

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL

HENRIQUE DUARTE SALES CARVALHO

**Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes
Utilizando Adições Mineraias Como Substitutos Parciais do Cimento
Portland.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

FLORIANÓPOLIS

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

CARVALHO, HENRIQUE DUARTE SALES
ANÁLISE DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM ARGAMASSAS
AUTONIVELANTES UTILIZANDO ADIÇÕES MINERAIS COMO SUBSTITUTOS
PARCIAIS DO CIMENTO PORTLAND / HENRIQUE DUARTE SALES
CARVALHO ; orientador, Malik Cheriaf - Florianópolis, SC,
2015.
138 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Adições Minerais. 3. Argamassa.
4. Autonivelante. 5. Retração por Secagem. I. Cheriaf,
Malik . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

HENRIQUE DUARTE SALES CARVALHO

**ANÁLISE DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM ARGAMASSAS
AUTONIVELANTES UTILIZANDO ADIÇÕES MINERAIS
COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO PORTLAND.**

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Dr. Malik Cheriaf.
(Orientador)

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki - UNESP

Prof. Dr. Alexandre Lima de Oliveira - IFSC

Prof. Dr. Luiz Alberto Gomes - UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Malik Cheriaf pela oportunidade e por me orientar durante essa nova etapa da minha vida.

Agradeço a minha querida mulher Vanessa Falavigna pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus Pais que sempre demonstraram grande empenho ao trabalho e que me inspiram com sua história de desafios e conquistas. Vocês possuem a minha admiração e são exemplos nos quais eu busco me espelhar.

A professora Janaíde Rocha pelo auxílio em sanar dúvidas pertinentes a pesquisa e no delineamento da fase experimental.

Aos colegas do grupo de pesquisa VaLores, pelo apóio, auxílio no laboratório e pela convivência.

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção Civil e também ao funcionário Roque Medeiros pela ajuda e pelos momentos de descontração.

A todos meus amigos que me apoiaram e incentivaram nessa etapa da minha vida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro de concessão da bolsa de pesquisa.

RESUMO

Uma das principais dificuldades geradas na produção de argamassas autonivelantes para pisos está relacionada com o empenamento dos cantos (*curling*), ocasionado pela retração.

A utilização de adições minerais é um tema que vem sendo explorado na área de materiais de construção civil com a finalidade de melhorar as propriedades das argamassas autonivelantes. Dessa forma, foi analisada a influência da adição de finos de RCD e CZP nas propriedades das argamassas autonivelantes, principalmente relacionadas com a retração.

Parte do cimento Portland foi substituído pelos finos (FC, RCD e CZP) em teores de 10, 15 e 20%. A dosagem foi realizada em função do espalhamento e da consistência necessárias em argamassa autonivelantes no estado fresco. Em seguida, foram realizados os ensaios de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração e por fim variação (retração linear) e estabilidade (*curling*) dimensional.

Os resultados demonstram que a adição de finos de CZP nas misturas apresentou eficiência para reduzir a retração por secagem em argamassas autonivelantes. A mistura ternária (CP, FC e CZP) demonstrou os menores valores de empenamento dos cantos (*curling*). As amostras quaternárias de aglomerantes (CP, FC, RCD e CZP) apresentaram resultados mais eficientes, quando comparada com a referência (CP e FC). Com isso, conclui-se que os materiais testados apresentaram um potencial promissor para realização de pesquisas futuras e de aplicação na construção civil.

Palavras chave: Adições Minerais, Argamassa Autonivelante e Retração por Secagem.

ABSTRACT

One of the major difficulties involved with the production of self-leveling mortar flooring is related with the feathering of edges (curling), caused by shrinkage.

The use of mineral additions is a theme that has been explored in the area of construction materials in order to improve the properties of self-leveling mortars. For this mean, an analysis over the influence of fine additions CZP and RCD on the properties of self-leveling mortars, mainly related to the durability was realized.

Part of the Portland cement was replaced by fines (FC, RCD and CZP) in amounts of 10, 15 and 20%. Measurements were realized according to the required properties of self-leveling mortar in the fresh state. Then, the mechanical strength, capillary water absorption, tensile adhesion strength and finally range (linear shrinkage) and stability (curling) dimension tests were performed.

The results revealed that the addition of fine CZP in the mixtures was effective to reduce drying shrinkage of self-leveling mortars. The ternary mixture (CP, FC and CZP) demonstrated the lowest values to warping of corners (*curling*). The quaternary mixtures of binders (CP, CF, RCD and CZP) showed more efficient results compared with the reference (CP e FC). Therefore, one can conclude that the materials tested at the present study exhibit a promising potential for future research and for building constructions.

Keywords: Mineral Additions, Self-leveling Mortar and Drying Shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ARGAMASSA AUTONIVELANTES.....	27
FIGURA 2: CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO CIMENTO PORTLAND, AGREGADO NATURAL E AGREGADOS RECICLADOS.....	34
FIGURA 3: IMAGEM MEV - CINZA PESADA (CZP).....	36
FIGURA 4: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ADIÇÕES, CIMENTO PORTLAND E AREIA.....	37
FIGURA 5: IMAGENS DA MICROESTRUTURA DAS ADIÇÕES MINERAIS: A) CINZA VOLANTE; B) <i>FILER</i> CALCÁRIO; C) FINOS DE RESÍDUOS CERÂMICO; D) CAULIM.	38
FIGURA 6: ENSAIO DE ESPALHAMENTO (<i>SLUMP FLOW</i>) E TEMPO DE FLUXO NO FUNIL DE ARGAMASSA AUTO ADENSÁVEIS FEITAS COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE <i>FILER</i> CALCÁRIO.....	39
FIGURA 7: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (3, 7 E 28 DIAS) DE ARGAMASSA AUTO ADENSÁVEIS MOLDADAS COM DIFERENTES TEORES DE <i>FILER</i> CALCÁRIO.	40
FIGURA 8: RESISTÊNCIA MECÂNICA, AOS 28 DIAS DE IDADE.	42
FIGURA 9: ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA DIFERENTES COMBINAÇÕES DE ADIÇÕES MINERAIS NAS IDADES DE 3, 7 E 28 DIAS.....	43
FIGURA 10: TEOR DE ADITIVO SP PARA DIFERENTES PORCENTAGENS DE ADIÇÕES MINERAIS.	44
FIGURA 11: TEMPOS DE FLUXO PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	45
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE DISPERSÃO DOS SUPERPLASTIFICANTES COM BASE POLICABORXILATO.....	48
FIGURA 13: MINI CONE PARA ENSAIO DE ESPALHAMENTO EM ARGAMASSA AUTONIVELANTE.	51
FIGURA 14: ENSAIO DE ESPALHAMENTO. LADO ESQUERDO: NIVELAMENTO (ARRASADURA) DO MINI CONE. LADO DIREITO: MEDIDAS ORTOGONAIS DOS DIÂMETROS.....	51
FIGURA 15: TRABALHABILIDADE DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE EM FUNÇÃO DO TEMPO	53
FIGURA 16: CURVAS GRANULOMÉTRICAS E LIMITES CONFORME ASTM PARA AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO.	56
FIGURA 17: RETRAÇÃO EM SISTEMAS DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES UTILIZANDO <i>FILER</i> CALCÁRIO E DIFERENTES ADIÇÕES TERNÁRIAS (20%). 64	
FIGURA 18: RETRAÇÃO EM SISTEMAS DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES UTILIZANDO CINZA VOLANTE E DIFERENTES ADIÇÕES TERNÁRIAS (20%). 64	
FIGURA 19: EFEITO DO EMPENAMENTO DAS BORDAS EM ARGAMASSA AUTONIVELANTES.	67
FIGURA 20: DESLOCAMENTO MÉDIO VERTICAL DOS CANTOS.....	67
FIGURA 21: APARATO UTILIZADO PARA MEDIR OS EMPENAMENTOS DAS BORDAS (<i>CURLING</i>).	68

FIGURA 22: RESULTADOS DE EMPENAMENTO DAS BORDAS (CURLING).	69
FIGURA 23: RETRAÇÃO POR SECAGEM EM ARGAMASSAS, AOS 63 DIAS DE IDADE, EM FUNÇÃO DO TOTAL DE GRÃOS INFERIORES A 75 μ M.....	70
FIGURA 24: FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES DA METODOLOGIA PROPOSTA.	71
FIGURA 25: FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO, COLETA E PREPARAÇÃO DE RCD.	73
FIGURA 26: PROCESSO DE QUEIMA DE CARVÃO EM USINAS TERMELÉTRICAS.	74
FIGURA 27: EQUIPAMENTO MICROTRAC S3500.	77
FIGURA 28: EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO EDX.	78
FIGURA 29: APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE COMPATIBILIDADE DE ADITIVO.	80
FIGURA 30: SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR FINOS(FC, RCD E CZP).	81
FIGURA 31: ENSAIO DE ESPALHAMENTO NA MESA.	83
FIGURA 32: APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DAS ARGAMASSAS.....	85
FIGURA 33: RECIPIENTE CILÍNDRICO E FIO TERMOPAR (ESQUERDA) E AMOSTRA NA CAIXA TÉRMICA (DIREITA).	85
FIGURA 34:RECIPIENTE COM AMOSTRA (ESQUERDA) E APARATO PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DAS ARGAMASSAS (DIREITA).....	86
FIGURA 35:EVOLUÇÃO DA LIBERAÇÃO DE CALOR EM FUNÇÃO DO TEMPO. ..	86
FIGURA 36: EQUIPAMENTO PARA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA.....	88
FIGURA 37: APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.	89
FIGURA 38: APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO. ..	90
FIGURA 39: APARATO UTILIZADO NOS ENSAIOS DE <i>CURLING</i> E RETRAÇÃO LINEAR.....	91
FIGURA 40: CORTE ESQUEMÁTICO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIR A ESTABILIDADE DIMENSIONAL.	92
FIGURA 41: LOCALIZAÇÃO E NUMERAÇÃO DOS LVDTs PARA MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DO <i>CURLING</i> E DA RETRAÇÃO LINEAR.....	92
FIGURA 42: CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA NATURAL.....	93
FIGURA 43: GRÁFICO DE GRANULOMETRIA DOS FINOS.....	94
FIGURA 44: TEMPOS DE ECOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO - ADITIVO A.	97
FIGURA 45: TEMPOS DE ECOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO - ADITIVO B.	99
FIGURA 46: ESPALHAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO SP PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.....	100
FIGURA 47: ESPALHAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO SP PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.....	101
FIGURA 48: ESPALHAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO SP PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 20% DE SUBSTITUIÇÃO.....	101

FIGURA 49: SINAIS DE EXSUDAÇÃO EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES DE REFERENCIA (FC10) DISPOSTAS EM PLACAS DE VIDRO.	102
FIGURA 50: RESULTADOS DE T_{25} ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	107
FIGURA 51: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	108
FIGURA 52: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	108
FIGURA 53: TEMPOS INÍCIO DA ACELERAÇÃO DAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	109
FIGURA 54: TEMPERATURAS MÁXIMAS DE HIDRATAÇÃO DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	110
FIGURA 55: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	111
FIGURA 56: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	112
FIGURA 57: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	113
FIGURA 58: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	114
FIGURA 59: ABSORÇÃO CAPILAR EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	115
FIGURA 60: ABSORÇÃO CAPILAR EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	116
FIGURA 61: SORPTIVIDADE EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	116
FIGURA 62: SORPTIVIDADE EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	117
FIGURA 63: COEFICIENTE DE SORPTIVIDADE DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	117
FIGURA 64: AMOSTRAS APÓS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.	120
FIGURA 65: VALORES DE RETRAÇÃO LINEAR.	121
FIGURA 66: VALORES DE RETRAÇÃO LINEAR DAS AMOSTRAS.	122
FIGURA 67: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC 10.	123
FIGURA 68: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + RCD 10.	123
FIGURA 69: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + CZP 10.	124
FIGURA 70: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + RCD + CZP 10.	124
FIGURA 71: VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DA AMOSTRA FC 15.	125
FIGURA 72: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + RCD 15.	125
FIGURA 73: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + CZP 15.	126
FIGURA 74: VALORES DE <i>CURLING</i> DA AMOSTRA FC + RCD + CZP 15.	126
FIGURA 75: DESLOCAMENTOS MÉDIOS DOS CANTOS E CENTRO DAS PLACAS.	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VOLUME DE RCD E TRATAMENTO.	32
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS UTILIZADOS.	33
TABELA 3: PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS.....	35
TABELA 4: PROPORÇÕES DE MISTURA PARA CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (VOLUME DE CONCRETO = 1M ³).	56
TABELA 5: RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETOS AUTO ADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO COM DIFERENTES TEORES DE AGREGADOS RECICLADOS.	57
TABELA 6: CLASSE E LIMITES DE ESPALHAMENTO DO CONCRETO AUTO ADENSÁVEL EM FUNÇÃO DE SUA APLICAÇÃO.	58
TABELA 7: VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS PARA OS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO DO CONCRETO AUTO ADENSÁVEL, CONFORME EFNARC (2002).	58
TABELA 8: CLASSE E LIMITES DE VISCOSIDADE DO CONCRETO AUTO ADENSÁVEL EM FUNÇÃO DE SUA APLICAÇÃO.	59
TABELA 9: FICHA TÉCNICA ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES.	75
TABELA 10: METODOLOGIA PESQUISA: ETAPA, ENSAIO E OBJETIVO.....	75
TABELA 11: IDENTIFICAÇÃO DAS PASTAS.	79
TABELA 12: IDENTIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	81
TABELA 13: VALORES DE ESPALHAMENTO PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.	83
TABELA 14: MASSA ESPECÍFICA MATERIAIS 95	95
TABELA 15: ÁREA ESPECÍFICA MATERIAIS 95	95
TABELA 16: ANÁLISE QUÍMICA DOS MATERIAIS..... 96	96
TABELA 17: VALORES DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO.	96
TABELA 18: TEMPOS DE ESCOAMENTO INICIAL E RETENÇÃO DA FLUIDEZ EM PASTAS.....	97
TABELA 19: TEMPOS DE ESCOAMENTO INICIAL E RETENÇÃO DA FLUIDEZ EM PASTAS.....	99
TABELA 20: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO (CM).	105
TABELA 21: TRAÇOS ESCOLHIDOS NA PESQUISA.	105
TABELA 22: ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10 E 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	106
TABELA 23: TEMPOS DE ESPALHAMENTOS (SEGUNDOS).	106
TABELA 24: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (%).	114
TABELA 25: RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 10% DE SUBSTITUIÇÃO.	119
TABELA 26: RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO.	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c - Relação água/cimento

CAC - Cimento de Aluminato de Cálcio

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

CZP - Cinza Pesada

FC - Filer Calcário

CP - Cimento Portland

EFNARC - *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

VaLores - Laboratório de Valorização de Resíduos

SP - Superplastificante

CONAMA - Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente

LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil

EDX - Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

LVTD - *Linear Variable Differential Transformer*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO GERAL.....	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	ARGAMASSA AUTONIVELANTE	27
2.1.1	Vantagens e Desvantagens da Argamassa Autonivelante	28
2.2	AGREGADOS	29
2.2.1	Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	30
2.2.2	Cinza Pesada (CZP).....	35
2.3	ADIÇÕES EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....	36
2.4	AGLOMERANTES PARA ARGAMASSA AUTONIVELANTE 45	
2.4.1	Cimento Portland.....	46
2.5	ADITIVOS PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....	47
2.5.1	Aditivos Redutores de Água.....	47
2.5.2	Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV).....	50
2.6	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES 51	
2.6.1	Trabalhabilidade.....	51
2.6.2	Segregação.....	60
2.6.3	Exsudação.....	62
2.6.4	Retração.....	63
2.6.5	Retração Autógena	65
2.6.6	Retração por Secagem	66
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.1	MATERIAIS	72
3.1.1	Aglomerante	72
3.1.2	Adições.....	72

