta com teor de água de 17%
Fonte: Autoria própria (2017).

3.3 RETRAÇÃO PLÁSTICA

A retração por secagem é proveniente da perda rápida de água de amassamento e das reações de hidratação dos aglomerantes, fatos esses que causam o aparecimento das fissuras nas matrizes cimentícias. Segundo Fiorito (2003), durante o processo de endurecimento, a matriz cimentícia sofre diminuição em seu volume em função da perda de água por evaporação ocasionada pelas reações de hidratação. Após seu endurecimento, ainda podem ser notadas variações dimensionais em razão do grau higrométrico do ambiente, esse fenômeno recebe o nome de retração.

Para Bortoluzzo e Libório (1999) a retração durante o processo de secagem é o principal motivo do aparecimento de fissuras das matrizes cimentícias. Dentre os fatores que influenciam a retração, os autores destacam:

- as características ligadas à composição da matriz, como a granulometria, a finura e a forma das partículas utilizadas. Essas propriedades determinam a demanda de água e cimento. Maiores teores de água e aglomerantes e menores teores de agregados propiciam um aumento na variação volumétrica da argamassa durante a retração; e,
- a capacidade de retenção de água da matriz cimentícia na sua estrutura, diminui os efeitos negativos provocados por uma secagem acelerada. O aumento de finos nas matrizes aumenta a tensão capilar nos poros impedindo a perda de água por evaporação ou absorção do agregado ou do substrato, conseqüentemente diminuindo o risco de retração.

Carasek (2007) ainda comenta que a retração é resultante de diversos fatores, os quais estão associados com a variação volumétrica da pasta aglomerante. Tais fatores apresentam papel fundamental no desempenho das matrizes cimentícias, em especial no que se refere a resistência mecânica, a estanqueidade e a durabilidade.

Considerando a adição de material com granulometria fina, Silva, Buest e Campitelli (2005), por meio de ensaios experimentais, analisaram que o aumento no teor de finos provenientes de areia britada de rocha calcária calcítica, na produção de argamassa mista de cimento, cal e areia, provoca um número consideravelmente

maior de fissuras no revestimento oriundas da retração por secagem. Da mesma forma, Angelim, Angelim e Carasek (2003) observaram que a adição de finos pode aumentar a ocorrência de fissuras por retração. Entretanto, essa interferência varia juntamente com a natureza mineralógica dos finos.

3.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Resistência mecânica é a capacidade de um material resistir sem que haja ruptura, identificada geralmente pela aparição de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A resistência dos materiais cimentícios está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento, sendo uma função inversa da porosidade do material, isto é, do volume de poros ou vazios presentes na mesma (Figura 4).

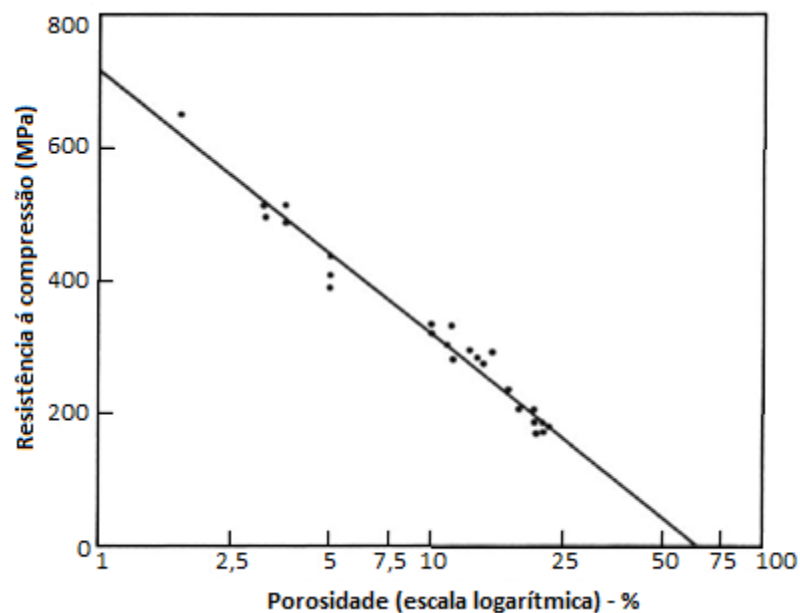


Figura 4 - Relação entre a resistência à compressão e a porosidade da pasta de cimento para várias condições de pressão e alta temperatura
 Fonte: Neville; Brooks (2013).

A porosidade está diretamente ligada à quantidade de água utilizada durante a mistura, à compactação e ao grau de hidratação do cimento. Com o aumento da quantidade de água, para uma mesma quantidade de cimento, há o aumento da porosidade da matriz. Assim, o sistema perde resistência à compressão, como é possível se constatar na Lei de Abrams. Esta lei correlaciona o fator água/cimento

com a resistência à compressão de materiais cimentícios numa determinada idade para materiais adequadamente adensados. Portanto, a quantidade de água na mistura é crucial para determinação da resistência final e, conseqüentemente, durabilidade desses materiais (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de partículas finas em compósitos cimentícios pode contribuir para a redução da porosidade do sistema, uma vez que diminui o volume de vazios e a conectividade entre os mesmos. Isso porque os vazios que antes seriam preenchidos pela água são, agora, preenchidos pelas partículas finas. Assim, há uma maior ocupação do volume (Figura 5). A microestrutura se torna mais compacta, homogênea e, conseqüentemente, mais resistente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

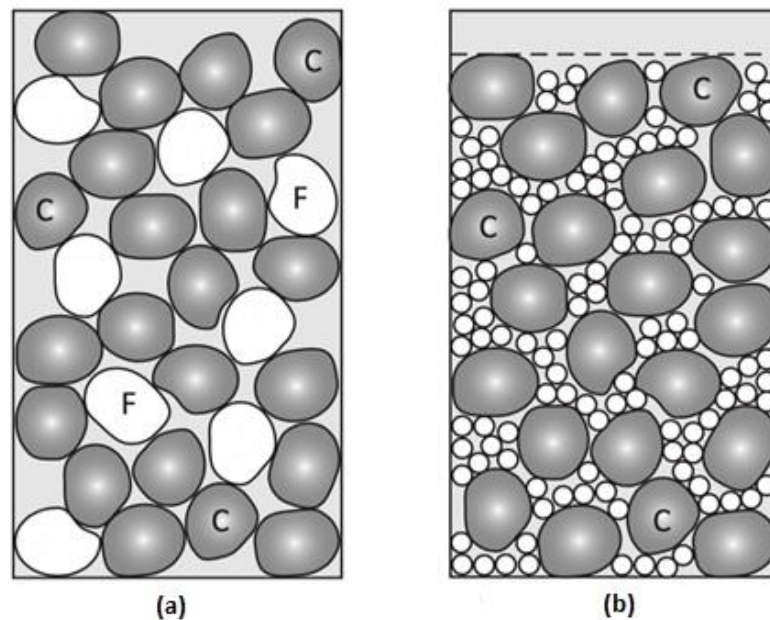


Figura 5 - Comparativo de sistemas cimentícios constituídos por cimento (C) e calcário (F) com granulometrias distintas: (a) calcário com granulometria similar ao cimento e (b) com a incorporação de calcário com granulometria inferior ao cimento
 Fonte: Fennis (2011).

Sellevoid *et al.* (1982) verificaram que a incorporação de sílica ativa e fíler calcário, ambos de tamanho aproximado a $0,1 \mu\text{m}$, aceleram a hidratação do cimento e modificam a porosidade do sistema. Os autores constataram um refinamento da distribuição dos tamanhos dos poros capilares com a utilização de partículas menores que o cimento, no entanto, o efeito foi menor para a sílica ativa em comparação com o do fíler calcário. Segundo os autores, o efeito fíler melhora a distribuição espacial

dos produtos de hidratação, tornando-a mais homogênea e, assim, há uma redução dos defeitos como canais de água e vazios entre as partículas. Quanto menos poros, também, menos permeável se torna a matriz, dificultando a entrada de agentes agressivos ao longo do tempo e afetando diretamente a durabilidade do mesmo.

Na Figura 6, pode-se notar que a porosidade diminui ao longo do tempo devido ao aumento do grau de hidratação do cimento. Isso ocorre porque a água é lentamente consumida, dando lugar aos cristais formados na hidratação do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

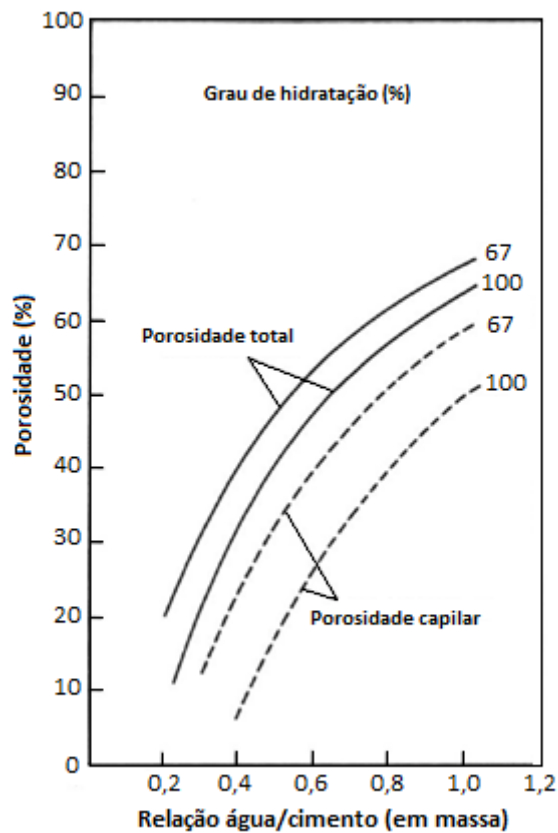


Figura 6 - Influência da relação água/cimento e grau de hidratação na porosidade da pasta de cimento

Fonte: Neville; Brooks (2013).