3.1.3	Agregado Natural	74
3.1.4	Aditivos	74
3.1.5	Água	75
3.2	METODOS	75
3.2.1	Beneficiamento dos finos	76
3.2.1.1	Britagem do RCD	76
3.2.1.2	Moagem do RCD	76
3.2.1.3	Peneiramento dos Finos	76
3.2.2	Caracterização dos Materiais	76
3.2.2.1	Análise Granulométrica	77
3.2.2.2	Granulometria à Laser	77
3.2.2.3	Massa Específica	77
3.2.2.4	Área Específica	77
3.2.2.5	Análise Química	78
3.2.2.6	Absorção em placas de Concreto (substrato):	78
3.2.3	Estudo em Pasta	78
3.2.3.1	Aditivos	79
3.2.4	Estudo em Argamassas	80
3.2.4.1	Ensaio no Estado Fresco	82
3.2.4.2	Ensaio no Estado Endurecido	87
4	RESULTADOS E ANÁLISES	93
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	93
4.1.1	Análise Granulométrica	93
4.1.2	Granulometria à Laser	94
4.1.3	Massa Específica	94
4.1.4	Área Específica	95
4.1.5	Análise Química	95
4.1.6	Absorção em placas de concreto (substrato)	96
4.2	ESTUDO EM PASTAS	97

4.2.1	Aditivos	97
4.3	ESTUDO EM ARGAMASSAS	100
4.3.1	Ensaio no Estado Fresco	100
4.3.1.1	Espalhamento na Mesa	100
4.3.1.2	Evolução da Temperatura de Hidratação das Argamassas	107
4.3.2	Ensaio no Estado Endurecido	111
4.3.2.1	Resistência à Compressão.....	111
4.3.2.2	Resistência à Tração na Flexão.....	113
4.3.2.3	Absorção de Água por Capilaridade	114
4.3.2.4	Resistência de Aderência à tração.....	119
4.3.2.5	Varição Dimensional (Retração Linear)	121
4.3.2.6	Estabilidade Dimensional (curling)	122
5	CONCLUSÕES	129
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
7	REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

O extraordinário desenvolvimento tecnológico alcançado na contemporaneidade influenciou profundamente o crescimento e modernização da construção civil. Entre os diversos fatores que influenciaram este desenvolvimento, pode-se destacar a utilização de novos materiais que agregam qualidade desejada ao produto final e aperfeiçoam a execução do empreendimento. A utilização de materiais mais eficientes, por demonstrarem características como maior resistência mecânica e durabilidade, podem ser consideradas como diferencial para empresas que buscam destacar-se no mercado atual, altamente competitivo e exigente.

As argamassas autonivelantes e os concretos auto adensáveis são compostos cimentícios que apresentam a propriedade de auto consolidação, sem intervenção manual (vibração), permitindo com isso a minimização de problemas com execução, como por exemplo, falhas de concretagem e segregação dos agregados.

Estas argamassas são utilizadas principalmente em revestimentos de pisos, uma vez que possuem a propriedade de adensamento por ação da gravidade de forma coesa e homogênea, ou seja, devem ser capazes de escoar facilmente apenas sob seu peso próprio, não necessitando de intervenção mecânica ou manual para se autonivelar. Esta característica é alcançada com a otimização das dosagens, proporcionando ao material uma reologia que o torna fluído o bastante para se auto nivelar sem que aconteça exsudação, segregação ou retração.

As composições das argamassas autonivelantes envolvem principalmente aditivos químicos, adições minerais, agregados (com granulometria fina) e aglomerantes, sendo que estes componentes podem ser utilizados isoladamente, em misturas binárias, ternárias ou quaternárias.

De acordo com Le-Bihan et al. (2012) a argamassa e concreto são materiais porosos, que são propensos a sofrer variações de volume devido ao encolhimento durante a hidratação e secagem. Em particular, o desenvolvimento de argamassas autonivelantes à base de cimento ainda é limitado por causa de problemas como fissuras ou empenamento dos cantos.

Estas fissuras são ocasionadas pela retração por secagem. A retração em sistemas autonivelantes é influenciada pelo elevado teor de partículas finas necessárias para atingir a fluidez eficaz (ONISHI E

BIER, 2010; BENABED et al. 2012). As partículas finas demandam mais água, quando comparada com os grãos maiores, devido à maior área de superfície específica. Com isso, as argamassas autonivelantes tendem a gerar uma maior variação de volume e conseqüentemente, originarem fissuras. Portanto, esta é uma problemática que justifica o desenvolvimento de novas pesquisas científicas.

Com objetivo de reduzir a retração existe uma tendência de buscar materiais alternativos que proporcionem otimização das propriedades de durabilidade das argamassas autonivelantes. Com isso, as adições minerais vêm sendo avaliadas em pesquisas científicas, como substitutos parciais do cimento Portland.

Os resíduos são materiais que geram grande interesse em uma sociedade cada vez mais focada na consciência ambiental e redução de custos. As cinzas são resíduos originados em Termoelétricas após queima de carvão. Conforme Andrade et al. (2009), as cinzas, quando utilizadas como substitutos parciais de agregados miúdos naturais, apresentam um potencial eficaz para produção de argamassas e concretos. A Cinza Pesada (CZP) pode promover uma melhor cura interna do concreto, sem que ocorram grandes forças de pressão capilar, tornando o sistema menos susceptível a deformações ou fissuras.

Empreendimentos com certificado LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) podem ser considerados como diferenciadas no mercado atual onde grande parte da sociedade valoriza a sustentabilidade. O LEED é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações, utilizado em 143 países, e possui o intuito de incentivar a transformação dos projetos, obra e operação das edificações, sempre com foco na sustentabilidade de suas atuações.

O acelerado crescimento da indústria da construção civil nos tempos modernos tem proporcionado importante desenvolvimento tecnológico na área de materiais, no entanto, o volume de resíduos gerados em processo de construção e demolição tem aumentado significativamente, principalmente nos grandes centros urbanos.

O volume de RCD (Resíduos de Construção e Demolição) produzido nas cidades brasileiras tem provocado discussão nacional sobre a reciclagem como uma alternativa à eliminação de resíduos, de modo a reduzir os gastos em aterros e para criar consciência sobre a degradação ambiental, seguindo a tendência dos países desenvolvidos (MIRANDA e SELMO, 2006).

Na última década, o agregado reciclado (RCD), obtido a partir de resíduos de construção e demolição, tem sido utilizado na produção de novos materiais. A escassez de agregados naturais e a saturação de

aterros têm incentivado o uso de RCD para produção de novos concretos e argamassas. Além disso, o aumento da distância entre as fontes de agregados naturais e os locais de construção, permite considerar a alternativa de utilização do RCD como agregado. Neste contexto, a reciclagem de resíduos da construção civil é importante porque pode reduzir a poluição ambiental e diminuir o enorme consumo de agregados naturais, proporcionando minimização de custo no processo produtivo.

Um dos problemas gerados no processo de reciclagem e utilização do RCD encontra-se diretamente relacionado com a fração fina (grãos inferiores a 15 μm de diâmetro). Durante o processo de trituração e moagem uma grande parcela de partículas finas é gerada e com isso parte desse material é encaminhado para lagoas de estabilização e assim são gerados resíduos. Tendo em vista que as partículas maiores, com granulometria compatível com agregados miúdos e graúdos naturais, vêm sendo largamente utilizadas para confecção de novos materiais e geração de novas pesquisas científicas, as partículas finas de RCD ainda não possibilitam grandes aplicações (PEREIRA, et al. 2012). De acordo com Benabed et al. (2012) o uso de grãos finos desempenha um papel importante para aumento da fluidez em argamassas auto adensáveis. Diante de tal fato, tem se mostrado importante realização de novas pesquisas científicas que possam reinserir os grãos finos de RCD na indústria da construção civil.

Diante desse contexto, foram analisadas propriedades das argamassas autonivelantes em função da substituição de parte do cimento Portland por finos (FC, RCD e CZP).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando partículas finas de FC, RCD e CZP como substitutos parciais do cimento Portland para produção de argamassas autonivelantes com propriedades satisfatórias.

Objetivos específicos:

- Avaliar as propriedades das argamassas autonivelantes no estado plástico (fluidez, coesão, exsudação e segregação) em função das porcentagens de adições utilizadas e do teor de aditivo;
- Analisar a evolução da temperatura de hidratação das argamassas compostas com diferentes porcentagens de finos e teores de aditivos;

- Verificar a influência da adição dos finos de RCD e CZP nas propriedades de resistência mecânica, absorção de água e aderência com substrato;
- Analisar as influências da adição de finos (RCD e CZP) na variação dimensional (retração linear), visando obter indicadores de durabilidade;
- Analisar as influências da adição de finos (RCD e CZP) na estabilidade dimensional (*curling*).

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para a realização dessa pesquisa está diretamente relacionada com o desenvolvimento tecnológico de um material eficaz que proporcione desenvolvimento sustentável.

Argamassas autonivelantes são materiais relativamente novos no mercado, principalmente no Brasil, e com isso o desenvolvimento de novas pesquisas científicas pode ser considerado benéfico e promissor para aprimorar o desenvolvimento tecnológico na área de materiais de construção civil.

Para proporcionar uma maior sustentabilidade na área da construção civil, o uso de adições, inevitavelmente tende a aumentar, com isso, haverá pressões para maximizar a sua eficácia em relação ao custo, impacto ambiental, durabilidade e desempenho (TURK, 2012). O objetivo desta pesquisa é investigar a influência de adições minerais alternativas utilizadas como substituições parciais do cimento Portland nas propriedades das argamassas autonivelantes.

O elevado volume de finos gerados durante o processo de reciclagem (trituração e/ou moagem) do RCD e também a falta de aplicações comprovadas deste material (finos de RCD) na indústria da construção civil, são fatores que incentivam a realização de pesquisas.

A Cinza Pesada (CZP) coletada na bacia de sedimentação ou nas esteiras da usina termoeletrica Jorge Lacerda, em Santa Catarina, sul do Brasil, somam 840 mil toneladas de cinza pesada, anualmente. Conforme Andrade et al. (2009), a cinza pesada, apresenta grande potencial para produção de argamassas e concretos, podendo melhorar aspectos como a cura interna e a retração.

Um dos desafios de produzir argamassas autonivelantes está relacionado com o surgimento de fissuras e/ou empenamento das bordas em placas. Para reduzir estes efeitos tem-se notado nas pesquisas científicas a utilização de grãos finos como substituto parcial do cimento (Pera e Ambroise, 2004; Georgin et al. 2008; Onishi e Bier, 2010).

Diante dessa problemática, optou-se por avaliar a substituição parcial do cimento Portland por finos (FC, RCD e CZP) e analisar a influência dessa substituição sobre os efeitos do empenamento das bordas em placas (*curling*).

A utilização de finos de RCD e CZP em argamassas autonivelantes é um tema inédito no cenário nacional e muito pouco explorado em nível internacional. Com isso, a presente pesquisa busca viabilizar o uso de resíduos para que estes possam ser reinseridos no processo produtivo, e dessa forma, produzir um produto de qualidade satisfatória. Portanto, a principal justificativa desta pesquisa é produzir um material novo, eficiente, sustentável, que proporcione redução da retração e menor impacto ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSA AUTONIVELANTE

Nos últimos anos, a aplicação de argamassa autonivelante tem aumentado significativamente, principalmente em países desenvolvidos. As argamassas autonivelantes são materiais de construção civil, utilizados principalmente para renovação de substratos irregulares em prédios antigos. Tem sido também utilizados na construção de novas edificações, por criar uma superfície plana e lisa que se torna ideal para o revestimento final, como por exemplo, no revestimento cerâmico. Na Alemanha, as argamassas autonivelantes são disponibilizadas prontas para uso necessitando apenas que sejam misturadas com uma quantidade definida de água, antes de poderem ser aplicadas no local. Dependendo da qualidade da argamassa autonivelante, a sua aplicação é realizada em camadas finas, entre 10 e 20 mm de espessura, em diferentes tipos de substratos como: concreto, argamassa e madeira (SEIFERT et al. 2012).

As argamassas autonivelantes são uma nova categoria de sistemas com base cimentícia, considerada de alto desempenho, caracterizado por sua capacidade de se espalhar rapidamente e auto consolidar, sem apresentar qualquer separação significativa de seus constituintes, conforme pode ser observado na Figura 1. A homogeneidade destes compostos é necessária para assegurar características de resistência e durabilidade do produto final, portanto, é imprescindível que a mistura apresente alta estabilidade (MEHDIPOUR et al. 2013).



Figura 1: Argamassa autonivelantes.
Fonte: Pera e Ambroise (2004).

Adições minerais e aditivos químicos são componentes essenciais para sistemas de argamassa autonivelantes. Esses sistemas são caracterizados por exigir elevada fluidez e resistência à segregação (viscosidade adequada). A alta fluidez é adquirida com o uso de aditivos

Superplastificantes (SP) e a resistência à segregação é obtida através da utilização de adições minerais, uma baixa relação de água/aglomerante, e/ou, em alguns casos, a adição de um aditivo modificador de viscosidade. O teor adequado de adições minerais em formulações de argamassas autonivelantes é importante para que propriedades como a demanda de água do sistema, teor de cimento, retração, calor de hidratação, adensamento e a microestrutura possam ser otimizados e assim possamos obter maior resistência e durabilidade em sistemas de auto adensamento (RIZWAN e BIER, 2012).

Conforme Seifert et al. (2012), as propriedades exigidas em um sistema de argamassa autonivelante são numerosas, considerando sua viabilidade e suas características finais. As mais importantes são: o auto nivelamento, baixa viscosidade, adensamento rápido, tempo de pega rápido, rápido ganho de resistência, secagem rápida, estabilidade dimensional, resistência final elevada, durabilidade da superfície e uma forte adesão com o substrato. Para atender a todos esses requisitos, as argamassas autonivelantes muitas vezes contêm uma grande variedade de compostos orgânicos e inorgânicos. Esses componentes podem ser aglutinantes minerais, porém, a maioria dos componentes desse sistema é baseada em uma formulação contendo cimento. Os principais aglomerantes presentes nessas argamassas são o Cimento Portland, o cimento de aluminato de cálcio (CAC) e sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$).

2.1.1 **Vantagens e Desvantagens da Argamassa Autonivelante**

A utilização de sistema de argamassa autonivelante oferece vantagens ambientais e econômicas. Dentre essas vantagens, pode-se destacar a utilização de resíduos oriundos de outros processos, como fonte de adições para substituir parte do cimento Portland, e ainda, melhorar as características do produto final, principalmente as propriedades reológicas. Com isso, parte do cimento é substituída por adições, denominadas por alguns autores como matérias primas secundárias, proporcionando economia de cimento, e conseqüentemente, redução de custo (ALRIFAI et al. 2013).

A argamassa autonivelante proporciona maior rapidez na execução, redução de desperdício de material e economia com mão de obra, quando comparada com a argamassa convencional. A aplicação mecanizada, por meio de misturador e bomba, otimiza o transporte vertical com a redução na demanda de materiais e mão de obra no elevador cremalheira. Além disso, outros fatores como maior controle de qualidade, cura mais rápida, maior resistência à compressão e ao

arrancamento também devem ser considerados. Um exemplo da utilização de contrapiso autonivelante em uma edificação vertical, no Rio de Janeiro, foi publicado por Figuerola, 2015. A engenheira responsável pelo empreendimento, da construtora Odebrecht Realizações Imobiliárias (OR), afirma que a produtividade média para o sistema foi de 342 m²/dia, com uma equipe de nove colaboradores. A redução do cronograma é um dos principais fatores que podem levar empresas empregarem essa tecnologia. No entanto, em função da sua fluidez, argamassas autonivelantes não podem ser empregadas em superfícies inclinadas, onde escorreriam.

Segundo Katsiadramis et al. (2010), uma das maiores desvantagens das argamassas autonivelantes é sua grande demanda de água necessária para que possa atingir a fluidez satisfatória, e dessa forma, obter vantagens como rapidez na realização da atividade, minimização da mão de obra, ausência de vibração e melhor superfície de acabamento. Com o aumento do teor de água, o produto final deve apresentar menor densidade, e conseqüentemente, maior risco para exsudação e segregação dos agregados. Esse resultado pode implicar em baixos valores na resistência e na durabilidade do material produzido. Com o uso de aditivos químicos compatíveis, como aditivos SP, torna-se viável preservar a alta resistência e durabilidade do material, principalmente com os aditivos de terceira geração que tem demonstrado grandes vantagens com alta eficiência.

As partículas finas, presentes nas argamassas autonivelantes, consomem mais água, devido ao aumento da área específica, e conseqüentemente, podem aumentar a variação de volume da mistura durante o processo de endurecimento e assim provocar fissuras. Quanto maior a variação de volume gerada no material entre o estado fresco e endurecido, mais acentuada será a retração, e dessa forma, as fissuras tornam-se mais significativas (ALRIFAI, et al. 2013).

Os resultados da pesquisa realizada por Libre et al. (2010), sobre argamassas autonivelantes, demonstram que o aumento da relação a/c e uso de aditivos SP, parece ser bastante eficaz para aumentar a fluidez, no entanto, são prejudiciais para a estabilidade. Por outro lado, o uso de aditivos modificadores de viscosidade ou de adições minerais, pode ser uma solução para melhorar a estabilidade de uma argamassa autonivelante, mas pode reduzir a fluidez da mistura.

2.2 AGREGADOS

Os agregados desempenham um papel importante na determinação da trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional e

na durabilidade. Agregados maiores agem como obstáculo porque aumentam a viscosidade da argamassa, no entanto, os pequenos grãos atuam como lubrificante da pasta melhorando o fluxo. Portanto, para confecção de argamassas autonivelantes deve-se levar em consideração a distribuição granulométrica do agregado miúdo, para que este não apresente problemas de fluidez.

Para produção de argamassas autonivelantes são utilizados as areias naturais com granulometria fina. Pode-se notar na bibliografia que grande parte dos autores utilizaram grãos com dimensões máximas de 2mm (PERA e AMBROISE, 2004; LIBRE et al., 2010; RIZWAN e BIER, 2012).

Os agregados também têm um efeito significativo sobre o custo, dessa forma, a utilização de materiais com menor valor agregado são desejáveis para utilização na construção civil, desde que suas propriedades finais sejam devidamente comprovadas como satisfatórias. Além disso, existe uma escassez crítica de agregados naturais em muitas regiões do mundo, devido ao acelerado crescimento da construção civil, nos países em desenvolvimento, e a reconstrução, nos países desenvolvidos. Consequentemente, existe um interesse crescente na utilização de agregados alternativos de construção.

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) britado e/ou moído vem sendo bastante analisado e alguns países na Europa já utilizam estes materiais em proporções definidas para produção de novos materiais como, por exemplo, o concreto.

A exploração contínua de matérias primas, especialmente os recursos não renováveis, para a construção civil e os problemas decorrentes do tratamento de milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) a cada ano, são desafios atuais que a indústria da construção deve considerar. Dentro deste contexto, o uso de agregado reciclado proveniente de resíduos da construção civil pode vir a ser uma alternativa viável para enfrentar os desafios de uma forma sustentável (PEREIRA, et al. 2012).

2.2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A Resolução N^o 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a diminuir os impactos ambientais. De acordo com o CONAMA, o gerenciamento de resíduos é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para o

desenvolvimento e implementação das ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos. O CONAMA define agregado reciclado como “*material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia*”. Este conselho classifica os resíduos de construção e demolição nas seguintes classes:

Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

Classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Conforme Matias et al. (2013), a demanda por materiais de construção e a produção de resíduos de demolição vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas. O processo de "construção-demolição" provocou enorme pressão sobre os recursos naturais, especialmente os agregados, e gerou altos índices de resíduos. Ambos os aspectos têm um impacto negativo sobre o ambiente. A quantidade de resíduos de demolição na União Européia é de aproximadamente uma tonelada per capita, e o total dos RCD produzidos chegam a mais de 450 milhões de toneladas por ano. Excluindo os resíduos de escavação do solo e construção de estradas, que abrangem cerca de 180 milhões de toneladas/ano. Os resíduos gerados em edificações são estimados em 270 milhões de toneladas/ano. Desse volume de RCD, apenas 28% são

reutilizados ou reciclados e os outros 72% (130 milhões de toneladas) são enviados para aterros ou incinerados (Tabela 1). Para mitigar estes valores e tendências a indústria da construção deve propor alternativas que visem ser ambiental e economicamente sustentáveis.

Tabela 1: Volume de RCD e tratamento.
Fonte: Matias et al. (2013)

Member state	CDW in million ton	% Reused or recycled	% Landfilled or incinerated
Germany	59	17	83
United Kingdom	30	45	55
France	24	15	85
Italy	20	9	91
Spain	13	<5	>95
Netherlands	11	90	10
Belgium	7	87	13
Austria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Denmark	3	81	19
Greece	2	<5	>95
Sweden	2	21	79
Finland	1	45	55
Luxembourg	1	<5	>95
EU-15	0	-	-
	180	28	72

Na Europa, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são compostos, principalmente, de concreto oriundo de elementos estruturais, e de resíduos de cerâmica procedentes de paredes externas e divisórias. Dois tipos de agregados reciclados podem ser obtidos a partir de tais RCD: agregados de concreto reciclado e agregado reciclado misto. Os agregados reciclados são usados principalmente na construção de estradas como sub-base asfáltica. No entanto, um valor agregado pode ser adquirido caso esses resíduos possam ser utilizados na confecção de novos concretos e argamassas. Algumas normas europeias permitem a substituição parcial do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado na fabricação de concreto novo. Por exemplo, o Código de concreto espanhol EHE-08 permite que até 20% de agregado gráudo natural possa ser substituído por agregado gráudo reciclado de concreto (JIMÉNEZ et al., 2013).

A produção de argamassas autonivelantes com agregados miúdos reciclados de RCD ainda é um tema pouco explorado. Nas referencias analisadas sobre argamassas autonivelantes, nenhum referencial bibliográfico tratava diretamente do uso de RCD, no entanto, foram encontradas pesquisas em concretos auto adensáveis e argamassas convencionais utilizando RCD, que podem servir de base para entender

algumas propriedades originadas pela incorporação desse tipo de material.

A falta de homogeneidade dos agregados reciclados está diretamente relacionada com a origem dos resíduos (concreto, cerâmica e argamassa) e com o seu elevado teor de finos (grãos menores que 75 μm). Esta composição e suas porcentagens podem afetar as propriedades da argamassa endurecida, como por exemplo, na absorção de água e na formação da microestrutura (tamanho dos poros). As características dos agregados naturais e reciclados, analisados por Miranda e Selmo (2006), apresentaram variações conforme sua origem, de acordo com a Tabela 2. A curva granulométrica dos constituintes da argamassa é apresentada na Figura 2 (MIRANDA e SELMO, 2006).

Tabela 2: Características dos agregados utilizados.
Fonte: Miranda e Selmo (2006).

Properties	Brazilian test method	Pure recycled CDW			Natural river sand
		Ceramic unit wall	Mortar	Concrete block	
Max. size of aggregate (mm)	Laser	4.8	0.55	4.8	0.56
Fineness modulus	Laser	1.27	0.74	1.78	0.87
Materials finer than 75 μm (%) ^a	Laser	46	34	33	5
Bulk density (kg/m^3)	NBR 7251/82	1270	1320	1530	1340
Specific gravity (kg/m^3)	NM 23/98	2680	2600	2670	2580 ^b
Swelling	NBR 6467/87	–	–	–	1.40
Soluble salts (%) ^c	NBR 9917/87	0.14	1.84	0.18	–
Absorption (%) ^d	NBR 9777/87	11.5	1.0	2.0	0.5
Specific surface area Blaine ^e	NBR 7224/96	3430	1400	1950	–
Specific surface area Blaine ^f	NBR 7224/96	5920	5620	3700	–
Alkali-aggregate reaction	NBR 9774/86	Non-reactive	Non-reactive reactive	Non-reactive	–
Pozzolanic activity (mg CaO/g)	Chapelle	60.9	0.0	15.1	–
Pozzolanic activity (%)	NBR 5752/92	55.6	–	–	–

^a Particle size distribution for materials larger than 1.2 mm according to NBR 7217/87 standard.

^b Specific gravity test for fine sand according to NBR 9776/87 standard.

^c No sulfates or chlorides found in wastes.

^d Because of their cohesive characteristics, the samples were washed in a 0.15 mm sieve before testing.

^e Material finer than 0.6 mm sieve.

^f Material finer than 0.15 mm sieve.

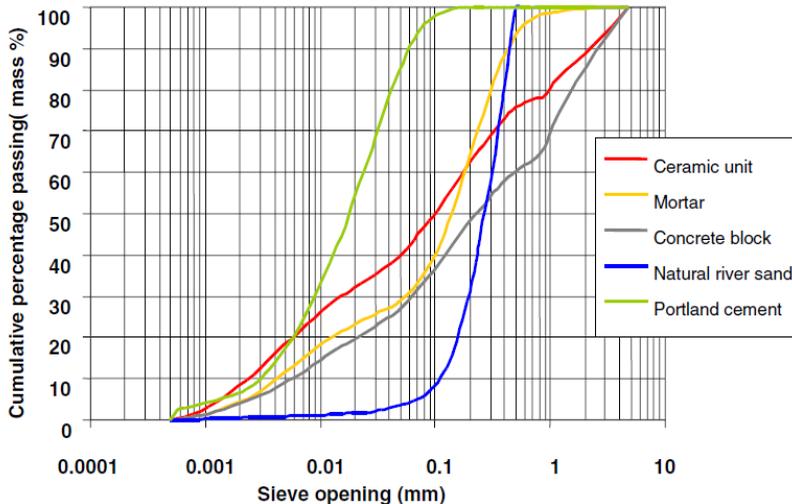


Figura 2: Curvas granulométricas do Cimento Portland, agregado natural e agregados reciclados.

Fonte: Miranda e Selmo (2006).

Os agregados de RCD apresentaram características físicas com índices de maior rugosidade da superfície, angularidade, e porosidade superficial quando comparado com as areias naturais (Tabela 3). Sendo que, os agregados grãos reciclados provenientes de concreto (RCA), apresentaram as seguintes propriedades: resistência mecânica de 50 MPa, a/c de 0,4 e seis meses de idade. Os agregados grãos naturais (NCA) foram originados de rocha granítica. A abreviação FA significa areia de mineração. As características físicas do RCD, citadas inicialmente, tornam-se desfavoráveis para melhorar as propriedades de concretos auto adensáveis no estado fresco utilizando agregados reciclados. Grãos mais angulares podem atuar negativamente por diminuir a capacidade de consolidação e fluidez do concreto auto adensável, principalmente com teores elevados de RCD, devido a características como, por exemplo, maior absorção de água e forma da superfície. Além disso, estas propriedades tendem a formar uma distribuição não uniforme dos agregados grãos, e conseqüentemente ocasionar à segregação, particularmente em misturas com teor mais elevado de RCD (SAFIUDDIN et al. 2011).

Tabela 3: Propriedades Físicas dos Agregados.

Fonte: Safiuddin et al. (2011).

Physical property	RCA	NCA	FA
Saturated surface-dry based specific gravity	2.51	2.62	2.69
Oven-dry based specific gravity	2.46	2.53	–
Absorption (wt. %)	1.91	0.60	1.32
Moisture content (wt. %)	1.32	0.17	0.31
Compacted bulk density (kg/m^3)	1366.2	1513	1618.5
Angularity number	9.47	7.45	–
Fines (< 4.75 mm) from aggregates* (wt. %)	7.75	–	–

Em pesquisa desenvolvida por Jiménez et al. (2013), foi avaliada a viabilidade da substituição de areia natural fina por uma fração fina do agregado reciclado de resíduos de cerâmica proveniente de paredes divisórias em argamassas. Cinco argamassas foram preparadas com diferentes proporções de 0%, 5%, 10%, 20% e 40% em volume de substituição de agregados naturais por reciclados. Foi utilizado cimento CEM IV e aditivo plastificante. Os autores concluíram que a substituição de areia natural, com 40% em volume, de agregado miúdo reciclado a partir de resíduos de cerâmica, não afetou significativamente a propriedade de retração, aderência com a base e resistência mecânica da argamassa. A absorção capilar da argamassa endurecida diminuiu para substituições inferiores a 10% e aumentou para proporções superiores a 20%. A permeabilidade ao vapor de água foi inferior para as misturas com 10% de substituição. No entanto, a densidade e trabalhabilidade apresentaram resultados menos eficientes quando comparados com argamassas sem substituição.

2.2.2 Cinza Pesada (CZP)

A cinza é um resíduo industrial, proveniente da queima do carvão mineral em usinas de geração de energia termelétrica. Conforme Nardi (1975), após queima do carvão, os resíduos resultantes da combustão e arrastados pelos gases de exaustão são denominados de cinza volante. A cinza que se aglomera, depositada no fundo da câmara de combustão é denominada de cinza pesada.

Na bibliografia foi possível verificar que alguns pesquisadores desenvolveram experimentos utilizando a Cinza Pesada (CZP) como substituto parcial do agregado miúdo natural, para produção de blocos de concreto, base para construção de estradas, argamassa e concreto. Essas pesquisas são de grande interesse ambiental e tecnológico, tendo em vista que o resíduo pode aperfeiçoar propriedades finais do material produzido.

Experimentos desenvolvidos por Andrade, Rocha e Cheriaf (2009) utilizando cinzas pesadas como substitutos parciais da areia natural, para produção de concreto, obtiveram como resultados redução dos valores de retração. Esses resultados foram encontrados devido a características de forma e morfologia da cinza pesada. Os autores concluíram que o resíduo utilizado proporcionou melhor cura interna, além de reduzir as forças capilares, a temperatura de hidratação e consequentemente a retração. A imagem a seguir (Figura 3) foi obtida através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), demonstrando a elevada porosidade da Cinza Pesada (CZP).

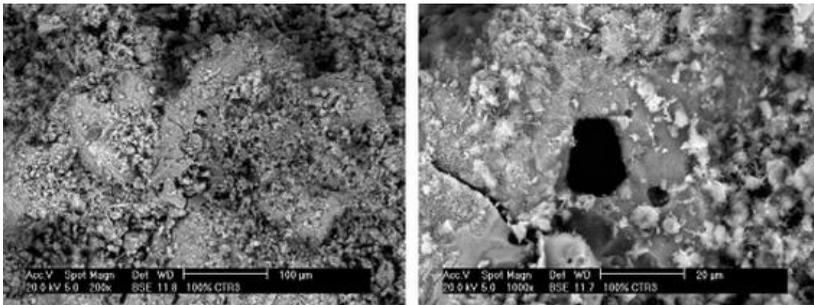


Figura 3: Imagem MEV - Cinza Pesada (CZP).