O grau de hidratação das matrizes cimentícias também pode ser alterado pela incorporação de materiais pozzolânicos, que modificam os produtos de hidratação ao longo do tempo gerando um silicato de cálcio menos denso que tende a promover um refinamento dos poros; pelas condições de cura; e, emprego de aditivos químicos, tais como os retardadores ou aceleradores (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Silva, Campitelli e Gleize (2007) avaliando a adição de finos cerâmicos, passantes na peneira de 75 μm , em teores de 5% e 10% em argamassas de revestimento, constataram um aumento na resistência à compressão para as amostras com maior teor de finos em sua composição. Segundo os autores, esse aumento foi atribuído ao efeito de preenchimento de vazios pelas partículas mais finas, a menor relação água/cimento e o possível efeito pozolânico dos finos cerâmicos.

De modo geral, a adição de partículas finas resulta em argamassas e concretos mais resistentes à compressão, quando há uma combinação entre a redução da relação água/cimento e o efeito de preenchimento das partículas finas. Segundo Lagerblad e Vogt (2004), citados por Fennis (2011), o efeito dos finos na resistência do concreto em taxas de substituição de até 40% foi investigado e, como resultado, verificou-se a proporcionalidade entre a taxa de substituição e o aumento da resistência. De acordo com os autores, tal efeito pode ser explicado que até um certo teor, as partículas ultrafinas se tornam parte integrante da matriz de cimento, o que aumenta a homogeneidade da zona interfacial, conseqüentemente melhorando a resistência mecânica do sistema.

Entretanto, os finos também podem trazer conseqüências indesejáveis às matrizes, se não considerado o uso de aditivos, como o aumento da necessidade de água, a perda da trabalhabilidade, a formação de aglomerados no sistema – como discutido anteriormente – e o aumento do risco de fissuração por retração.

Nos materiais compósitos, tais como concretos e sistemas de revestimento, a resistência do conjunto é perturbada pela presença de fissuras e defeitos na interface entre a matriz e a fase dispersa (agregados; blocos cerâmicos, blocos de concreto, entre outros) (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.5 INTERFACE SUBSTRATO-MATRIZ CIMENTÍCIA

A zona de transição entre o substrato e a matriz cimentícia é o elo fraco dos compósitos cimentícios, sendo a fase limitante da resistência de concretos e de sistemas de revestimentos argamassados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A formação da interface é um fenômeno complexo, envolvendo fatores relacionados à composição, a trabalhabilidade, a energia de aplicação das matrizes cimentícias, as características superficiais de absorção e rugosidade dos substratos, bem como as interações entre as duas fases e o meio ambiente (CARASEK, 2007).

De acordo com Costa (2014) o desenvolvimento da aderência entre as fases, matriz e agregado, é resultante principalmente das forças de Van der Waals, podendo ter contribuição química e mecânica. De modo que quanto maior o contato matriz-agregado, maior será o desempenho mecânico da interface.

O teor de água presente nas matrizes é um fator determinante na aderência, pois influencia na capacidade de espalhamento da argamassa sobre o substrato. Além do teor de água presente na mistura, a capacidade de espalhamento também é modificada pela absorção do substrato ou simples perda para o ambiente. Ao diminuir a quantidade de água, as partículas se aproximam e a pressão capilar aumenta. Dessa forma, as partículas perdem a facilidade de deslocamento umas às outras, ocasionando uma redução da trabalhabilidade e dificultando o fluxo de argamassa sobre o substrato. Como resultado, a perda de mobilidade pode aumentar a taxa de defeitos na interface argamassa-substrato, afetando a aderência (COSTA, 2014).

Uma das formas de se analisar a capacidade de espalhamento da argamassa é a realização de ensaios de *squeeze-flow* sobre uma dada superfície. O ensaio consiste basicamente na medição do esforço necessário para comprimir uma amostra de argamassa entre duas superfícies paralelas: um disco metálico e o substrato a ser analisado.

Barbosa (2010) avaliou a capacidade de espalhamento de pastas cimentícias dispersas e não dispersas, aplicadas em dois tipos de substrato, uma placa metálica e um substrato cimentício, e após 5 e 10 minutos do contato da pasta com o substrato. A autora verificou que há uma diminuição da capacidade de espalhamento das pastas quando aplicadas no substrato cimentício em relação a placa metálica. Isso ocorre devido a absorção de água do substrato. Para as pastas dispersas não houve uma variação significativa da capacidade de espalhamento em relação ao tempo de contato com o substrato.

Costa (2014), analisando a capacidade de espalhamento de argamassas aplicadas sobre substratos cimentícios após 5 e 10 minutos do contato de ambos,

também constatou que não houve diferença significativa entre os intervalos de tempo estudados para substratos com mesma porosidade.

O desempenho mecânico da interface tem sido avaliado na capacidade da interface de resistir aos esforços normais (tração) ou tangenciais (cisalhamento). Em sistemas de revestimento argamassados, essa propriedade tem sido avaliada por ensaios de resistência de aderência à tração, comumente denominado de ensaio de arrancamento. A metodologia desse ensaio é especificada pela NBR 13528 (ABNT, 2010) e consiste em aplicar um esforço de tração a um conjunto moldado matriz-substrato e verificar qual a resistência e a forma de ruptura.

Segundo Sabbatini (1984) o aumento do teor de finos ($\emptyset < 75 \mu\text{m}$) pode aumentar a aderência da argamassa dependendo das características superficiais do substrato na qual for aplicada.

Silva, Campiteli e Gleize (2007) avaliando a resistência de aderência de argamassas com duas concentrações de finos: 6% e 0,7% aplicados em blocos cerâmicos, verificaram que a argamassa com maior teor de finos propiciou um aumento da aderência e uma redução da dispersão dos resultados em comparação com a argamassa com menor teor de finos.

Braga, Brito e Veiga (2012) também analisaram a aderência de argamassas com adição de agregados finos provenientes da reciclagem de concreto num teor de 15%. Após 28 dias da aplicação da mistura à superfície de um substrato cerâmico, houve uma melhoria significativa na capacidade de aderência da argamassa quando comparada a amostra sem finos, foi necessária uma força 36% maior para que houvesse separação das superfícies. A ruptura das amostras de argamassa sem finos era principalmente coesiva e ocorreu dentro da camada de revestimento. No caso da argamassa modificada, a ruptura foi adesiva (entre o revestimento e o substrato), o que é devido à maior resistência à tração da argamassa.

Por outro lado, os mesmos autores citam Paes *et al.* (1999), que encontraram uma tendência de resistência adesiva ligeiramente decrescente à medida que o teor de finos aumenta, com proporções de incorporação maiores que 15%. Esse efeito pode sugerir que, após uma determinada porcentagem de substituição, a força de aderência tende a diminuir.

Costa (2014) avaliou a influência do teor de finos calcários na aderência de argamassas cimentícias aplicadas sobre blocos cerâmicos hidrofugados. A autora analisou dois finos calcários, um com granulometria similar e outro inferior ao cimento, mantendo-se constante o teor de água e de aditivo dispersante. Os resultados indicaram que em teores de até 30% ambos os finos calcários apresentaram valores de aderência equivalentes a argamassa sem fino calcário.

Nessa mesma linha, Berton e Magri (2016) também constataram que o aumento no teor de finos calcários provoca uma redução da resistência de aderência da argamassa quando aplicada sobre um substrato granítico. Os autores avaliando argamassas com teores de substituição de 5%, 25%, 45% e 65% do cimento por fino calcário, verificaram que a queda de resistência a tração evolui com o aumento do teor de substituição do cimento (Figura 7).

Os resultados obtidos por Costa (2014) e Berton e Magri (2016) mostram que para teores entre 25% e 45% de substituição do cimento por fino calcário, as argamassas apresentaram desempenho satisfatório para o uso como revestimentos externos, com valores de resistência de aderência à tração superiores a 0,30 MPa, conforme especificado pela NBR 13749 (ABNT,1996). Com base nestes resultados, será avaliado no presente trabalho a influência do uso de 30% de fino calcário com granulometria inferior ao cimento variando-se o teor de água presente na argamassa.

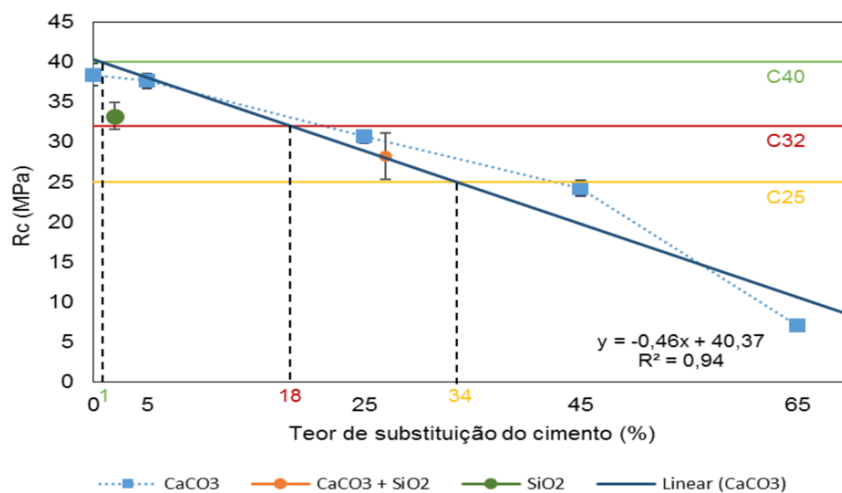


Figura 7 - Resistência de aderência à tração (MPa) x Teor de substituição do cimento das argamassas

Fonte: Berton e Magri (2016).