Fonte: Andrade et al. (2009).

Dessa foram, a cinza pesada pode ser um material de grande potencial para produção de argamassas autonivelantes com problemas de fissuração gerados pela retração.

2.3 ADIÇÕES EM ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

Parte do cimento Portland pode ser substituído por outros subprodutos, como por exemplo, as cinzas derivadas da combustão do carvão, escória de alto forno e sílica ativa oriunda da produção de ferro. No entanto, estas adições são utilizadas para substituir apenas uma parte do cimento necessário para produção do concreto ou argamassa, em teores que variam entre 10% e 50%. A reutilização desses resíduos como parte de ligante pode ainda favorecer o meio ambiente devido ao menor consumo de energia e CO₂ gerado em comparação com o cimento Portland (JUENGER et al., 2011).

Experimentos realizados por Sahmaran et al. (2006) analisaram as influências de diferentes tipos de adições minerais e aditivos químicos para produzir argamassas auto adensáveis. Como podem ser

observadas (Figura 4) as partículas de cinza volante e filer cerâmico são maiores quando comparadas com caulim e *filer* calcário. Os resultados granulométricos encontram-se disponibilizados na Figura 4, sendo FA cinza volante, BP *filer* cerâmico (pó de tijolo), PC cimento Portland, K caulim e LP *filer* calcário.

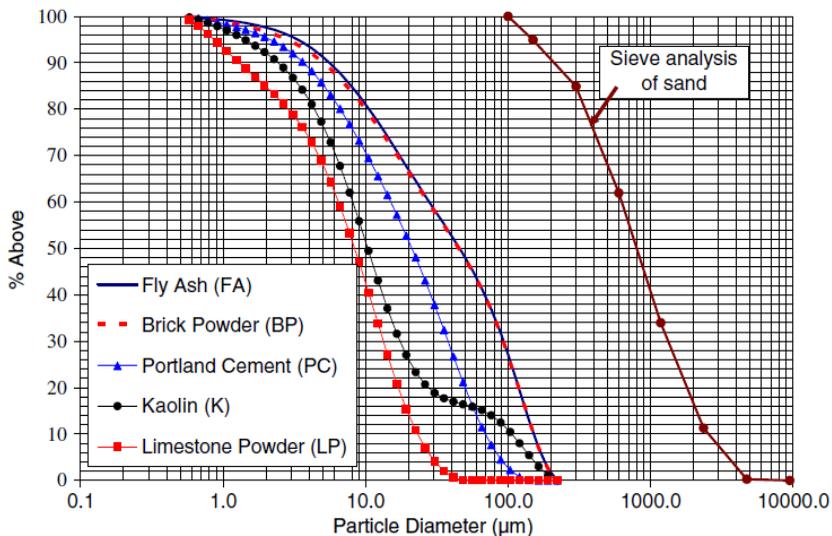


Figura 4: Distribuição granulométrica das adições, cimento Portland e areia.
Fonte: Sahmaran et al. (2006).

Sahmaran et al. (2006), também realizaram microscopia eletrônica de varredura (Figura 5), com objetivo de determinar as características de superfície.

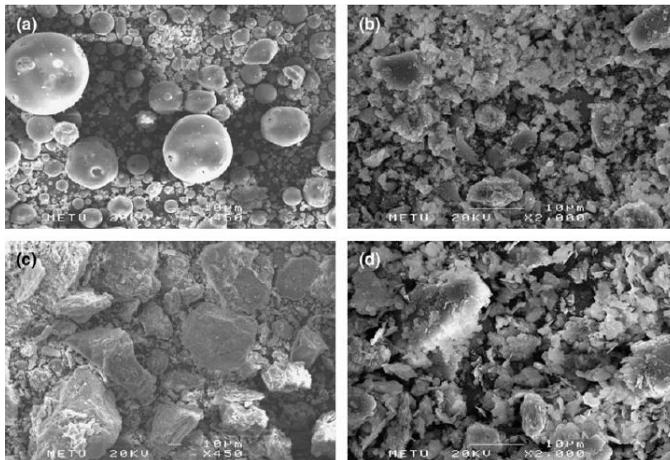


Figura 5: Imagens da microestrutura das adições minerais: a) cinza volante; b) *filer* calcário; c) finos de resíduos cerâmico; d) Caulim.

Fonte: Sahmaran et al. (2006).

As partículas de cinza volante apresentaram superfície lisa e uma geometria esférica (Figura 5a), no entanto as partículas de *filer* cerâmico apresentaram forma angular e superfície com textura rugosa (Figura 5c).

Os resultados obtidos nos ensaios de fluidez e consistência (Sahmaran et al. 2006), comprovaram que a cinza volante e o *filer* calcário melhoraram a propriedade de trabalhabilidade das argamassas auto adensáveis, comprovando que o tamanho da partícula não é o único parâmetro que beneficia a fluidez, pois a forma e textura da superfície também apresentam grande influência nos resultados finais. No entanto, as misturas compostas com caulim ou *filer* cerâmico não devem ser utilizadas em argamassas auto adensáveis isoladamente, ou seja, devem ser combinadas com outras adições minerais (misturas ternárias), pois quando usadas em misturas binárias reduzem a capacidade de fluidez da mistura. Foi observado pelos autores que a adição de cinza volante aumentava o tempo de início de pega das argamassas devido as suas características físicas (forma e tamanho das partículas) que apresentaram menor área específica e conseqüentemente maior disponibilidade de água na mistura. Já as partículas de *filer* calcário aumentaram a formação de hidróxido de cálcio devido às reações com C_3A e C_3S e acelerando dessa forma a hidratação (SAHMARAN et al. 2006).

O tamanho de partícula, a forma, a morfologia e a porosidade interna das adições minerais têm um efeito muito significativo sobre a

resposta geral dos sistemas de argamassas autonivelantes. A utilização de cinza volante em argamassas autonivelantes proporciona maior fluidez, especialmente para teores de substituição mais elevados. Este aumento da fluidez, com a incorporação de cinza volante na mistura, pode ser explicado pelo seu efeito lubrificante de forma esférica e as características de superfície lisa, que tendem a reduzir o atrito na interface de agregado e colar, produzindo "efeito de rolamento" no ponto de contato (RIZWAN e BIER, 2012; MEHDIPOUR et al., 2013). Entretanto, o aumentando do teor de cinza volante no sistema binário de reposição, provoca maior exsudação durante o tempo de mistura mais prolongado (MEHDIPOUR et al., 2013).

De acordo com Benabed et al. (2012), o teor de *filer* calcário influencia no ensaio de espalhamento (*mini slump*) e no tempo de escoamento para o ensaio do Funil em V (Figura 6). Conforme os autores o *filer* calcário apresenta melhores respostas em porcentagens iguais ou inferiores a 15% de substituição do cimento. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da finura e da área específica dos *filers*, pois com o aumento do teor de finos torna-se necessário mais água para molhar a superfície das partículas e manter a mesma fluidez.

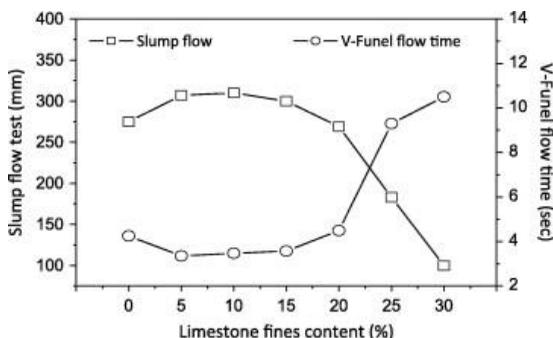


Figura 6: Ensaio de espalhamento (*slump Flow*) e tempo de fluxo no funil de argamassa auto adensáveis feitas com diferentes porcentagens de *filer* calcário.

Fonte: Benabed et al (2012).

Benabed et al (2012) comprovaram também que a resistência a compressão das argamassas auto adensáveis diminuem para misturas com porcentagens de *filer* calcário superior a 15% e inferior a 5% de substituição do cimento (Figura 7). Para *filers* calcários com teores superiores a 15%, a resistência à compressão diminui devido ao revestimento insuficiente de pasta de cimento para todas as partículas de *filers*, que conseqüentemente conduz a uma diminuição da resistência à

compressão. Para amostras sem ou com apenas 5% de *filer* de calcário, não há partículas finas suficientes para preencher todos os espaços vazios entre a pasta de cimento e as partículas de agregados finos e, portanto, menores valores de resistência à compressão são obtidos, em comparação com amostras preparadas com teores de 10 a 15% de *filer* calcário. Os autores ainda constataram que, em geral, a baixa velocidade de rotação, no momento de preparo das argamassas, demonstrou um comportamento viscoso, já a alta velocidade de rotação, um comportamento mais fluido.

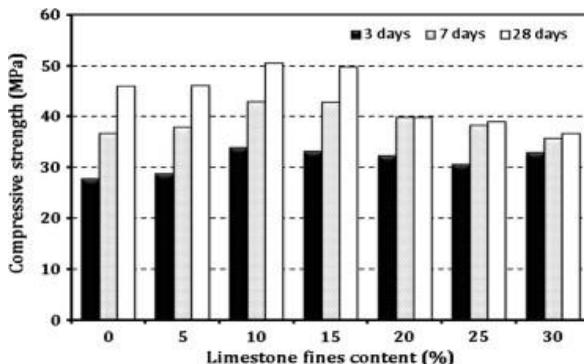


Figura 7: Resistência à compressão (3, 7 e 28 dias) de argamassa auto adensáveis moldadas com diferentes teores de *filer* calcário.

Fonte: Benabed et al (2012).

Segundo Mehdipour et al. (2013), a adição de metacaulim em argamassas autonivelantes reduz a fluidez da mistura. No entanto, a redução desta fluidez é mais acentuada para as misturas com menor relação *a/c*. Isso provavelmente ocorre devido à sua elevada atividade química e a sua grande área de superfície, que resulta em alta absorção de água e conseqüentemente redução de água livre na mistura. Por outro lado, a substituição de parte do cimento Portland por metacaulim reforça a coesão das argamassas autonivelantes, devido à área de superfície elevada que proporciona uma maior viscosidade.

Nas pesquisas recentes (Onishi e Bier, 2010; Libre et al., 2010; Rizwan e Bier, 2012; Mehdipour et al., 2013), relacionadas com a produção de argamassas auto adensáveis e autonivelantes, tem-se optado pela utilização de mais de um tipo de adição mineral (misturas ternárias ou quaternárias) com objetivo de melhorar as propriedades finais de tais materiais.

As misturas ternárias compostas com *filer* cerâmico e *filer* calcário, cinza volante e metacaulim, *filer* cerâmico e cinza volante e *filer* calcário e cinza volante, apresentaram boa fluidez, com os três tipos de aditivos SP utilizados (éter carboxílico, policarboxilato e melanina formaldeído) para fabricação de argamassa auto adensável. Entre as misturas ternárias destacou-se a combinação entre cinza volante e *filer* calcário que apresentaram elevada fluidez e tempo de pega considerado satisfatório (SAHMARAN et al. 2006).

O uso de baixos teores de *filer* calcário melhora o escoamento das misturas e o bloqueio dos agregados (LIBRE, et al. 2010). As misturas que contêm cinza volante e metacaulim, em baixos teores, proporcionam alta fluidez e estabilidade. Misturas compostas com metacaulim podem controlar firmemente a instabilidade devido a sua elevada finura que diminui a espessura da película de água e assim aumenta a coesão da mistura. Dessa forma, a fim de proporcionar a estabilidade necessária em misturas que incorporam cinza volante, a adição do metacaulim tende a ser muito benéfico. Por exemplo, nas amostras compostas por cinza volante (22,5%) e metacaulim (7,5%), em massa de aglomerante total, foi possível eliminar totalmente a exsudação das argamassas autonivelantes (MEHDIPOUR et al., 2013).

Pesquisas realizadas por Rizwan e Bier (2012), com objetivo de analisar o comportamento de argamassas autonivelantes compostas por diferentes adições minerais, apontam que o uso independente de qualquer *filer* calcário ou cinza volante não é suficiente para obter um desempenho eficaz em ambos os estados fresco e endurecido. O *filer* calcário quando usado separadamente em sistemas de argamassas autonivelantes exige alto teor de aditivo SP e produz alta retração inicial. Por outro lado, cinzas volantes, quando utilizados de forma independente aumentam o tempo de início de pega, embora melhore a facilidade de adensamento e reduza a geração de calor inicial, e conseqüentemente, a retração. Com isso, a utilização de misturas ternárias contendo *filer* calcário e cinza volante, melhora o desempenho final do sistema de argamassas autonivelantes. Esse desempenho é ainda melhorado quando um *filer* calcário ou cinzas volantes é substituído por 20% em massa de sílica ativa ou cinza de casca de arroz.

Nos experimentos realizados por Rizwan e Bier (2012), os autores utilizaram o cimento Portland convencional Tipo I (ASTM – CEM I 42,5 R), areia natural local com granulometria máxima de 2 mm, módulo de finura 2,39, aditivo SP com base policarboxilato, relações 1:1:2 (cimento:adições:areia), relação água/cimento de 0,4 e relação água/finos de 0,2. As combinações das adições foram realizadas em

massa de aglomerante conforme os seguintes percentuais: 100% de *filer* calcário e cinza volante; 80% de *filer* calcário e cinza volante combinado com: 20% de cinza de casca de arroz, 20% sílica ativa e 20% de cinza volante ou *filer* calcário, conforme Figura 8.

Após realização dos ensaios, observou-se que a mistura contendo 80% de *filer* calcário e 20% de sílica ativa apresentou o menor valor de tamanho máximo de poro durante todas as idades analisadas (1,7 e 28 dias). A substituição de 20% de *filer* calcário ou cinza volante, em massa, com matérias primas pozolânicas secundárias (sílica ativa e cinza de casca de arroz), aumentaram a resistência mecânica (compressão e flexão) das argamassas autonivelantes. A formulação contendo 80% de cinza volante e 20% de sílica ativa obteve o maior valor de resistência à compressão e flexão, resultado que pode ser explicado pelo efeito de refinamento dos poros. As cinzas volantes (80%) quando misturadas com 20% de sílica ativa ou cinza de casca de arroz apresentaram maiores resultados de resistência mecânica que as misturas contendo 80% de *filer* calcário (Figura 8). Sendo: Cinza volante (FA); *Filer* calcário (LSP); Cinza de casca de arroz (RHA); Sílica ativa (SF).

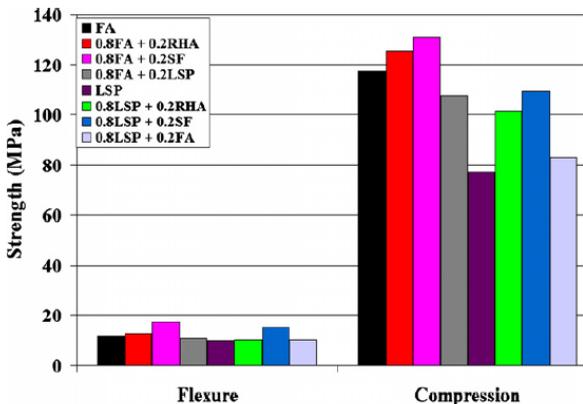


Figura 8: Resistência mecânica, aos 28 dias de idade.

Fonte: Rizwan e Bier (2012).

A absorção de água por capilaridade nas argamassas autonivelantes pode depender de vários fatores, incluindo o tamanho de poro máximo, o tipo e as características da matéria-prima e dos tipos de conectividades internas e externas de tais adições incorporadas. Afirma-se que a absorção de água não é simplesmente uma função do tamanho

de poro máximo, mas isso também depende da porosidade e a sua conectividade com a superfície da amostra. Ao analisar adições minerais com *filer* calcário e cinzas volantes, Rizwan e Bier (2012), observaram que o *filer* calcário manteve maiores índices de absorção com água até os 28 dias de idade investigados. No entanto, quando substituídos 20% em massa de cinza de casca de arroz para ambas as adições minerais citadas inicialmente, concluiu-se que os valores de absorção com água foram significativamente superiores para as misturas contendo 80% de cinza volante. Observou-se também que a adição de 20% em massa de sílica ativa nas misturas com 80% de cinza volante ou *filer* calcário a absorção de água diminuiu, conforme Figura 9 (RIZWAN e BIER, 2012).

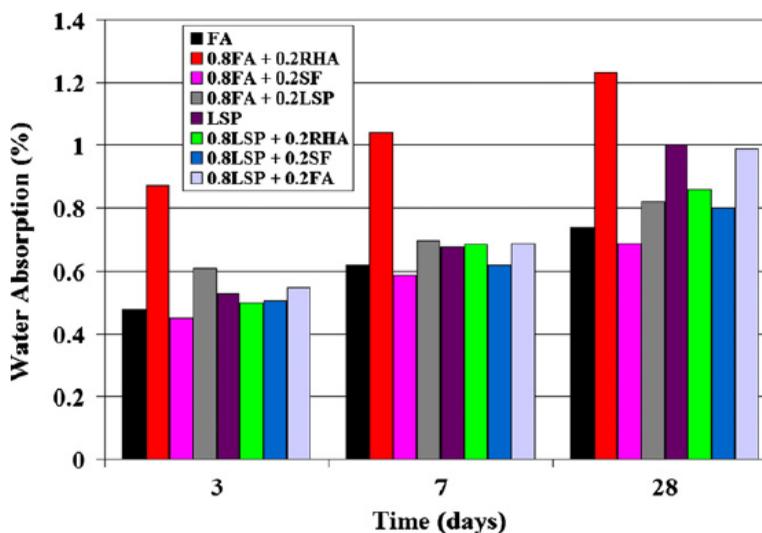


Figura 9: Absorção de água para diferentes combinações de adições minerais nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Fonte: Rizwan e Bier (2012).

Ao analisar o gráfico percebe-se que as amostras contendo apenas cinza volante apresentaram baixa absorção de água e que esta propriedade ainda é minimizada com a adição de sílica ativa, devido a sua baixa porosidade. Com este resultado pode-se melhor entender porque as misturas compostas com cinza volante e sílica ativa apresentaram os maiores valores de resistência mecânica.

Com objetivo de atingir a reologia necessária para vários sistemas de argamassa autonivelantes incorporando *filer* calcário, cinzas volantes e as suas misturas ternárias (cinza de casca de arroz e sílica ativa), como descritas anteriormente, Rizwan e Bier (2012), utilizaram diferentes conteúdos de aditivo SP (éter policarboxílico) para os vários tipos de formulações, conforme resultados apresentados na Figura 10.

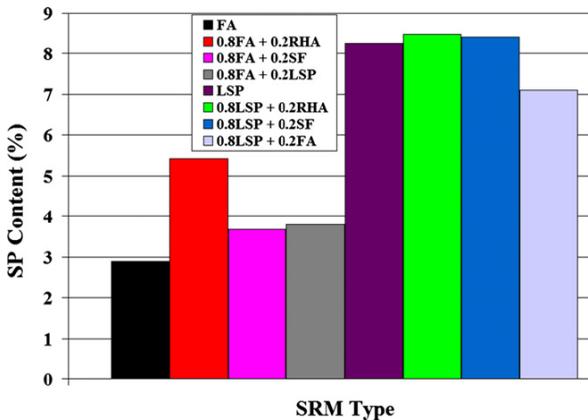


Figura 10: Teor de aditivo SP para diferentes porcentagens de adições minerais.
Fonte: Rizwan e Bier (2012).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 10 é possível verificar que o teor de aditivo SP foi maior para misturas compostas com cinza de casca de arroz devido a sua superfície irregular, que dificulta o fluxo, e maior porosidade interna, que aumenta a absorção de água. O *filer* calcário exigiu alto teor de aditivo SP (8%) devido a sua superfície irregular. Ao analisar o gráfico, percebe-se que entre as adições utilizadas a cinza volante requer menor teor de aditivo SP devido a sua forma de partícula esférica e superfície lisa.

Com objetivo de medir o tempo de espalhamento para auto adensamento de argamassas e pastas, RIZWAN e BIER (2012) utilizaram um tronco mini cone e uma mesa, medindo o tempo de espalhamento em um diâmetro de 25 centímetros (T_{25}) em analogia ao ensaio T_{50} utilizado em concreto auto adensável. O teste de espalhamento (T_{25}) fornece informações úteis sobre as propriedades reológicas, incluindo tensão de escoamento e viscosidade. Os sistemas de argamassas autonivelantes foram caracterizados por um elevado escoamento, de aproximadamente 26 centímetros. O fluxo de sistemas de argamassa autonivelantes demonstrou ser fortemente dependente das

características das partículas finas (ligantes, na maioria dos casos), em termos de tamanho, a forma, a morfologia de superfície e porosidade interna. A Figura 11 mostra os tempos de escoamento de tais sistemas (RIZWAN e BIER, 2012).

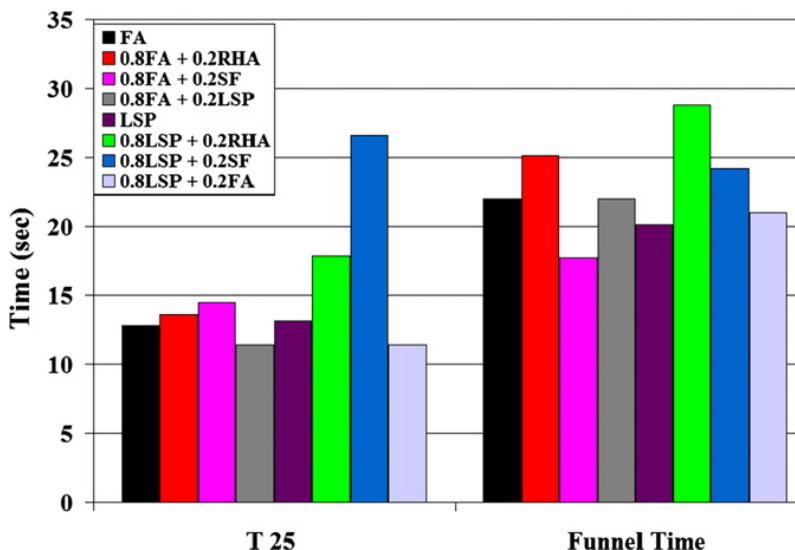


Figura 11: Tempos de fluxo para argamassas autonivelantes.

Fonte: Rizwan e Bier (2012).

Devido às características físicas da cinza de casca de arroz, mencionadas anteriormente, as misturas compostas com esta adição apresentaram maiores tempos de fluidez. Nos ensaios realizados por Rizwan e Bier (2012), comprovou-se que a combinação de cinza volante e *filer* calcário aumentaram a propriedade de escoamento de argamassas autonivelantes, quando comparado com o uso isolado de alguma dessas adições ou com a incorporação das demais adições analisadas.

2.4 AGLOMERANTES PARA ARGAMASSA AUTONIVELANTE

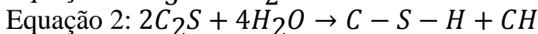
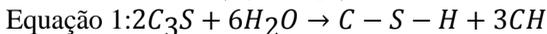
Os aglomerantes utilizados para produção de argamassas autonivelantes são cimento Portland, cimento Aluminoso e sulfato de cálcio. Esses aglomerantes podem ser usados isoladamente, utilizando-se apenas o cimento Portland, como também podem ser utilizados em misturas binárias e ternárias. Nas misturas binárias utiliza-se o cimento

Portland em conjunto com cimento Aluminato de cálcio e nas misturas ternárias, além dos dois constituintes presentes nas misturas binárias, é adicionado o sulfato de cálcio hidratado ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), com objetivo de regular o tempo de início de pega.

2.4.1 Cimento Portland

As matérias primas que são utilizadas na fabricação do cimento Portland consistem principalmente de calcário (Ca), sílica (Si), alumina (Al) e óxido de ferro (Fe_2O_3). As reações que fazem com que o cimento se torne um agente ligante ocorrem na pasta, quando os silicatos e aluminatos sofrem hidratação formando uma pasta firme e resistente (pasta de cimento endurecida). O silicato de cálcio (CSH) e o hidróxido de cálcio cristalino (CH) são os principais produtos formados da hidratação do C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e do C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), conforme as Equações 1 e 2.

Silicatos de cálcio (C_3S e C_2S):



Principais componentes formados:

C-S-H = $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - (Silicato de Cálcio hidratado)

CH = $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - (Hidróxido de Cálcio hidratado)

Desde o desenvolvimento do cimento Portland, a mais de 175 anos atrás, que este se tornou o aglomerante dominante usado em concreto para construção civil. Elogiado por sua versatilidade, durabilidade e valor econômico, a produção anual de cimento Portland em todo o mundo está se aproximando de 3Gt (JUENGER et al., 2011). Todavia, o problema da grande quantidade de cimento Portland confeccionado em todo o mundo está relacionado com fatores de sustentabilidade, devido principalmente as grandes emissões de CO_2 .

Conforme Damtoft, et al. (2008), a fabricação de cimento Portland consome 10-11 EJ de energia por ano e cerca de 2-3% do uso global de matéria primária. Além disso, a produção do cimento Portland resultada em aproximadamente 0,87 toneladas de dióxido de carbono para cada tonelada de cimento produzido, este valor é responsável por 5% das emissões de CO_2 provocadas pelo homem. A indústria do cimento sofre pressão para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa e está em busca de alternativas com características similares e confiáveis.

2.5 ADITIVOS PARA ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

2.5.1 Aditivos Redutores de Água

Os aditivos redutores de água, também conhecidos como superplastificantes (SP) são divididos em três grupos:

- Plastificantes de Primeira geração, ex: lignosulfatos;
- Superplastificantes de segunda geração, ex: Sais sulfonados de melanina;
- Superplastificantes de terceira geração, ex: Policarboxilatos.

Sahmaran et al. (2006) realizaram ensaios experimentais para avaliar a influência de adições minerais e aditivos químicos na produção de argamassas auto adensáveis. Os autores utilizaram três tipos de aditivos SP com base de éter carboxílico (0,5 a 2,5%), policarboxilato (1 a 2%) e melanina formaldeído (1,5 a 2,5%), com teores em massa de cimento. Foram analisados também dois aditivos modificadores de viscosidade composto principalmente por polímero hidroxilato (0,05 a 0,15%) e microsílca (1 a 2%), em massa de cimento. Os autores comprovaram que os aditivos SP, conhecidos como de última geração, com base policarboxilato e éter carboxílico apresentaram desempenho superior aos aditivos plastificantes com base melanina formaldeído. O SP com resultado mais eficiente nos testes de trabalhabilidade foi o composto principalmente por policarboxilato.

Conforme Ferrari et al. (2010), o aditivo SP evita a aglomeração entre as partículas em suspensão e aumenta a fluidez. Uma das principais razões para a aglomeração é a atração entre as partículas de carga oposta, que formam aglomerados nas suspensões coloidais. A fim de melhorar a fluidez da mistura mantendo a mesma relação a/c, os SP agem como dispersantes aderindo à superfície das partículas e exercendo forças de repulsão entre estas.

Os SP do tipo éter policarboxílico, em forma de pente, são caracterizados por uma unidade de adsorção de espinha dorsal hidrofílica e uma cadeia lateral de óxido de polietileno. Estes aditivos são amplamente utilizados devido à sua versatilidade: o número e o comprimento das cadeias laterais e a sua densidade de enxerto são parâmetros flexíveis. Quando este aditivo é adsorvido na interface sólido-líquido em uma suspensão de partículas, induz uma força repulsiva entre as partículas que evita a formação de aglomerados, como apresentado graficamente na Figura 12 (FERRARI et al. 2010).

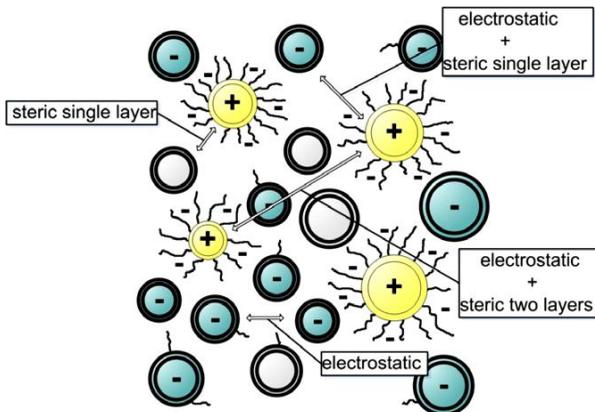


Figura 12: Representação esquemática do mecanismo de dispersão dos superplastificantes com base policarborxilato

Fonte: Ferrari et al. (2010).

A ação de policarbonato, presente nos aditivos SP, baseia-se no fato de que este pode ser ligado apropriadamente envolvendo os grãos de cimento e dispersá-los eletrostaticamente por efeito estérico. Esta ação dos grãos ajuda a promover melhor dispersão na água e, assim, melhorar a eficiência de hidratação. O aumento do nível de hidratação, juntamente com baixa porosidade proporciona alta resistência e maior durabilidade (KATSIADRAMIS et al. 2010).

Em experimentos realizados por Katsiadramis et al. (2010), foram analisadas três misturas de argamassas autonivelantes, com relações a/c de 0,5 e 0,6, relações 1:3 e 1:4 (aglomerante: agregado), aditivo SP isoladamente e aditivo SP combinado com estabilizador. O cimento Portland (I 52,5) utilizado tinha característica de alta resistência inicial. As misturas com aditivo SP, base química policarbonato, em até 1% melhoraram a resposta reológica das argamassas no estado fresco, apresentando características de melhor trabalhabilidade sem o surgimento de segregação ou exsudação.

Nos testes de resistência mecânica, realizados aos 28 dias de idade, por Katsiadramis et al. (2010), a utilização do aditivo SP (policarbonato) não apresentou uma influência significativa para todas as misturas. Para o mesmo teor de aditivo SP (1%), as misturas com relações a/c de 0,5 e relações cimento/agregado de 1:3 e 1:4 apresentaram maiores valores de resistência à flexão que as amostras sem aditivos. Entretanto, a amostra com relação a/c = 0,6 e relação cimento/agregado de 1:4 apresentou resultados menores que a

referencia. Para resistência a compressão, os resultados com proporções 1:4 (cimento/agregado) e relações a/c igual a 0,5 e 0,6 foram menores. Porém, a amostra com relação a/c de 0,5 e cimento/agregado de 1:3, apresentou valores maiores. Os autores concluíram que a amostra composta com relação a/c = 0,5 e relação cimento/agregado de 1:3 apresentou resultados eficientes para ambas às propriedades mecânicas.