Nota: * "Revestimento Externo" e "Revestimento Interno" correspondem às classes padrão de resistência de aderência à tração, normatizadas pela NBR 13749 (ABNT, 2013). **Séries CaCO₃; CaCO₃ + SiO₂ e SiO₂ referem-se às argamassas com cimento substituído por calcário, por calcário + nanossílica e por nanossílica, nos teores estudados pelos autores, respectivamente.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do teor de água e de fino calcário no desempenho de matrizes cimentícias. As matrizes cimentícias foram produzidas com teores de substituição de 0% e 30% do cimento por carbonato de cálcio, com granulometria inferior à do cimento, mantendo-se a proporção 1:3 (finos:areia). Os teores de água estudados foram pré-determinados em 13%; 15% e 17% em relação à massa total de sólidos. Para eliminar o efeito de aglomeração das partículas finas, sem a necessidade de aumentar a demanda de água, utilizou-se um aditivo dispersante a base de éter policarboxilato, disponível comercialmente; cujo teor foi determinado por meio de ensaio de mini abatimento do tronco de cone.

No estado fresco, foram realizados ensaios para avaliação da densidade de massa, do índice de consistência e da capacidade de espalhamento das argamassas sobre substrato absorvente e não absorvente. No estado endurecido, o desempenho mecânico das matrizes cimentícias foi avaliado pela determinação da porosidade e da resistência à compressão e o da interface por ensaios de resistência de aderência à tração das argamassas aplicadas em substratos cerâmicos, ambos aos 14 dias. A seguir, são apresentadas as variáveis experimentais, os parâmetros de controle, bem como os ensaios que foram executados.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Particulados

As matrizes cimentícias foram confeccionadas utilizando cimento Portland tipo CP V – ARI (ABNT NBR 5733,1991); carbonato de cálcio (Procarb 1 – Provale) e uma areia de origem natural quartzosa, disponível comercialmente como média.

O cimento e o fino calcário foram caracterizados em termos de massa específica e granulometria, sendo esta determinada por difração a laser. A distribuição granulométrica do cimento foi obtida pelo equipamento *Malvern Mastersizer 2000*, com acessório *Scirocco 2000* realizado via seca. Para o calcário, sua granulometria

foi obtida utilizando-se equipamento *Malvern MSS Mastersizer* com acessório Hydro 2000 UM para análises em via úmida determinado por COSTA (2014).

A distribuição granulométrica das partículas do cimento e do calcário estão apresentadas na Figura 8.

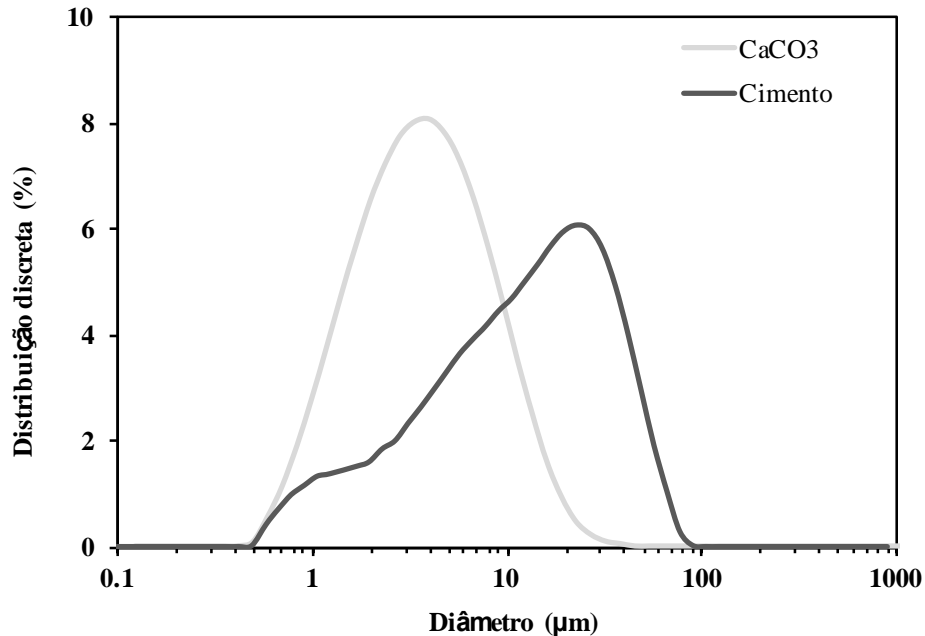


Figura 8 - Distribuição granulométrica do cimento e do calcário utilizados
 Fonte: Autoria própria (2017).

A areia foi caracterizada pela determinação da massa específica, massa unitária e distribuição granulométrica por peneiramento mecânico conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As propriedades físicas dos materiais utilizados e a distribuição granulométrica apenas do agregado miúdo estão apresentadas na Tabela 1 e na Figura 9, respectivamente.

Tabela 1 - Propriedades físicas da areia, cimento e calcário utilizados na produção das argamassas

Propriedades	Método	Areia	Valores
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	Areia	1630 kg/m ³
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Areia	2,36 g/cm ³
	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	Cimento	3,14 g/cm ³
	Picnometria de gás Hélio ⁽¹⁾	Calcário	2,64 g/cm ³

Fonte: NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 23 (ABNT, 2001) (1) Dados obtidos por COSTA (2014).

Nota: (1) Ensaio realizado por meio do equipamento Quantatrome – MVP 5DC.

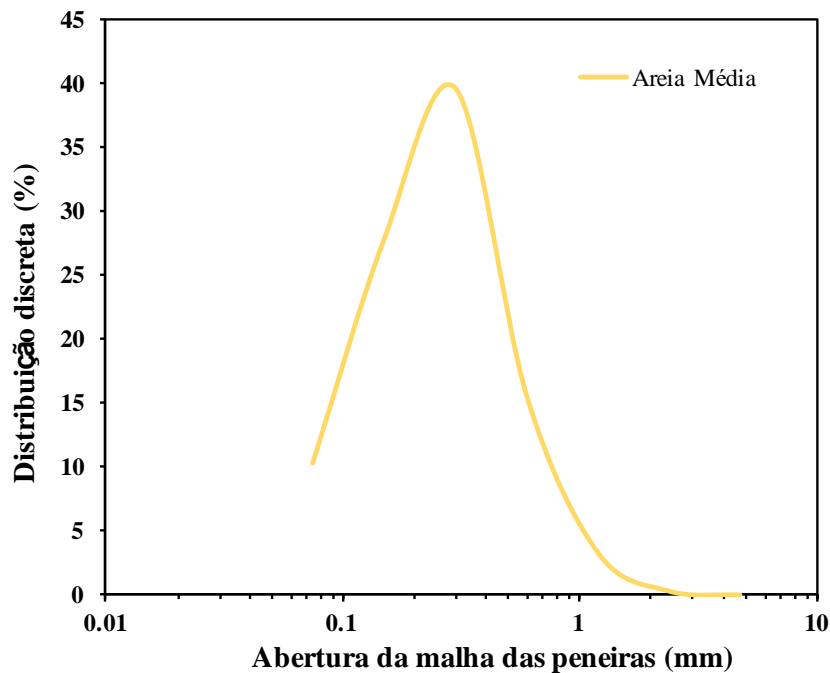


Figura 9 - Distribuição discreta granulométrica da areia utilizada
Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 2 apresenta os diâmetros equivalentes dos materiais utilizados: cimento, calcário e areia. Esses diâmetros foram obtidos a partir da distribuição granulométrica de cada material.

Tabela 2 - Diâmetros equivalentes (μm)

Material	D10	D50	D90
CaCO₃	1,39	3,97	10,94
Cimento	2,45	14,15	41,79
Areia	125,94	367,19	954,64

Fonte: Autoria própria (2017).

A distribuição granulométrica (Figura 8 e Figura 9) e os diâmetros equivalentes dos materiais utilizados (Tabela 2) mostram que o calcário possui finura maior que a do cimento devido a menor dimensão das suas partículas: 90% das partículas de carbonato de cálcio possui diâmetro menor que 11 μm enquanto que no cimento esse número equivale a 42 μm , aproximadamente quatro vezes maior. Além disso, verifica-se que a faixa de distribuição granulométrica correspondente a 1 e 10 μm é menos expressiva no cimento comparada a do calcário. Isso indica o potencial

de melhoria do empacotamento das matrizes cimentícias pela substituição do cimento por este calcário.

4.1.2 Substrato

Para avaliação da capacidade de espalhamento da argamassa e aderência, as argamassas foram aplicadas em blocos cerâmicos os quais foram caracterizados pela determinação da capacidade de sucção, obtida através de ensaio de absorvidade ao longo do tempo segundo o método proposto por Taha e Shrive (2005).

O ensaio foi executado em três amostras retangulares extraídas de blocos cerâmicos aleatórios, tendo áreas de superfícies entre 90 e 110 cm². Para a realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa a 100°C por 24 h. Após 2 h de resfriamento ao ar, foram colocadas em contato com uma lâmina de água de 3 mm e efetuadas as leituras para controle da variação de massa do corpo de prova nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 e 30 minutos. O coeficiente de absorção de água ao longo do tempo foi calculado pela inclinação da reta média das três amostras analisadas traçada no gráfico “absorção de água *versus* raiz quadrada do tempo” como mostrado na Figura 10.