De acordo com Rizwan e Bier (2012), a substituição de 20% em massa de *filer* calcário ou cinzas volantes, por cinzas de casca de arroz ou sílica ativa, aumenta o teor de aditivo SP (policarboxilato) necessário para atender o escoamento ideal, exigidos em argamassas autonivelantes. Isso acontece porque as partículas de cinza de casca de arroz apresentam microestrutura irregular, abrasiva e porosa, fato que promove maior absorção/adsorção, resultando na redução da disponibilidade de água na mistura, e aumentando, conseqüentemente, a viscosidade. Partículas de *filer* calcário são irregulares, este fator aumenta a resistência interna ao fluxo e assim é necessário aumentar o teor de aditivo SP para cumprir a meta de auto nivelamento. Foi observado ainda que a sílica ativa absorve uma quantidade significativa de água, necessitando desta forma, de uma maior porcentagem de aditivo SP. O aditivo SP utilizado nos experimentos foi um éter policarboxílico, com 30% de sólidos, pH de 5,8 e uma densidade de 1,04-1,08 g/cm³.

Os resultados dos experimentos realizados por Libre et al. (2010), que avaliaram a estabilidade e fluidez de argamassas autonivelantes compostas por aditivos químicos e adições minerais, demonstraram que a relação a/c e o conteúdo de aditivo SP têm uma grande influência na fluidez das misturas. As relações a/c analisadas foram de 0,35, 0,45 e 0,55. Os materiais utilizados nos ensaios foram cimento Portland (Tipo I), conforme ASTM C150, adições minerais de *filer* calcário e cinza volante, areia de leito de rio com tamanho máximo de 2,36 mm e granulometria conforme ASTM C33, aditivo redutor de água (SP) e aditivo modificador de viscosidade do tipo polissacarídeo. A adição de 1% de aditivo SP, com base policarboxílico, em massa de aglomerante, melhorou a fluidez da argamassa em até 30%. Baseando-se nos resultados encontrados, para obtenção de elevada fluidez a relação a/c não deve ser muito aumentada devido a aspectos de instabilidade. Portanto, é preferível aumentar o teor de aditivo SP do que aumentar a relação a/c para conseguir o escoamento necessário, com misturas mais estáveis. Por outro lado, conforme demonstrado por Felekoglu (2008), o elevado teor de aditivo SP aumenta o tempo de início e fim de pega da mistura. Com isso, o aditivo SP deve ser

utilizado em uma porcentagem ótima que proporcione compatibilidade com o aglomerante, e dessa forma, a fluidez necessária seja alcançada, sem necessidade de grande aumento na relação a/c.

2.5.2 Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV)

Ainda referente aos resultados dos ensaios realizados por Libre et al. (2010), com objetivo de obter argamassas autonivelantes com fluidez e estabilidade otimizadas, percebeu-se que para manter o escoamento de adensamento ideal, quando for utilizado 1% de aditivo modificador de viscosidade do tipo polissacarídeo, é necessário adicionar 1% de aditivo SP (policarboxilato) ou aumentar em 17% a relação a/c. Os resultados obtidos demonstraram que o uso de 1% de aditivo modificador de viscosidade reduziu em 30% o fluxo de consolidação das misturas. Com isso, conclui-se que o aditivo modificador de viscosidade (AMV) tem um efeito de deterioração na trabalhabilidade. Argamassas com doses elevadas desses aditivos podem apresentar propriedades reológicas indesejáveis para sistemas autonivelantes no estado fresco.

Analisando os parâmetros: teor de água, aditivo SP, agente modificador de viscosidade, *filler* calcário e cinza volante, a viscosidade é influenciada principalmente pela relação a/c. Vale a pena ressaltar que o aditivo modificador de viscosidade tem efeito insignificante sobre a viscosidade, tendo este aditivo um efeito dominante sobre a estabilidade da mistura. O uso de aditivo modificador de viscosidade do tipo polissacarídeo é uma maneira eficaz para prevenir a instabilidade de misturas, como segregação, exsudação e bloqueio dos agregados (LIBRE et al., 2010).

O uso do aditivo modificador de viscosidade pode minimizar a fluidez e dessa forma torna-se necessário elevar a adição de água ou conteúdo de aditivo SP, que pode resultar em mau comportamento mecânico das misturas, no estado endurecido, ou não viável devido a aspectos econômicos. Conclui-se que o aditivo modificador de viscosidade deve ser utilizado apenas em argamassas autonivelantes que se apresentarem propensas à instabilidade. Portanto, a utilização deste aditivo é válida quando o conteúdo de umidade global não pode ser controlado de forma adequada, ou em misturas com os agregados mal classificados ou com baixo teor de finos (LIBRE et al., 2010).

2.6 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

2.6.1 Trabalhabilidade

Para verificar a trabalhabilidade das argamassas autonivelantes o ensaio utilizado é o espalhamento na mesa (RIZWAN E BIER, 2012; KATSIADRAMIS et al. 2010; GEORGIN et al. 2008). O ensaio de espalhamento constitui no preenchimento de um mini tronco de cone (Figura 13), o qual deve ser retirado para que a argamassa possa se espalhar livremente sob seu peso próprio. Em seguida, são medidos dois diâmetros ortogonais, conforme apresentação na Figura 14.

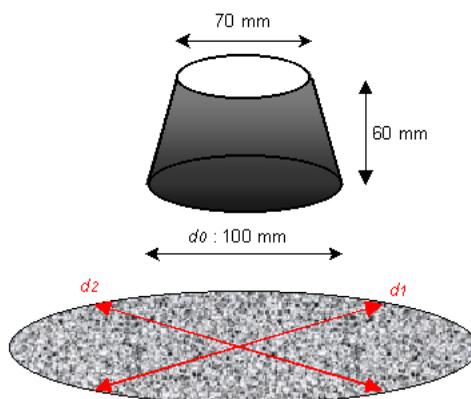


Figura 13: Mini Cone Para Ensaio de Espalhamento em Argamassa Autonivelante.

Fonte: Nunes (2001).



Figura 14: Ensaio de Espalhamento. Lado esquerdo: Nivelamento (arrasadura) do mini cone. Lado direito: Medidas ortogonais dos diâmetros.

Fonte: Katsiadramis et al. (2010).

Conforme Katsiadramis et al., (2010), o valor do teste de espalhamento, pelo método do mini cone na mesa, em argamassa autonivelante, deve variar entre 24 e 26 cm. Segundo pesquisas de Georgin et al. (2008), a argamassa é considerada autonivelante quando o espalhamento na mesa pelo método do mini cone varia entre 25 e 27 cm.

De acordo com Rizwan e Bier (2012), o espalhamento, para o teste *mini slump flow table*, em argamassas auto adensáveis deve ser igual ou superior a 26 cm.

Os critérios de aceitação sugeridos pela EFNARC (2002), para experimentos de espalhamento em argamassas auto adensáveis, varia entre 24 e 26 cm.

Os materiais com características autonivelantes devem ter um limite de elasticidade ou viscosidade em níveis que evitem a segregação, mas que ao mesmo tempo disponibilizem uma adequada trabalhabilidade. O aumento acentuado da fluidez eleva o risco de instabilidade da mistura e conseqüentemente da segregação. (SCHWARTZENTRUBER et al., 2006; LIBRE, et al., 2010; MEHDIPOUR et al., 2013). A estabilidade das argamassas autonivelantes pode ser afetada pela dosagem inadequada dos seus componentes ou pelo método de aplicação.

A estabilidade é a capacidade de uma mistura autonivelante manter uma distribuição uniforme dos materiais constituintes durante todo o processo de consolidação. A estabilidade estática seria a capacidade da mistura em resistir à segregação, exsudação e adensamento que são influenciadas pela gravidade e tempo. Já a estabilidade dinâmica pode ser causada por qualquer forma de energia externa dentro do sistema, durante o transporte ou colocação do material, como por exemplo, a vibração (MEHDIPOUR et al., 2013).

Quando são necessárias misturas altamente fluidas pode-se incorporar metacaulim na composição para que sejam eliminados sinais de instabilidade (MEHDIPOUR et al. 2013). Quando a falta de fluidez não é muito grande a utilização de *filer* calcário ou cinza volante pode ser igualmente eficaz (LIBRE et al., 2010).

A utilização de metacaulim combinada com cinzas volantes, em baixos teores (10% e 10% de massa de cimento), parece ser eficaz para alcançar características de elevada capacidade de escoamento e viscosidade moderada para resistir à instabilidade (MEHDIPOUR et al. 2013). A trabalhabilidade inadequada de argamassas autonivelantes pode gerar conseqüências desfavoráveis, como dificuldade de auto nivelamento, resultando em argamassa com maior índice de vazios, e conseqüentemente, menor resistência mecânica e durabilidade.

De acordo com Libre et al. (2010), o uso de *filer* calcário ou cinza volante aliado com aditivo modificador de viscosidade, com base polissacarídeo, em baixos teores (1%), pode ser bastante eficaz para aumentar as propriedades de escoamento das misturas à base de cimento. Para evitar segregação e aumentar a fluidez em misturas com baixas relações a/c, os autores sugerem utilizar aditivo modificador de viscosidade, *filer* calcário ou cinzas volantes em baixos teores (até 10%).

Pesquisas realizadas por Pera e Ambroise (2004) para produzir argamassa autonivelantes, foram utilizados Cimento Sufoaluminato de Cálcio e Cimento Portland (Classe CEM I 52,5), com porcentagens de 80% e 20%, respectivamente. O conteúdo de *filer* calcário adicionado foi de 7,5% em massa de aglomerante. A relação água/cimento adotada foi de 0,7 com 6% de aditivo SP (policarboxilato), em massa de aglomerantes. Foi também utilizado 3% de um aditivo modificador de viscosidade. Além desses, um agente de retenção de água (polietileno-glicol) foi incorporado na mistura com relação cimento/agregado (1:3,1). A trabalhabilidade da argamassa autonivelante foi medida pelo ensaio de espalhamento (*mini Slump test*), utilizando um cone com dimensões: $\varphi_{\text{inf}} = 95$ mm, $\varphi_{\text{sup}} = 55$ mm, $h = 70$ mm. Os resultados obtidos foram valores com pouca variação para perda de trabalhabilidade durante o período de 3 horas, quando comparado com a mistura de referencia (argamassa autonivelante composta apenas com cimento Portland), como pode ser observado na Figura 15.

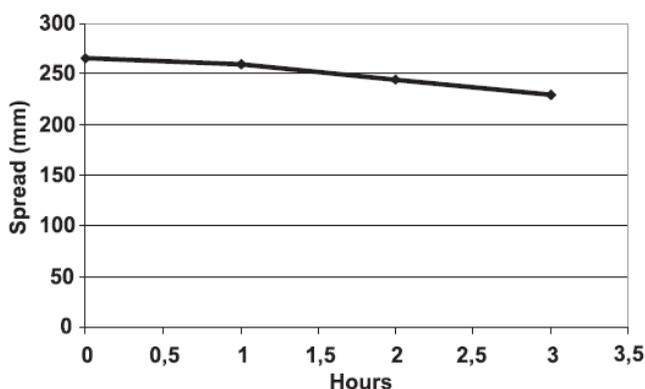


Figura 15: Trabalhabilidade da argamassa Autonivelante em Função do Tempo
Fonte: Pera e Ambroise (2004).

Experimentos realizados por Mehdipour et al. (2013), analisando os efeitos das adições minerais sobre as propriedades de escoamento e estabilidade das argamassas autonivelantes, comprovaram que quando foi incorporado cinza volante nas misturas obteve-se um aumento na fluidez. Os materiais utilizados foram cimento Portland, 1% de agente redutor de água à base de policarboxilato (SP), e areia com tamanho máximo de 6 mm, peso específico de 2,7, módulo de finura de 2,56 e valor de absorção de 2,8%. As relações a/c foram de 0,35 e 0,45. Foram realizadas três composições de aglutinantes, sendo a primeira de cimento Portland e cinza volante, com teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A segunda composição de cimento Portland e metacaulim, com porcentagens de 10%, 20% e 30% em massa de aglomerante. A terceira composição foi de cimento Portland, metacaulim e cinza volante, sendo que ambas as adições (cinza volante e metacaulim) os níveis de substituição foram 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, nesta etapa também foram realizadas amostras com substituições de metacaulim e cinza volante com relação 1:3 (metacaulim/cinza volante) em massa de aglomerante. Os resultados demonstraram que a substituição de 50% de cimento por cinzas volantes contribuiu para aumentar a fluidez em aproximadamente 20% para ambas às relações a/c analisadas, em comparação com as misturas referenciais, devido a características de forma esférica e superfície lisa. Para as argamassas autonivelantes, com metacaulim incorporado, foi observado redução na fluidez da mistura, principalmente para menores teores de a/c, devido a sua elevada atividade química e área de superfície.

Ainda referente aos experimentos realizados por Mehdipour et al. (2013), foi possível comprovar que o tempo de mistura influencia no escoamento das argamassas autonivelantes. Os resultados obtidos por estes pesquisadores demonstraram que o aumento de 10 para 20 minutos no tempo de mistura aumentava a fluidez em todas as misturas analisadas. Este fato pode ser explicado pelo agitação das partículas de cimento floculadas tornando-as mais dispersas, mas ao mesmo tempo conseguem manter a aglomeração necessária para criar uma película de água de revestimento entre os espaços vazios das partículas sólidas e assim garantir a lubrificação necessária para o escoamento. Porém, para tempos de mistura superiores a 30 minutos a fluidez é reduzida. De acordo com estes resultados conclui-se que o aumento elevado da dispersão reduz à quantidade de água disponível na mistura, pois parte desta água é absorvida pelas reações de hidratação, adsorvida sobre a superfície das partículas sólidas (cimento hidratado) ou evapora-se. Em substituições de cimento Portland por cinza volante, com teores

superiores a 20%, em tempos de mistura mais elevados, ocorre uma tendência em reduzir a trabalhabilidade das argamassas autonivelantes, principalmente para maiores relações a/c. Além desse fato, o aumento do teor de cinza em tempos de misturas prolongadas pode causar um maior risco de instabilidade, e conseqüentemente ocasionar exsudação e/ou segregação.

Como a utilização de agregados reciclados de RCD para produção de argamassas autonivelantes é um tema ainda pouco pesquisado, baseando-se no pequeno número de publicações encontradas na literatura científica, optou-se por analisar o comportamento dos agregados reciclados em concreto auto adensável e analisar experimentalmente o resultado de sua aplicação.

Experimentos realizados por Safiuddin et al. (2011), para analisar o comportamento de agregados reciclados em concreto auto adensável, no estado fresco, demonstraram que os agregados graúdos de RCD podem ser usados como substituto parcial de agregados graúdos naturais em teores máximos de 50%, em massa, sem afetar as propriedades fundamentais do estado fresco, tais como a capacidade de adensamento, escoamento e resistência à segregação. Para isso, foram utilizados como agregados graúdos, resíduos de concreto, e como agregado miúdo, areia de mineração. O agregado graúdo proveniente de concreto de demolição apresentou resistência à compressão de 50 MPa, relação a/c de 0,4, porosidade 11%, idade de seis meses e seus agregados tinham como origem o granito nas dimensões de 20 mm. As características físicas de absorção, angularidade e teor de umidade, foram superiores para os agregados graúdos reciclados com valores de 1,91, 9,47 e 1,32, respectivamente, comparados com 0,60, 7,45 e 0,17, dos agregados graúdos naturais. As curvas granulométricas para agregados graúdo (natural e reciclado) e miúdo encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelas ASTM, como podemos observar na Figura 16. Foi utilizado cimento Portland (CP II E-32) e aditivo SP, com base química policarboxilato. Sendo: FA = agregado fino; NCA = agregado graúdo natural; RCA = agregado graúdo reciclado; HRWR = superplastificante; CA = NCA + RCA; TA = FA + CA.

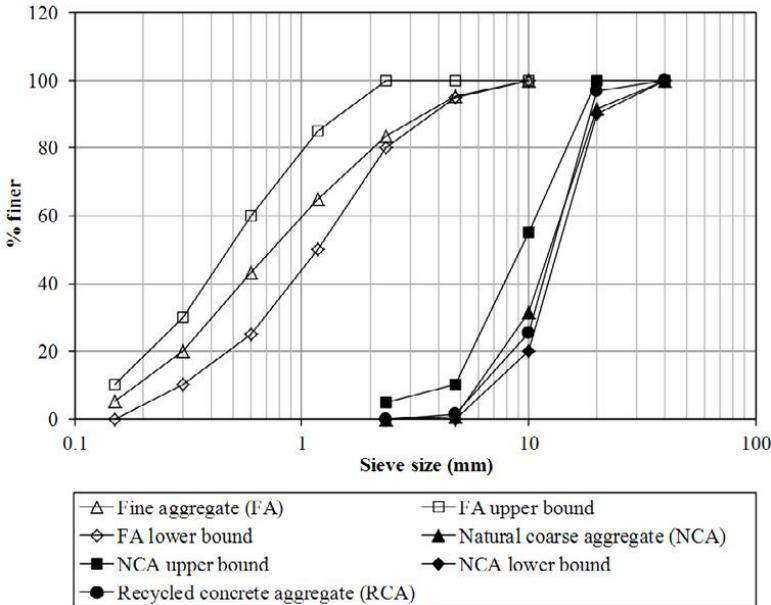


Figura 16: Curvas Granulométricas e Limites Conforme ASTM para Agregados Graúdo e Miúdo.

Fonte: Safiuddin, et al. (2011).

As porcentagens dos componentes utilizados estão apresentadas na Tabela 4. Sendo FA = agregado fino; NCA = agregado graúdo natural; RCA = agregado graúdo reciclado; HRWR = superplastificante; W/C = relação água/cimento; CA = NCA + RCA e TA = FA + CA.

Tabela 4: Proporções de Mistura para Concreto Auto Adensável (volume de concreto = 1m³).

Fonte: Safiuddin, et al. (2011).

Mix	RCA (% CA [*])	W/C ratio	FA/TA [†] ratio	HRWR (% C)	W (kg)	C (kg)	FA (kg)	NCA (kg)	RCA (kg)
CR0	0	0.60	0.50	1.50	205	342	914	914	0
CR30	30	0.60	0.50	1.50	205	342	873.4	611.7	262.1
CR50	50	0.60	0.50	1.50	205	342	870	435	435
CR70	70	0.60	0.50	1.50	205	342	866.2	259.9	606.3
CR100	100	0.60	0.50	1.50	205	342	860.5	0	860.5

A capacidade de escoamento foi determinada de acordo com o método de ensaio ASTM C 1611. Foram realizados os ensaios de espalhamento (*Slump flow test*) e Funil V (*V - Funnel*). Os testes avaliaram o fluxo de espalhamento na ausência de obstruções e também

a capacidade do concreto auto adensável em fluir sob seu peso próprio. Os ensaios foram determinados em conformidade com as especificações EFNARC (*European Federation for Specialist Construction and Concrete Systems*). O teste T_{50} determina o tempo que uma amostra de concreto auto adensável requer para espalhar-se em um disco de 50 cm de diâmetro após retirada de um tronco de cone (*slump test*). Este tempo é conhecido como T_{50} , o qual fornece uma indicação para a viscosidade da mistura de concreto auto adensável. O índice de espalhamento é inversamente proporcional à sua viscosidade. O teste de escoamento no funil em V (T_V) determina o tempo que uma amostra necessita para fluir em uma caixa em forma de V, medindo a capacidade de escoamento do concreto auto adensável. Um tempo de escoamento mais curto sugere uma viscosidade mais baixa, enquanto que um escoamento prolongado indica susceptibilidade de bloqueio da mistura. Os resultados dos ensaios encontram-se disponibilizados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos ensaios realizados em concretos auto adensável no estado fresco com diferentes teores de agregados reciclados.

Fonte: Safiuddin, et al. (2011).

Concrete	Filling ability		
	Slump flow, SF (mm)	T_{50} slump flow time (s)	V-funnel flow time, T_V (s)
CR0	620	3.1	7.3
CR30	640	2.9	7.1
CR50	650	2.6	6.8
CR70	610	3.4	10.2
CR100	550	4.5	18.6

De acordo com a ABNT NBR 15823-1/2010 – Concreto auto adensável, classificação, controle e aceitação no estado fresco (2010), os valores para espalhamento do *slump* teste devem estar de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6: Classe e Limites de Espalhamento do Concreto Auto Adensável em Função de sua Aplicação.

Fonte: ABNT NBR 15823 -1/2010, adaptada.

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicações	Exemplos
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Concreto auto adensável bombeado. Estruturas que exigem curta distância de espalhamento horizontal.	Lajes, revestimento de túneis, estacas e fundações profundas.
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas e Pilares
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com uso de agregado graúdo de pequenas dimensões (< 12,5 mm).	Pilares e Pilares-parede

Conforme a EFNARC (2002), os intervalos de tempo para T_{50} e T_V devem estar em conformidade com a Tabela 7. A EFNARC também define que o ensaio do *Slump Flow Test* (SF) para concreto auto adensável deve ter escoamento mínimo de 650 mm e máximo de 800 mm.

Tabela 7: Valores Máximos e Mínimos para os Ensaio de Espalhamento do Concreto Auto Adensável, conforme EFNARC (2002).

Ensaio	Tempo (segundos)	
	Mínimo	Máximo
T_V	6	12
T_{50}	2	5

De acordo com a ABNT NBR 15823-1/2010 – Concreto auto adensável, classificação, controle e aceitação no estado fresco (2010), os valores para os testes T_v e T_{50} devem estar de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8: Classe e Limites de Viscosidade do Concreto Auto Adensável em Função de sua Aplicação.

Fonte: ABNT NBR 15823 -1/2010, adaptada.

Classe de Viscosidade	Espalhamento (mm)	Aplicações	Exemplos
VS 1 / VF 1	< 2, ou, = 2	Elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e segregação. Concretagens realizados do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, Pilares-parede, Pilares-diafragma, Indústria de pré-moldados e concretos aparente.
VS 2 / VF 2	> 2	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Apresenta menor pressão nas formas e melhor resistência a segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento no preenchimento dos cantos e susceptibilidade a interrupções entre camadas.	Vigas e Pilares

Segundo Safiuddin et al. (2011), geralmente, a vazão mínima de escoamento (*slump*) recomendada para concretos auto adensáveis é de 600 milímetros, para garantir a capacidade de auto consolidação adequada. Com isso, apenas a mistura composta com 100% de agregado graúdo reciclado não cumpriu a exigência de fluidez. No entanto, conforme as especificações EFNARC, a vazão mínima de escoamento é de 650 mm, para o teste de *Slump Flow*, e neste caso apenas o espécime composta com 50% de RCD seria considerada aceitável. Aspectos como maior absorção de água e angulosidade provavelmente influenciaram

significativamente para diminuir a quantidade de água livre na mistura composta apenas com agregado graúdo reciclado. Todavia, as misturas compostas com 30 e 50% de RCD demonstraram comportamento mais adequado quando comparado com a amostra de referência, provavelmente porque a quantidade de agregado miúdo utilizado (FA) foi inferior e conseqüentemente gerou maior disponibilidade de água livre na mistura, tendo em vista que os agregados finos tem poder de absorção de água elevado devido à maior área de superfície. Levando em consideração os valores estabelecidos pela EFNARC para os testes de espalhamento T_{50} , todos os valores obtidos nos ensaios podem ser considerados satisfatórios. As misturas compostas com 30 e 50% de RCD obtiveram os melhores resultados de fluidez, enquanto que as misturas com 100% de agregados graúdos reciclados demonstraram-se bastante coesas devido a características físicas e proporções de mistura, mencionadas anteriormente no teste do *Slump*. De acordo com as especificações e orientações EFNARC, o tempo de escoamento do funil V para concretos auto adensáveis encontram-se dentro dos limites aceitáveis, exceto para misturas com 100% agregados graúdos reciclados, provavelmente devido à baixa capacidade de escoamento determinada no teste T_{50} . O limite máximo recomendado para o índice de segregação é de 18%. No presente estudo, o índice de segregação variou entre 8,3% e 11,2%. Dessa forma, todas as misturas apresentaram razoável resistência à segregação, de acordo com os resultados do teste de estabilidade realizados em peneira número 4. No entanto, a relação de segregação recomendada é de 15%. Dessa forma as misturas com 70% e 100% de RCD não exibiram uma resistência adequada.

2.6.2 Segregação

A segregação pode ser definida como a separação de partículas granulares da mistura, que está muitas vezes associada à sedimentação estática (LIBRE, et al., 2010).

No caso de argamassas autonivelantes espera-se que não ocorra segregação, para isso deve-se atentar durante a escolha granulométrica do agregado, tendo em vista que a redução do tamanho máximo do agregado diminui o risco de segregação.

A incorporação de cinza volante em argamassa autonivelante resulta em um maior índice de segregação quando comparado com mistura composta apenas com cimento Portland. No entanto, o uso de metacaulim como adição em argamassas autonivelantes demonstrou ser eficiente para diminuir a segregação das misturas. As amostras contendo metacaulim (10%, 20% e 30%) demonstraram alta estabilidade para

ambas as relações a/c analisadas, enquanto a segregação estática foi totalmente eliminada, devido à elevada finura do metacaulim. O efeito do metacaulim para estabilizar misturas autonivelantes foi mais significativo em maiores relações a/c. Por exemplo, nas misturas com a/c de 0,45, a substituição de metacaulim por 10% da massa de cimento, promoveu redução no índice de segregação de 160% para 16,8%, enquanto que nas misturas com a/c de 0,35, o efeito da adição de 10% de metacaulim no índice de segregação da argamassa autonivelante foi insignificante (MEHDIPOUR et al., 2013).

O efeito do aditivo modificador de viscosidade na estabilização de misturas de cimento parece ser mais dominante para maiores relações a/c. Foi demonstrado, por Libre et al. (201), que a adição de 1% de aditivo modificador de viscosidade do tipo polissacarídeo, por massa do cimento, nas misturas com a/c de 0,55, proporcionou uma diminuição no índice de segregação de 159% para 83%. Mas, todas as misturas que continham mais do que 1,7% aditivo modificador de viscosidade apresentaram um índice de segregação menor que 30%, valor considerado como muito estável.

Com o prolongado tempo de mistura (acima de 25 minutos), a coesão pode ser reduzida e, conseqüentemente, a falta de coesão pode originar a segregação e sedimentação dos agregados. Pesquisas revelaram que para relações a/c de 0,35, com até 20% de substituição de cinza volante a variação do tempo de mistura não apresentou efeito significativo sobre a fluidez da mistura, e as misturas permaneceram muito estáveis. No entanto, a incorporação de teores de cinza volante superior a 20%, as misturas tornaram-se mais propensas a instabilidade como a segregação e exsudação, principalmente para períodos de mistura de 30 e 40 minutos (MEHDIPOUR et al., 2013).

O aumento nos teores de aditivos SP com base policarboxílico, ou da relação a/c, tende a aumentar o índice de segregação das misturas. Entretanto, o efeito da dosagem de aditivo SP não é linear e depende da relação a/c. Pesquisas realizadas por Libre et al. (2010) revelaram que as misturas preparadas com uma relação a/c de 0,35 tinham um índice de segregação (IS) menor que 30%, ou seja, foram consideradas estáveis, mesmo quando 2% de aditivo SP foi adicionado. Por outro lado, o aumento do teor de aditivo SP de 0% a 2% para as misturas com um a/c de 0,55 ocasionaram mudanças de mistura muito estável (IS = 20%) a uma mistura instável (IS = 158%). Demonstrando assim que o índice de segregação pode afetar nas propriedades mecânicas e de durabilidade da mistura no estado endurecido.

Considerando os resultados encontrados por Libre et al. (2010), com objetivo de avaliar a fluidez e estabilidade em argamassas autonivelantes, utilizando diferentes adições minerais e aditivos químicos, ficou comprovado que o efeito da relação a/c na segregação do agregado é mais importante do que os teores de *filer* calcário e cinzas volantes utilizados nas amostras. Entretanto, o aumento do teor de *filer*, tende a aumentar o risco de segregação. Notou-se que para as relações a/c de 0,55, utilizando aditivo modificador de viscosidade, *filer* calcário e cinzas volantes em baixas dosagens (0,5%, 10% e 10% respectivamente), não ocorreram segregação. Para relações a/c de 0,35, contendo até 20% de cinza volante não apresentaram efeito significativo sobre a variação da fluidez da mistura, e as misturas foram muito estáveis. No entanto, com a incorporação de cinza volante superior a 20%, as misturas tornaram-se mais propensas à instabilidade, como a apresentação de segregação e exsudação.

2.6.3 Exsudação

De acordo com Neville (1997), a exsudação, também conhecida como separação da água, é uma forma de segregação em que parte da água da mistura tende a subir para a superfície da argamassa recém-aplicada. De todos os componentes presentes na argamassa, a água possui menor massa específica, e por isso, tende a deslocar-se para a superfície. Outro fator que beneficia a movimentação da água é o ar aprisionado na argamassa durante o momento de aplicação que tende a migrar para a superfície. Cimentos com partículas mais finas podem minimizar a exsudação, pois partículas menores hidratam mais rápido e diminuem a velocidade de sedimentação.

O aumento do índice de substituição de cinza volante favorece a segregação e exsudação. No entanto, a adição de metacaulim proporciona coesão adequada para controlar a segregação e exsudação. As misturas com maior tempo de agitação (40 minutos) são mais propensas à instabilidade com acumulação de agregados no centro e exsudação de água na superfície da mistura (MEHDIPOUR et al., 2013).

As argamassas autonivelantes com maiores relações a/c são mais propensas à exsudação. Porém, com a adição de metacaulim, mesmo em baixos teores, não ocorre exsudação. Provavelmente, devido à elevada área de superfície específica do metacaulim que resulta em maior adsorção de água. Usando metacaulim, mesmo em baixas dosagens, a exsudação das misturas desapareceu completamente. Em amostras com relação a/c de 0,45, a exsudação de 4,5 cm foi eliminada

quando 10% de metacaulim foi adicionado à mistura (MEHDIPOUR et al., 2013).

2.6.4 **Retração**

A retração pode ser definida como a deformação do material sem qualquer solicitação mecânica externa. A previsão da deformação é de grande importância para o estudo da durabilidade e bom funcionamento em longo prazo. A retração pode originar fissuras, ou rachaduras, no concreto ou argamassa (ITIM et al., 2011). Os principais tipos de retração são por secagem e autógena. A retração autógena seria basicamente a deformação durante o processo de hidratação sem interferências de umidade com o ambiente externo. A retração por secagem pode ser definida como deformação gerada pela troca de umidade entre a estrutura porosa da pasta e o ambiente externo. Como a umidade relativa do ambiente é mais baixa do que na pasta de cimento, ocorre, em consequência, a contração do material (ALRIFAI et al., 2013).

As deformações de retração são influenciadas pela qualidade da microestrutura e o avanço da hidratação do cimento e apresentam relação direta com a resistência à compressão (ITIM et al., 2011). As causas da retração em argamassas autonivelantes são ocasionadas por reações químicas de hidratação do cimento, tensão superficial da água e variações de volume do material do estado plástico para estado endurecido (ONISHI E BIER, 2010).