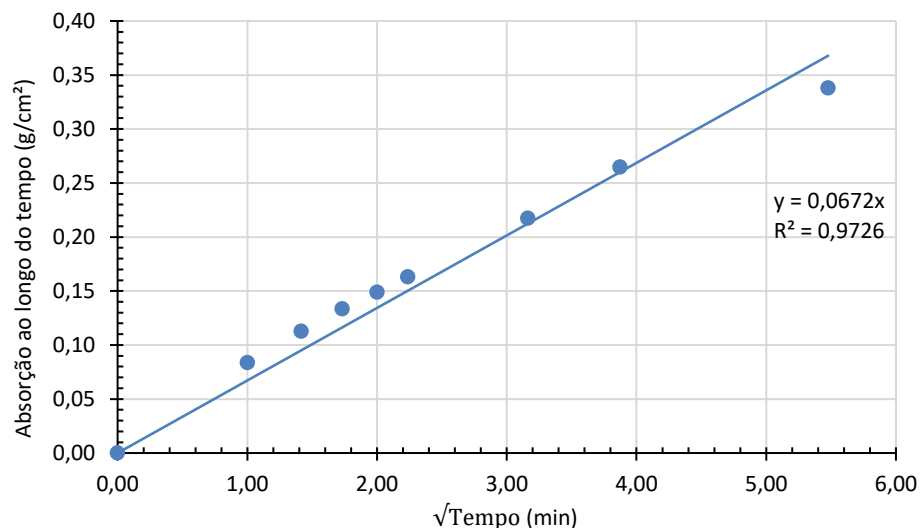


Figura 10 - Absorção de água em função da raiz quadrada do tempo para o bloco cerâmico estudado

Fonte: Autoria própria (2017).

A absorção de água inicial do bloco cerâmico foi igual a 0,08 g/cm².min, aos cinco minutos de 0,16 g/cm².min e o coeficiente de absorção de água apresentou um valor de 0,067 g/cm².min.

4.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas foram preparadas na proporção 1:3 (finos: areia) em massa. Estudaram-se duas composições: uma de referência constituída por cimento e areia; e a outra substituindo-se 30% da massa de cimento pelo carbonato de cálcio. Foram avaliados três teores de água (13 %, 15% e 17%) para cada composição, totalizando seis cenários diferentes (Tabela 3). Em todas as argamassas, utilizou-se um aditivo dispersante em pó a base de policarboxilato de éter (Melflux® 2651 F – BASF), cujo teor fora definido em função do ensaio de mini abatimento do tronco de cone.

Tabela 3 - Composição das matrizes cimentícias estudadas: teor de água e de aditivo dispersante e traços unitários em massa.

Teor de substituição	Teor de água (%)	Teor de aditivo dispersante (%) ⁽¹⁾	Finos		Agregado miúdo	a/c ⁽²⁾	a/f ⁽³⁾
			Cimento	Calcário			
SEM FÍLER CÁLCARIO (0%)	13	0,0629	1	0	3	0,52	0,52
	15	0,0427	1	0	3	0,60	0,60
	17	0,0089	1	0	3	0,68	0,68
COM FÍLER CÁLCARIO (30%)	13	0,1057	0,7	0,3	3	0,74	0,52
	15	0,0712	0,7	0,3	3	0,86	0,60
	17	0,0514	0,7	0,3	3	0,97	0,68

Fonte: Autoria própria (2017).

Notas: (1) Porcentagem em relação à massa de finos (cimento + calcário).

(2) a/c = relação água/cimento.

(3) a/f = relação água/finos.

4.2.1 Definição do teor ótimo de aditivo dispersante

Para determinação do teor ótimo de aditivo dispersante foi realizado o ensaio de mini abatimento pelo tronco de cone para cada matriz cimentícia estudada em função do teor de água e de fino utilizado. Tal procedimento foi adotado, pois ao fixar o teor de aditivo, poderia haver segregação nas matrizes com maior teor de água afetando a trabalhabilidade e o desempenho final da pasta.

O ensaio foi realizado em pasta e adotado em detrimento ao funil de Marsh devido a menor quantidade de material a ser utilizado. As pastas foram misturadas em misturador mecânico (HOBART N 50) da seguinte forma:

- colocar toda a água na cuba do misturador;
- acrescentar a mistura sólida na cuba e deixar de repouso por 30 segundos;
- ligar o equipamento por 30 segundos na velocidade lenta;
- desligar o equipamento por 15 segundos e limpar a pá de mistura;
- por fim, misturar por 60 segundos em velocidade alta.

O ensaio baseia-se no fato de que, ao aumentar a quantidade de aditivo, a pasta tende a se espalhar cada vez mais, até chegar um ponto em que o espalhamento se estabiliza e qualquer acréscimo de aditivo não é efetivo. Então, a partir desse ponto, o espalhamento da pasta deixa de ser um círculo regular e passa a adquirir aspecto irregular, devido a fluidez excessiva da pasta. Essa transição entre o ponto de espalhamento máximo da pasta e o ponto onde um acréscimo de aditivo não é eficiente, é o fator determinante para a descoberta do ponto de teor ótimo de aditivo.

Foram avaliados cinco teores de aditivo dispersante: 0%, 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% em relação à massa total de finos. Após realização dos ensaios, os resultados dos diâmetros médios de espalhamento foram plotados em gráfico para cada caso. Então, obteve-se a curva tendência de melhor ajuste aos dados coletados e a equação correspondente para cada pasta estudada. O teor ótimo de aditivo dispersante foi obtido para espalhamento de 160 mm, pois de acordo com Nakakura e Bucher (1997), as argamassas para acabamento devem apresentar o espalhamento, medido pelo ensaio de Kantro, entre 160 a 165 mm, para obtenção de uma consistência adequada. Além disso, nos ensaios realizados em laboratório, pôde-se perceber que próximo a essa medida a pasta começa a perder uniformidade em sua consistência, como ilustrado na Figura 11.

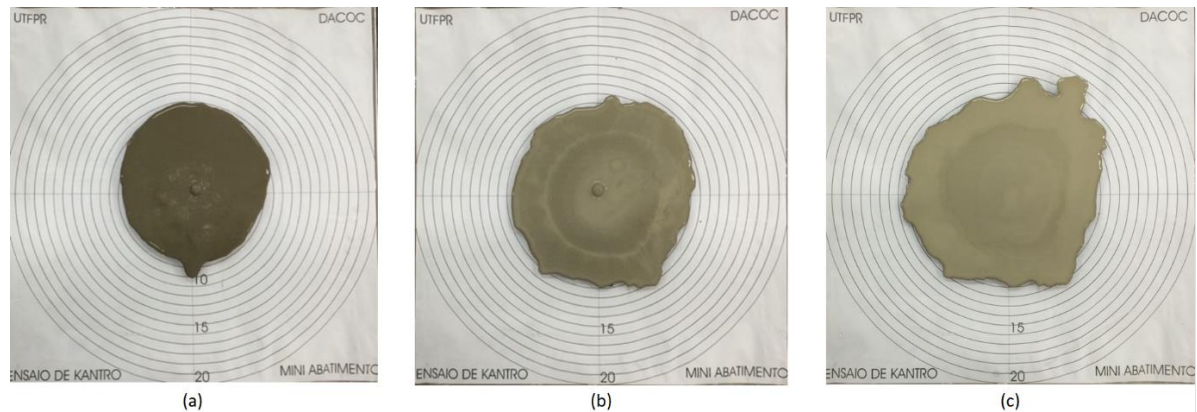


Figura 11 - Ensaio de mini abatimento realizado em pastas de mesma composição, porém com teores de aditivos diferentes: (a) pasta com espalhamento próximo a 160mm (0,05% de aditivo); (b) pasta com espalhamento próximo a 200mm, já perdendo forma (0,10% de aditivo); (c) pasta com espalhamento desuniforme maior que 200mm (0,15% de aditivo)
Fonte: Aatoria própria (2017).

4.2.2 Mistura das argamassas

As argamassas foram misturadas em misturador de bancada (HOBART N 50) conforme procedimentos descritos pela NBR 13276 (ABNT, 2016), a qual segue o seguinte roteiro:

- promover a homogeneização de todos os finos e agregados utilizados para a confecção da argamassa;
- colocar a mistura sólida na cuba do misturador, adicionar 75% da água, gradativamente, nos primeiros 10 segundos, enquanto o misturador funciona na velocidade baixa por 30 segundos;
- aumentar a velocidade de mistura para a alta e misturar por 60 segundos;
- desligar o equipamento por 90 segundos e limpar a pá de mistura;
- adicionar os 25% de água restantes, nos primeiros 10 segundos, enquanto o misturador funciona na velocidade baixa por 30 segundos;
- aumentar a velocidade de mistura para a alta e misturar por 60 segundos.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Após a mistura das argamassas, foram realizados ensaios no estado fresco para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, NBR13278

(ABNT, 2005), e do índice de consistência pela mesa de espalhamento, NBR 13276 (ABNT, 2005).

Para avaliação das propriedades das matrizes cimentícias no estado endurecido, foram moldados, para cada argamassa, quatro corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual a 50 mm e altura de 100 mm. As argamassas foram moldadas em quatro camadas regularmente distribuídas e adensadas em mesa de queda para padronização da energia de compactação. Cada camada foi submetida a trinta golpes na mesa de queda e, ao fim da quarta camada, nivelou-se as superfícies com espátula metálica. Após 24 horas da finalização da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em água saturada com cal até que se atingisse a idade de 13 dias.

No 13º dia após a moldagem, retirou-se os corpos de prova da imersão em água saturada com cal para a obtenção das massas saturada e imersa. Posteriormente, as amostras foram levadas para secagem em estufa com temperatura de 60°C por 24 horas. Após a secagem, foi determinada a massa seca dos corpos de prova, o que possibilitou a determinação do índice de vazios das amostras pelo método de absorção de água conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Então, após 14 dias da moldagem, foi realizado o ensaio de resistência à compressão segundo a NBR 7215 (ABNT, 1991).

4.4 CAPACIDADE DE ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA SOBRE SUBSTRATO

Para avaliar o efeito do teor de água na capacidade de espalhamento da argamassa foram realizados ensaios de *squeeze-flow* ou escoamento por compressão axial. O ensaio consiste em medir o esforço necessário para comprimir uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas, sendo essas placas determinadas em dois casos diferentes (Figura 12). No primeiro caso, as placas paralelas foram duas superfícies lisas (placa inferior de acrílico). No segundo caso, os ensaios foram realizados substituindo a placa inferior pelo substrato cerâmico, em acordo com a metodologia proposta por Barbosa (2010).

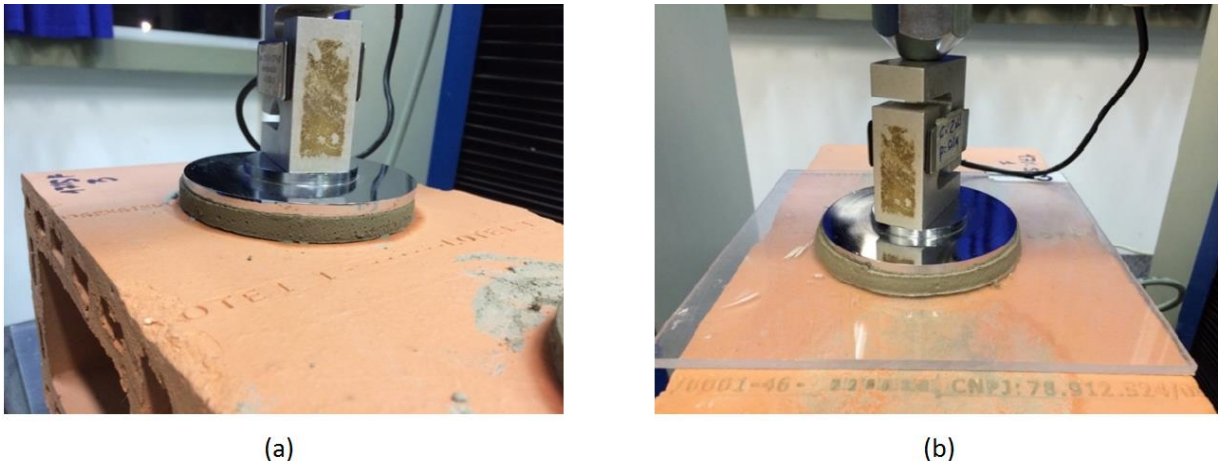


Figura 12 - Ensaio de *squeeze-flow* sendo realizados: (a) no bloco cerâmico; (b) em superfície lisa

Fonte: Autoria própria (2017).

Nesse ensaio, o fluxo radial da argamassa quando comprimida pela prensa é livre; em que a amostra comprimida possui menores dimensões ao se comparar com as dimensões da placa inferior, o que permite a avaliação do espalhamento da argamassa sobre uma dada superfície.

Após a mistura da argamassa, esta foi aplicada sobre o bloco cerâmico com auxílio de um molde cilíndrico de PVC com dimensões de 10 mm de altura e 101 mm de diâmetro, posicionado no centro do substrato. O molde foi preenchido em camada única sem aplicação de golpes e nivelado com espátula metálica para obtenção de uma superfície regular. A compressão das amostras teve início cinco minutos após o contato da argamassa com o substrato em ambos os casos, esse tempo foi definido com base nos trabalhos de Barbosa (2010) e Costa (2014).

O carregamento foi aplicado por uma prensa universal (EMIC), com célula de carga de 2 kN e taxa de deformação constante de 0,10 mm/s, de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010). O ensaio foi finalizado quando a carga aplicada atingia 1 kN, obtendo-se como resposta experimental resultados de carga *versus* deslocamento – o deslocamento da placa superior é uma medida indireta do espalhamento da argamassa. Para cada teor de água estudado foram feitas seis repetições, sendo três delas de acordo com o primeiro caso (placas acrílicas) e as outras três de acordo com o segundo caso (substratos cerâmicos).

4.5 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

O desempenho mecânico da interface argamassa-substrato foi avaliado por ensaios de resistência de aderência à tração (Figura 13), conforme os procedimentos desenvolvidos por Costa (2014) adaptados da NBR 13528 (ABNT, 2010). As argamassas foram aplicadas nos blocos cerâmicos com auxílio de um molde cilíndrico com diâmetro de 44 mm e altura igual a 20 mm. Os sistemas argamassa-substrato permaneceram em cura ao ar em ambiente de laboratório por 14 dias, até a data de realização do ensaio. Para tal, utilizou-se um dinamômetro de tração (CONTENCO 3003 N, capacidade de carga 18 kN e resolução de 1N). Devido à elevada variabilidade desse tipo de ensaio, o número de amostras por variável analisada foi igual a vinte quatro.

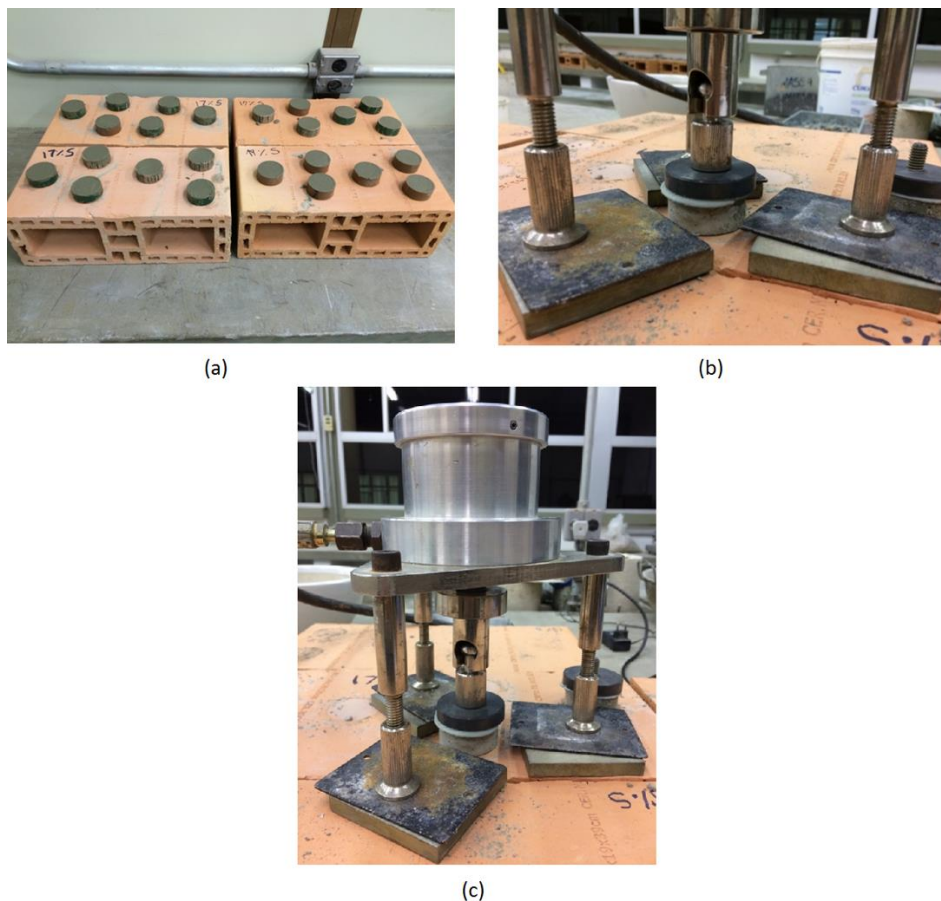


Figura 13 - (a) Parte das amostras aderidas ao substrato cerâmico; (b) detalhe do encaixe entre dinamômetro de tração acoplado à pastilha; (c) ensaio de aderência à tração sendo executado
Fonte: Autoria própria (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DEFINIÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE ADITIVO

A partir das curvas obtidas no ensaio de mini abatimento pelo tronco de cone, determinou-se o teor de aditivo dispersante para obtenção de um espalhamento de 160 mm para cada matriz (sem e com calcário) em seu respectivo teor de água (13%, 15% e 17%), como mostrado na Figura 14 e especificado na Tabela 4.

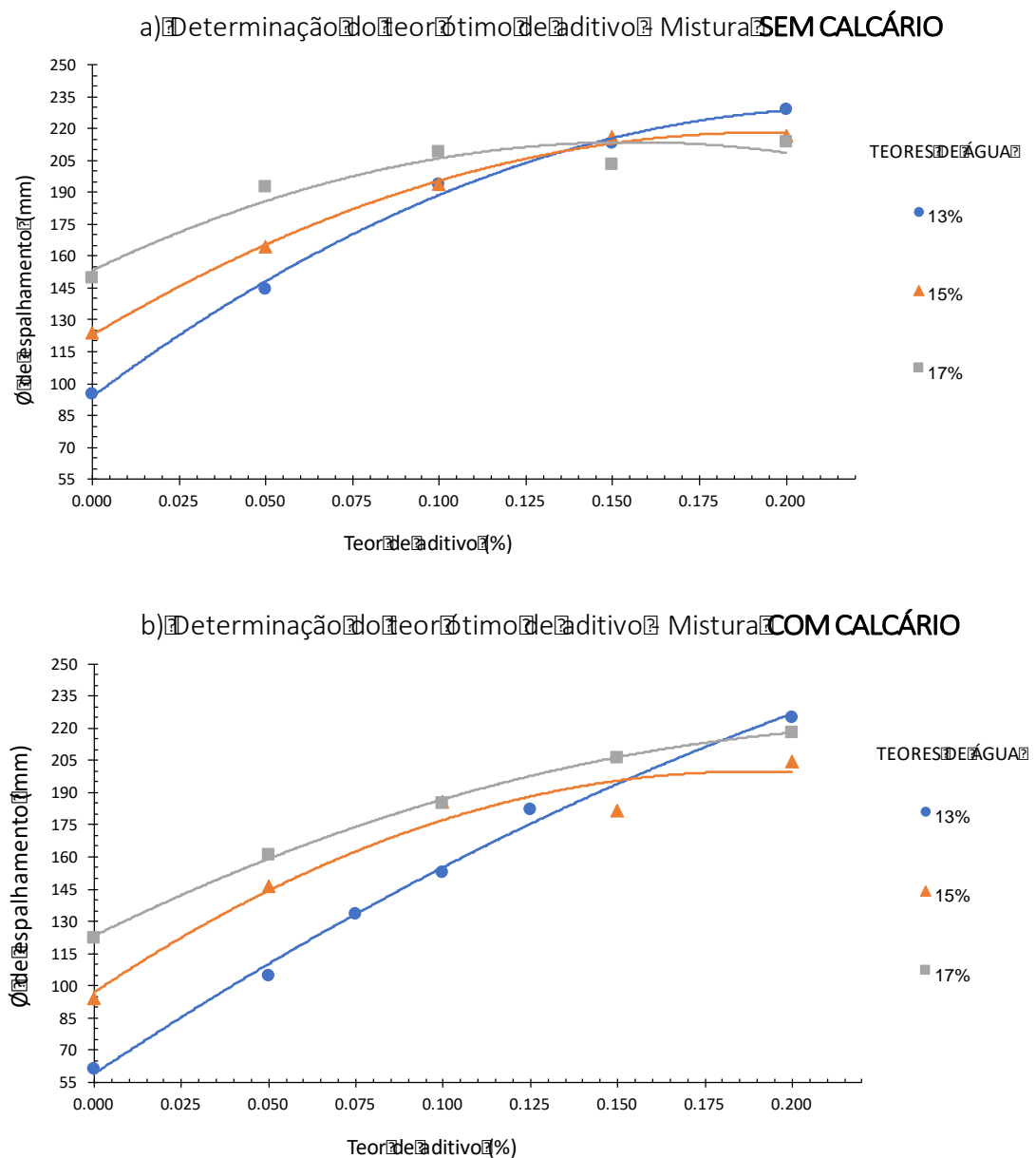


Figura 14 - Curvas obtidas no ensaio de mini-abatimento pelo tronco de cone para as argamassas a) sem calcário e b) com calcário para os diferentes teores de água
Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 4 - Teores ótimos de aditivo das argamassas

Teor de substituição	Teor de água (%)	Equação da Curva ($y = 160\text{mm}$)	Valor da menor raiz = teor ótimo de aditivo (%)
SEM CALCÁRIO (0%)	13	$y = -2754,3x^2 + 1223,5x + 93,952$	0,063
	15	$y = -2496,2x^2 + 975,5x + 122,88$	0,043
	17	$y = -2501,9x^2 + 776,98x + 153,3$	0,009
COM CALCÁRIO (30%)	13	$y = -1242,4x^2 + 1087,1x + 58,935$	0,106
	15	$y = -2906,7x^2 + 1093,3x + 96,917$	0,071
	17	$y = -1632,4x^2 + 799,54x + 123,23$	0,051

Fonte: Autoria própria (2017).

Na Tabela 4, observa-se que na medida em que o teor de água é aumentado menor a quantidade de aditivo dispersante necessária para a obtenção de uma pasta com consistência de 160 mm. Os resultados também mostram que para um mesmo teor de água, as argamassas com calcário requerem maior quantidade de aditivo. Isso pode ser explicado pela presença de maior quantidade de materiais com menor granulometria presentes na mistura.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

As argamassas foram caracterizadas de acordo com a densidade de massa, o teor de ar incorporado e o índice de consistência; sendo seus resultados expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização das argamassas no estado fresco.

Argamassa	Teor de água (%)	ρ fresca (g/cm^3)	ρ teórica (g/cm^3)	Teor de ar incorporado (%)	Índice de consistência (mm)
SEM CALCÁRIO (0%)	13	2,02	2,38	14,96	244,67
	15	2,03	2,35	13,51	283,33
	17	2,05	2,33	11,80	302,67
COM CALCÁRIO (30%)	13	1,97	2,34	16,10	266,67
	15	2,03	2,32	12,61	295,33
	17	2,06	2,30	10,23	320,67

Fonte: Autoria própria (2017).

Não houve diferenças significativas na densidade de massa das argamassas sem e com a utilização de calcário – a diferença não passou de $0,05 \text{ g/cm}^3$. Houve uma ligeira redução no teor de ar incorporado com o acréscimo da quantidade de água para todas as argamassas.

Quanto ao índice de consistência, há uma maior fluidez da argamassa devido a uma maior quantidade de água e, também, quando se substitui parte do cimento por finos. Esse incremento da consistência das argamassas com finos refere-se provavelmente a uma maior disponibilidade de água para melhoria da trabalhabilidade na medida em que há menos cimento para consumo de água nas reações de hidratação. Tal resultado evidencia o aumento de fluidez provocado por adição de fino calcário sem que haja incremento da quantidade de água.

5.2.1 Capacidade de espalhamento da argamassa – *Squeeze-flow*

Na Figura 15 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de *squeeze-flow* das argamassas sem e com calcário para os diferentes teores de água quando aplicadas sobre substrato cerâmico e placa acrílica.

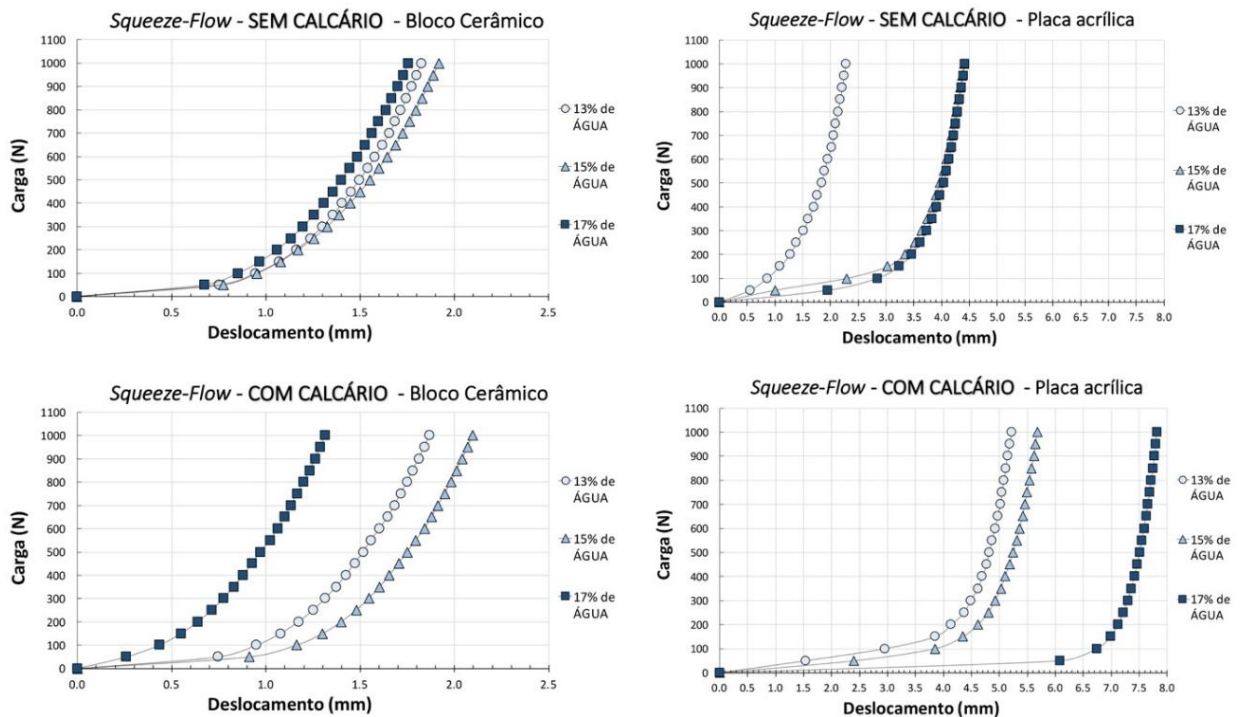


Figura 15 - Curvas de espalhamento das argamassas com e sem calcário nas diferentes superfícies estudadas
 Fonte: Autoria própria (2017).

Os resultados obtidos mostram que as argamassas com uso de finos calcários propiciam maior espalhamento no geral, excetuando-se apenas o caso com 17% na placa acrílica. Isso provavelmente ocorre porque nas argamassas com maior teor de cimento há uma redução da água disponível para a trabalhabilidade devido as reações de hidratação do cimento.

O tipo de substrato analisado interferiu na capacidade de espalhamento das argamassas. Na placa acrílica (substrato não absorvente) verificou-se que houve um aumento na capacidade de espalhamento das argamassas com o acréscimo de água. Como a água não era absorvida por nenhuma superfície, sua disponibilidade proporcionou maior trabalhabilidade, facilitando o espalhamento da argamassa sobre a superfície. Nesse substrato, também pode-se observar maior influência da presença do calcário. Percebe-se que o espalhamento da argamassa com 30% de fino calcário com 13% de água foi superior a argamassa com 17% de água na mistura sem a substituição do cimento, caracterizando um significativo aumento de trabalhabilidade e fluidez das misturas com adição de carbonato de cálcio.

No substrato cerâmico, verificou-se uma menor capacidade de espalhamento para todas as argamassas em comparação com a placa acrílica devido a absorção do substrato. Na Tabela 6 é apresentada a capacidade de absorção máxima do substrato após cinco minutos em contato com água livre medida pelo ensaio de absorvidade ao longo do tempo. Embora haja um balanço entre a capacidade de retenção de água da argamassa pela presença das partículas e absorção do substrato, é possível verificar a o efeito da retirada de água na capacidade de espalhamento da argamassa quando utilizado substrato absorvente. Resultados similares foram obtidos por Costa (2014) ao comparar o espalhamento de argamassas aplicadas sobre substratos cimentícios absorventes e não absorventes (tratados com hidrofugante).

Tabela 6 - Quantidade de água absorvida pelo bloco cerâmico após um e cinco minutos de contato com a água.

Amostra	Coefficiente de absorção (g/cm².min)	Área (cm²)	Água absorvida (g)	
Bloco cerâmico	0,067	80,12	Em 1 minuto	5,37
			Em 5 minutos	26,84

Fonte: Autoria própria (2017).

Na Figura 15, nota-se também uma redução do espalhamento ao se utilizar o teor de 17% de água para ambas as argamassas sem e com fino calcário. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de água livre presente na mistura, o que propiciou uma absorção maior e mais rápida pela superfície cerâmica. Para os valores de 13% e 15%, houve um deslocamento maior de acordo com o aumento da água. Percebe-se, então, que há um ponto em que uma quantidade de água maior que 15% e menor que 17% começa a afetar na trabalhabilidade da argamassa em um substrato cerâmico. Aliado a isto, notou-se que a argamassa com 17% de água apresentava uma separação de fases, pois a água em excesso propiciou exsudação na superfície da argamassa.

5.3 DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS

A substituição de 30% do cimento por fino calcário na composição das matrizes cimentícia propiciou uma redução na resistência à compressão das argamassas, tal como mostrado na Tabela 7. Esses resultados estão em concordância com outros autores, que avaliaram a influência da substituição de parte do cimento por finos calcários em concretos (BENTZ *et al.*, 2009; NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998) e em argamassas (BERTON; MAGRI, 2016).

Tabela 7 - Teor ótimo de aditivo encontrado pela raiz de menor valor de cada equação

Argamassa	a/c ⁽¹⁾	a/f ⁽²⁾	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Índice de vazios(%)
SEM CÁLCÁRIO (0%)	0,52	0,52	522,72	42,68 ± 1,16	8,02 ± 0,18
	0,60	0,60	505,08	37,81 ± 1,52	11,45 ± 0,78
	0,68	0,68	504,35	32,69 ± 1,18	13,99 ± 0,83
COM CÁLCÁRIO (30%)	0,74	0,52	360,30	29,91 ± 1,33	9,26 ± 1,13
	0,86	0,60	353,25	25,97 ± 0,93	13,59 ± 0,78
	0,97	0,68	350,55	20,34 ± 1,26	15,98 ± 0,63

Fonte: Autoria própria (2017).

Notas: (1) a/c = relação água/cimento.

(2) a/f = relação água/finos.

Nota-se na Tabela 7 que as argamassas com 30% de substituição do cimento por finos calcários obtiveram maior índice de vazios em todos os teores de água (13%, 15% e 17%) em comparação as argamassas sem calcário. Esse aumento da porosidade pode ser explicado pela diminuição da quantidade de produtos hidratados – efeito de diluição – diminuindo assim a resistência mecânica (MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003).

O aumento da relação água/cimento também contribuiu com a diminuição da resistência à compressão das amostras tanto sem finos quanto com finos, devido ao aumento da porosidade das argamassas (Figura 16), confirmando a Lei de Abrams. Comparando-se as misturas com e sem a presença de finos, houve um decréscimo de 29,9%, 31,3% e 37,8% nas resistências à compressão para os teores de 13, 15 e 17% de água, respectivamente.

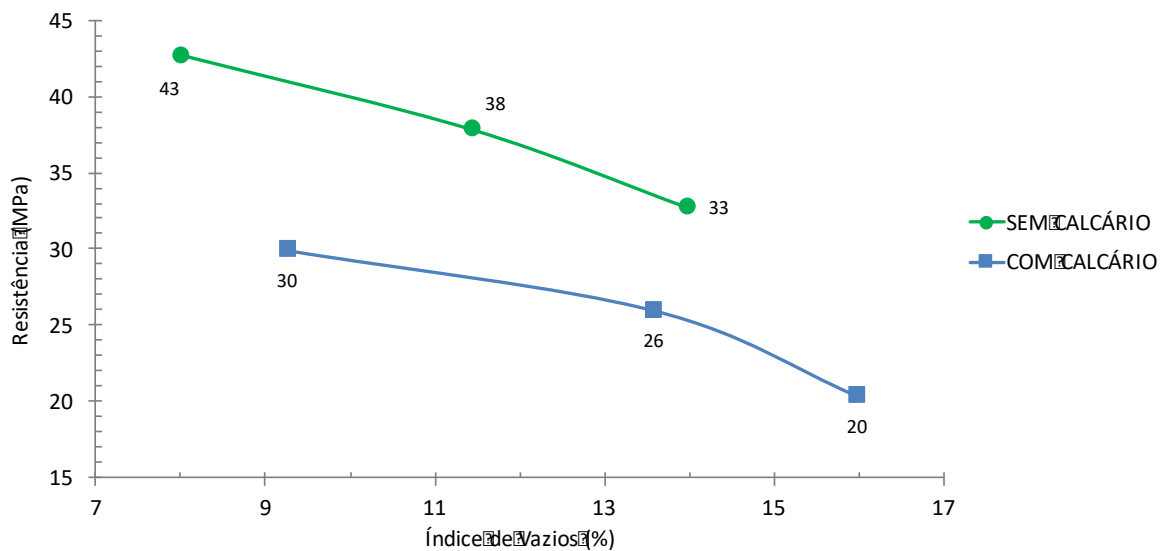


Figura 16 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios
Fonte: Autoria própria (2017).

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DA INTERFACE ARGAMASSA-SUBSTRATO

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados de resistência de aderência à tração aos 14 dias das argamassas estudadas. Observa-se que houve um aumento da aderência em função do acréscimo do teor de água das argamassas sem calcário. As argamassas com 15% e 17% apresentaram valores de resistência de aderência

4,75 e 7,50 vezes superior a argamassa com 13%. Essa argamassa apresentou baixa resistência de aderência igual a 0,03 MPa, a maioria dos corpos de prova se soltaram do substrato durante a fase de endurecimento da argamassa ou, até mesmo, durante o momento de aplicação da cola para fixação da pastilha de arrancamento.

Tabela 8 - Resistência de aderência à tração aos 14 dias e capacidade de espalhamento máximo medido pelo ensaio de *squeeze-flow* das argamassas estudadas.

Argamassa	Teor de água (%)	N ⁽¹⁾	Resistência de aderência à tração (MPa) ⁽²⁾	Espalhamento máximo sobre o substrato cerâmico (mm)	Espalhamento máximo sobre a placa acrílica (mm)
SEM CÁLCARIO (0%)	13	5	0,04 ± 0,07	1,83	2,27
	15	21	0,19 ± 0,08	1,92	4,40
	17	23	0,30 ± 0,05	1,76	4,42
COM CÁLCARIO (30%)	17	24	0,31 ± 0,06	1,32	7,82

Fonte: Autoria própria (2017).

Notas: (1) N = número de corpos de prova arrancados.

(2) O diâmetro da superfície de contato entre substrato e amostra é 44 mm.

Apesar de apresentar menor capacidade de espalhamento no ensaio de *squeeze-flow* quando aplicado sobre a placa acrílica, sobre o substrato cerâmico apresentou espalhamento superior em relação à argamassa de maior valor de aderência (17% de água). Esses resultados mostram que para as condições estudadas não houve correlação entre a capacidade de espalhamento da argamassa sobre o substrato cerâmico e a sua resistência de aderência. Maiores investigações serão necessárias para explicar o aumento significativo da aderência com o acréscimo do teor de água e os fenômenos envolvidos.

Ao analisar a influência do teor de substituição de cimento por 30% de fino calcário, verificou-se que não houve diferença entre os resultados. De acordo com a NBR 13749 (ABNT,2013), para a utilização da argamassa na aplicação de revestimentos internos, a mínima resistência recomendada é 0,20 MPa, para ambientes externos essa resistência é 0,30 MPa. Sendo assim, mesmo com a execução do ensaio aos 14 dias de idade da argamassa com 17% de teor de água,

em ambos os tipos de argamassa, se mostrou apta para utilização tanto em revestimentos internos quanto externos.

Outra observação importante a ser considerada foi o tipo de ruptura obtido no ensaio de arrancamento. Em todas as amostras analisadas, a ruptura foi do tipo adesiva, a qual ocorre na interface argamassa-substrato. Sendo assim, a matriz produzida com substituição do ligante cimentício manteve estável as forças de coesão entre os grãos de sua composição. É importante também ressaltar que nas amostras com 30% de carbonato de cálcio obteve-se o arrancamento de pequena parte da superfície do substrato em quatro amostras (Figura 17), evidenciando assim, uma boa aderência da matriz confeccionada.



Figura 17 - Pequena parte do bloco arrancado em ensaios de aderência
Fonte: Aatoria própria (2017).

6 CONCLUSÕES

Na determinação do teor ótimo de aditivo foi observado que com a incorporação do fino calcário na matriz cimentícia, e conseqüente aumento da superfície de contato dos grãos, houve maior necessidade do uso do aditivo dispersante para atingir o espalhamento desejado de 160 mm. Além disso, em ambas as composições, com e sem carbonato de cálcio, o teor ótimo de aditivo decresceu em porcentagem quando a quantidade de água na mistura aumentou.

De acordo com o índice de consistência das argamassas estudadas e os ensaios de *squeeze-flow* na placa acrílica, as que tinham calcário em suas composições demonstraram significativo ganho de trabalhabilidade quando comparadas às sem adições minerais. Tal afirmação foi validada pelo fato das matrizes com calcário terem apresentado maiores deslocamentos quando submetidas à compressão de até 1 kN na velocidade de 0,10 mm/s, para todos os teores de água estudados (13, 15 e 17%). Sendo assim, no caso da argamassa de 17 %, a qual obteve o maior deslocamento sobre a placa, o espalhamento sobre o substrato provavelmente contribuiu com o ganho de aderência da matriz cimentícia.

Entretanto, nos ensaios de *squeeze-flow* no bloco cerâmico, especificadamente para o teor de 17% de água, ficou evidenciado que havia água em excesso mesmo levando em consideração a absorvidade do bloco em cinco minutos de contato. Desse modo, a mistura com 15% de água se mostrou superior por apresentar melhor trabalhabilidade, sem ocorrência de exsudação.

A substituição de 30% da massa de cimento pelo carbonato de cálcio resulta na redução do desempenho mecânico à compressão da matriz cimentícia. Entretanto, não diminui a aderência desta quando aplicada aos blocos cerâmicos. Os resultados obtidos evidenciam que é possível substituir 30% do ligante pelo CaCO_3 e ainda obter uma argamassa com resistência à compressão acima de 20 MPa. Quanto à aderência ao substrato, para misturas com o teor de água de 17%, os resultados demonstram a possibilidade da utilização dessa argamassa tanto em revestimentos externos quanto internos. Além disso, não houve diferença significativa desta argamassa quando comparada a argamassa sem calcário para o mesmo teor de água.

Os resultados obtidos mostram, de maneira geral, que substituir o cimento por finos calcários impacta mais diretamente na resistência à compressão do que na resistência de aderência à tração. No que diz respeito à porosidade, foi possível perceber o aumento entre 1 e 2% no índice de vazios das amostras com finos quando comparadas às sem finos, para todos os teores de água. Sendo esse fator determinante para uma menor resistência à compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MacGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, 1994.

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L. de A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Águila-Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**, v. 1, n. 11, p. 57-66, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **214.4R**: guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results. Farmington Hills, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland com Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **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, 2005.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H.. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V.; São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003.

BARBOSA, W. S. **Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada a substratos porosos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BENTZ, D. P.; IRASSAR, E. F.; BUCHER, B.; WEISS, W. J. Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/c Concretes: an analysis based on Powers' model. **Concrete International**, v. 31, 2009.

BERTON, R.; MAGRI C. H. R. **Efeito da redução do teor de cimento no desempenho de matrizes e compósitos cimentícios**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BHANJA, S.; SENGUPTA, B. Modified water-cement ratio law for silica fume concretes. **Cement and Concrete Research** **33**, p. 447-450, 2003.

BONEN, D. e SARKAR, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parameters affecting flow loss. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 7, p. 1423-34, July 1995.

BONAVETTI, V.; DONZA, H; RAHAL, V. and IRASSAR, E.F., High- Strength Concrete with limestone filler cements. In: SECOND CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. **Proceedings...** Gramado, 1999.

BORTOLUZZO, C. W.; LIBORIO, J. B. L. Determinação das tensões devidas à retração impedida em argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, III. 1999, Vitória. **Anais...** Vitória: ANTAC, p. 125-136, 1999.

BRAGA, M.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, n. 1, p. 960-968, nov. 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9. ed. p. 984, 2014.

CARASEK, H.; **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e engenharia de Materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

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

CASTRO, A. L.; **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COLLEPARDI, M. Water Reducers/Retarders. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, p. 116-209, 1984.

_____. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 103-112, 1998.

_____. Advances in superplasticizing admixtures. In: New Spiratos Symposium on Superplasticizers. Proceedings of a Symposium Honouring... Bucharest, Romania: CANMET/ACI, p. 13-36, 2003.

COLLEPARDI, S.; COLLEPARDI, M.; COPPOLA, L.; TROLI, R. Mechanisms of Action of Different Superplasticizers for High Performance Concrete. Gramado In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. 2. **Proceedings...** p. 503-523, 1999.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. 2014. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COUTINHO, A. de S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: LNEC editora v.1, p. 610, 1997.

DAIMON, M.; ROY, D. M. Rheological properties of cement mixes: I. methods, preliminary experiments, and adsorption studies. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 8, n. 6, p. 753-764, 1978.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**, p. 277, 2011.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research** 31, p. 245-255, 2001.

FIORITO, Antônio J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos**. 1ª Ed. São Paulo, PINI, 2003.

IWASAKI, N. Estimation of workability – Why has the slump remained being used so long. **Concrete Journal**, v. 21, n. 10, p. 4-12, 1983.

JOLICOEUR, C. e SIMARD, M. A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 87-101, 1998.

LAGERBLAD, B.; VOGT, C. **Ultrafine particles to save cement and improve concrete properties**. CBI report, 2004.

LANGE, F.; MOËRTEL, N.; RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. **Cement and Concrete Research** 27, p. 1481, 1997.

MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. In: Second CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, **Proceedings...** Gramado, p. 615-34, 1999.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON. p. 381-397, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. 2014.

MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 61-67, 2003.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. de. Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo, 2008.

MORAES, R. D. C. **Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2001.

NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. Pisos Auto-nivelantes. Propriedades e Instalações. **II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Salvador, 1997.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P. C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles, *Cem. Concr. Res.* V. 28, n. 5, p. 687-697, 1998.

NEVILLE, A. M. M.; BROOKS, J. J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. 2013.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. **Pini**. São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, I. R. DE; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, São Paulo, 2000.

PAES, I. N. L.; ANDRADE, M. A. S.; ANGELIM, R. R.; HASPARYK, N. P.; OLIVEIRA, R. A.; PASSOS, J. S.; THON, D. G.; CARASEK, H. The effect of calcareous fines on the properties of coating mortars. In: III BRAZILIAN SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY OF MORTARS (SBTA). **Proceedings...** Brazil: Vitória, p. 335–47, 1999,

RAMACHANDRAN, V. S. Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology. **Noyes Publications**, Park Ridge, Nova Jersey, 1995.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M. Superplasticizers. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, p. 211-68, 1984.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M.; JOLICOEUR, C.; SPIRATOS, N. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. 1. ed. Ottawa, Canada: CANMET, p. 404, 1998.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 298, 1984.

SELLEVOLD, E. J.; BAGER, D. H.; JENSEN, E. K.; KNUDSEN, T. **Silica fume – cement pastes: hydration and pore structure**. Norwegian Institute of Technology, Trondheim, p. 19-50, 1982.

SELMO S., **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 251, 1989.

SILVA, F. G. D. **Estudo do concreto de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 236, 2006.

SILVA, N. G. DA; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE P. J. P. **A influência dos finos de areia de britagem de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento**, 2007.

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. In: Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem II. 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo, p. 1-12, 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimentos por regiões e estados em 2015**. 2015. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/25set1024/numerospag/ProducaoRegional2015.gif> >. Acesso em 31 out. 2016.

SPONHOLZ, I. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. 1998. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

TAHA, M. M. R.; SHRIVE, N. G. The use of pozzolans to improve bond and bond strength. In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9th, 2001, Fredericton. **Proceedings...** Fredericton: University of New Brunswick, 2001.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D.; ONODA, S. Effect of electrostatic and steric repulsive force of organic admixture on the dispersion of cement particles in fresh

cement paste. In: 10th International Congress on the Chemistry of Cement, 1997, Sweden. **Proceedings...** Gothenburg, Sweden, p. 277-84, 1997.

VOIGT, C. **Ultrafines particles in concrete: influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. 2010. 177 f. Doctoral (Thesis) – School of Architecture and the Built Environment – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; LIU, X. The Filling role of pozzolanic material. **Cement and Concrete Research** **26**, p. 943-947, 1996.

YAMAMOTO, Y. e KOBAYASHI, S. Effect of temperature on the properties of superplasticized concrete. **ACI Journal**, v. 83, n. 1, p. 80-88, jan.1986.