Para argamassas autonivelantes com adições minerais contendo cinza volante e *filer* calcário, os resultados de retração foram maiores para a segunda adição citada (Figura 17 e 18). As análises foram efetuadas em condições de cura coberta e descoberta. Sendo: Cinza volante (FA), Filer calcário (LSP), Cinza de casca de arroz (RHA), Sílica ativa (SF).

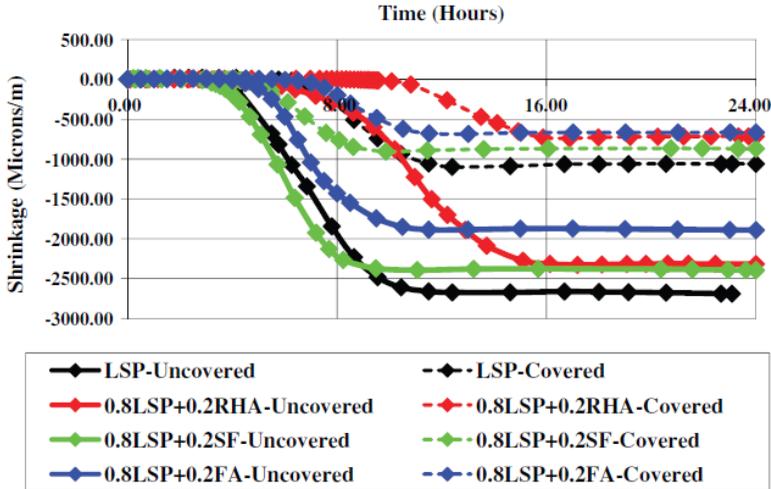


Figura 17: Retração em Sistemas de Argamassas Autonivelantes Utilizando Filer Calcário e Diferentes Adições Ternárias (20%).
 Fonte: Rizwan e Bier (2012).

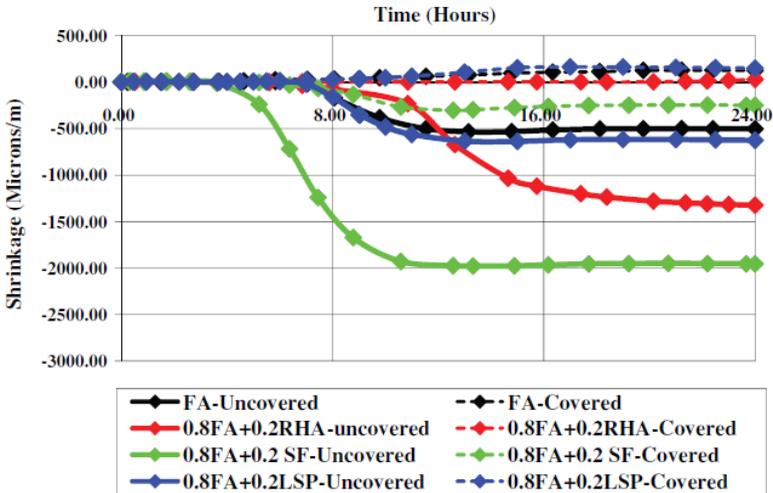


Figura 18: Retração em Sistemas de Argamassas Autonivelantes Utilizando Cinza Volante e Diferentes Adições Ternárias (20%).
 Fonte: Rizwan e Bier (2012).

A alta retração inicial do *filer* calcário foi atribuída à hidratação mais rápida, devido à porosidade interna que proporcionou rápida

absorção e elevado consumo de água. As argamassas compostas com cinzas volantes apresentaram pequena retração inicial (primeiras 24 horas), possivelmente ocasionado pela presença de carbono. Foi comprovado que a substituição de 20% em massa de *filer* calcário por cinza de casca de arroz reduz a retração inicial das argamassas autonivelantes. Porém, as cinzas volantes e cinzas de casca de arroz nas proporções 80:20, respectivamente, apresentaram ótimos resultados em termos de estabilidade de volume com valores baixíssimos ($31\mu\text{m}$) de retração inicial (24h), para as argamassas autonivelantes curadas em condições cobertas. Em condições de cura coberta, as misturas com proporção 80:20 de cinzas volantes e *filer* calcário, também puderam ser consideradas como boa opção, por apresentarem resultados de retração em torno de $152\mu\text{m}$ ao final de 24 horas de medição (RIZWAN e BIER, 2012).

2.6.5 Retração Autógena

Conceitua-se a retração autógena como a tensão gerada em argamassas sem troca de água com o ambiente externo. É originada do processo de hidratação e dessecação devido ao consumo de água proveniente das reações químicas durante o processo de formação dos hidratos (ITIM. et al. 2011).

A evolução da retração autógena depende das reações de hidratação que estão diretamente relacionadas com a quantidade de água disponível na mistura. Portanto, o surgimento desta retração encontra-se fortemente influenciada pela relação a/c e pelos tipos de aglomerantes utilizados.

Segundo Alrifai et al. (2013), a retração autógena depende das características do cimento, em particular das composições químicas e a finura. Conforme os mesmos autores, cimentos com partículas mais finas terão maior velocidade de hidratação, e conseqüentemente, menor quantidade de água disponível na pasta de cimento, aumentando a probabilidade de retração. A retração autógena depende muito do conteúdo e do grau de hidratação do C_3A e C_4AF .

A estrutura dos poros da matriz de cimento se torna mais fina para baixas relações a/c e pequenos teores de adições minerais, resultando na redução da umidade relativa interna. Para maiores relações a/c e maiores teores de adições minerais, o tamanho dos poros e a porosidade total aumentam. Este efeito pode ser explicado pelo estudo da porosidade da pasta, na medida em que a redução da porosidade é acompanhada por um aumento na retração autógena. Em argamassas com maior tamanho de poros e grande porosidade total a pressão do

líquido (água) diminui e o sólido é comprimido, resultando em retração denominada autógena. Em contrapartida, em argamassas com poros menores, a variação de volume por trocas de umidade com o ambiente externo, resulta na retração por secagem (ALRIFAI et al., 2013).

2.6.6 Retração por Secagem

A retração por secagem representa a deformação do material gerada pela troca de água com o ambiente externo. Estes valores representam a combinação entre a dessecação e a carbonatação, que depende da porosidade da microestrutura e sua capacidade para suportar a secagem (ITIM et al. 2011).

A presença das adições minerais com taxas de substituição adequadas viabiliza um aumento da resistência à compressão e uma diminuição de retração por secagem, resultado de sua contribuição para a produção de outros hidratos e para a melhoria da qualidade da microestrutura (ITIM et al. 2011).

A retração por secagem do cimento pozolânico geralmente é maior quando comparada com o cimento Portland comum. Esta retração adicional está relacionada com o teor elevado de CSH. A pasta composta com sílica ativa apresenta uma estrutura porosa com maior teor de finos e, conseqüentemente, com maior retenção de água. Em poros menores as tensões capilares são mais elevadas e quando ocorre a perda de água por diferenças com a umidade relativa ambiente a retração apresenta valores mais significativos. Porém, foi notado que com substituição de 10% da massa de cimento por sílica ativa a retração foi maior em idades iniciais e menor em longo prazo (ITIM et al., 2011).

O empenamento das bordas em argamassa autonivelantes ocorre devido ao gradiente de umidade que surge dentro da espessura da placa. O empenamento das bordas, também denominado de efeito *Curling*, que é causado pelo encolhimento diferencial entre a parte superior e a parte inferior de uma laje, ou uma placa, principalmente devido à retração por secagem. A superfície da laje (topo) seca e encolhe devido às ações externas do meio ambiente, enquanto que a parte inferior fica molhada e sofre poucas alterações nas dimensões. Esse fenômeno foi analisado, através de experimentos desenvolvidos por Pera e Ambroise (2004), conforme Figura 19.

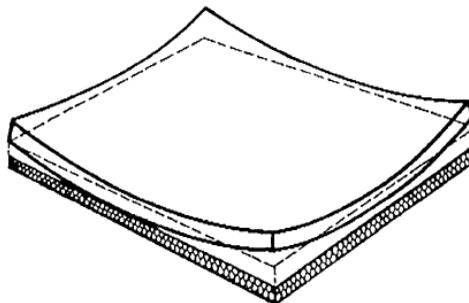


Figura 19: Efeito do Empenamento das Bordas em Argamassa Autonivelantes.
Fonte: Pera e Ambroise (2004).

De acordo com Le-Bihan et al. (2012), as variações dimensionais devido ao processo de secagem das placas é mais acentuada nos cantos (*curling*) e pode ocasionar a fissuração.

Com objetivo de reduzir este efeito Pera e Ambroise (2004) utilizaram Cimento Sufoaluminato de Cálcio e Cimento Portland, com porcentagens de 80% e 20%, respectivamente. O conteúdo de *filer* calcário adicionado foi de 7,5% em massa de aglomerante. A relação água/cimento adotada foi de 0,37 com 2,5% de aditivo SP (policarboxilato), 1,25% de aditivo modificador de viscosidade e 2% de um agente de retenção de água (polietilenoglicol), incorporados à mistura. Através de uma mesa quadrada os deslocamentos de cada canto foram gravados. O valor médio do deslocamento pode ser observado na Figura 20. O valor máximo atingido após 28 dias foi de 1,45 mm, considerado baixo quando comparado com os valores obtidos para as misturas compostas apenas com cimento Portland.

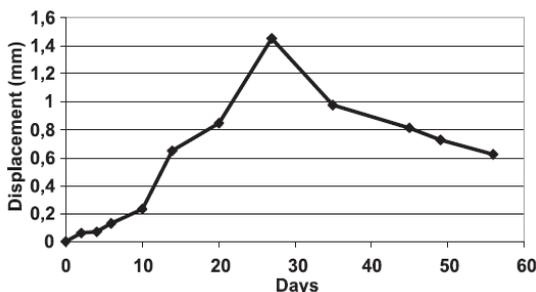


Figura 20: Deslocamento médio vertical dos cantos.
Fonte: Pera e Ambroise (2004).

Foram realizados experimentos por Le-Bihanet et al. (2012) para avaliar a retração de argamassas autonivelantes. O aparato utilizado para medição dos deslocamentos do canto e no centro da placa encontra-se apresentado na Figura 21. A verificação da retração endógena consiste em medir as variações de volume de uma amostra de material, e a retração por secagem consiste em avaliar as variações dimensionais no centro e nos cantos da placa. Os materiais utilizados foram cimento Sulfoaluminato de Cálcio (CSA), aditivo SP (policarboxilato), um agente anti-retração (poliol), um agente de viscosidade (álcool polivinílico + goma Welan).



Figura 21: Aparato utilizado para medir os empenamentos das bordas (*curling*).
Fonte: Le-Bihan et al. (2012).

Os resultados obtidos pelos autores Le-Bihanet et al. (2012), encontram-se disponibilizados na Figura 22. Ao observar o gráfico pode-se verificar que o deslocamento máximo encontrado para 70 horas de ensaio foi de 0,7 mm.

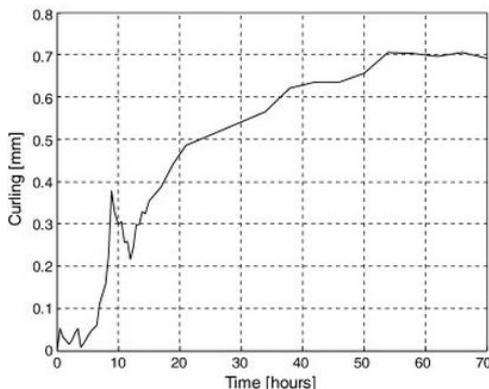


Figura 22: Resultados de empenamento das bordas (Curling).
Fonte: Le-Bihan et al. (2012).

Na bibliografia pesquisada observou-se que não havia publicações com trabalhos realizados com argamassas autonivelantes utilizando RCD, principalmente relacionadas diretamente com retração por secagem, com isso foram analisados experimentos em argamassas.

Em pesquisa desenvolvida por Miranda e Selmo (2006), com objetivo de avaliar o comportamento da incorporação de agregado miúdo reciclado em argamassas, utilizou-se o cimento Portland (CP II E-32), cal hidratada (CH-I) e uma areia fina (0/4,8mm) natural de rio, disponível comercialmente na cidade de São Paulo (Brasil). Os agregados miúdos reciclados provenientes de resíduos de demolição foram obtidos a partir de uma moagem de vinte minutos de resíduos cerâmicos, blocos de concreto e argamassa composta por cimento, cal e areia (mistura de proporção 1:2:9, em volume, agregados úmidos), utilizando uma máquina de trituração 500 ANVI. Foram utilizados como frações do conteúdo total de agregado miúdo, três composições de agregados reciclados de RCD, denominados T2, T4 e T6. Sendo T2 composto por 55% de resíduos cerâmicos e 45% de resíduos de argamassa, T4 composto com 100% de resíduos de argamassa e T6 composto com 45% de resíduos de argamassa e 55% de resíduos de bloco de concreto. Os autores concluíram que o parâmetro "total de materiais mais finos do que 75 μm " na mistura poderia ser melhor parâmetro para controlar o potencial de retração das argamassas do que as proporções de água/cimento. Como podemos observar na Figura 23, as argamassas com agregados reciclados aumentaram a retração por secagem, em 63 dias, proporcionalmente com o aumento total de grãos mais finos do que 75 μm , sem correlação evidente com a relação água /

cimento das argamassas. Esta é uma importante indicação de que a distribuição dos tamanhos dos poros gerados pela presença de finos nas misturas teve maior consequência sobre a retração por secagem do que a da porosidade gerada pela relação água/cimento eficaz. Concluíram também, que as propriedades mecânicas das argamassas devem ser controladas pela relação água/cimento, se os teores de RCD não forem alterados.

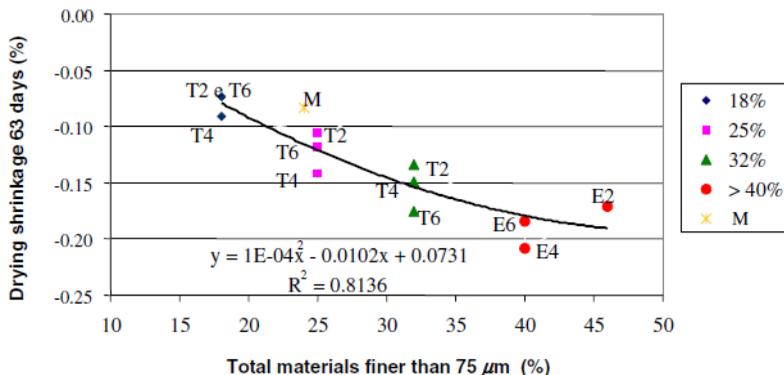


Figura 23: Retração por Secagem em Argamassas, aos 63 Dias de Idade, em Função do Total de Grãos Inferiores a $75 \mu\text{m}$. (UR = $55 \pm 10\%$ e T = $24 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$).
Fonte: Miranda e Selmo (2006).

Os resultados encontrados por Miranda e Selmo (2006) demonstraram ainda que argamassas com teor de 18% de finos inferiores a $75 \mu\text{m}$ apresentaram valores de retração por secagem comparáveis aos da argamassa de referência, composta com cal e cimento (código M), enquanto que todas as outras argamassas, com conteúdo de finos superior a 25%, apresentaram valores de retração maior do que a argamassa de referência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As principais etapas da pesquisa incluíram o beneficiamento dos finos, caracterização física e química das matérias primas, estudo em pasta, dosagem e análise das propriedades em argamassas autonivelantes. A Figura 24 representa um fluxograma resumindo das etapas propostas na pesquisa.

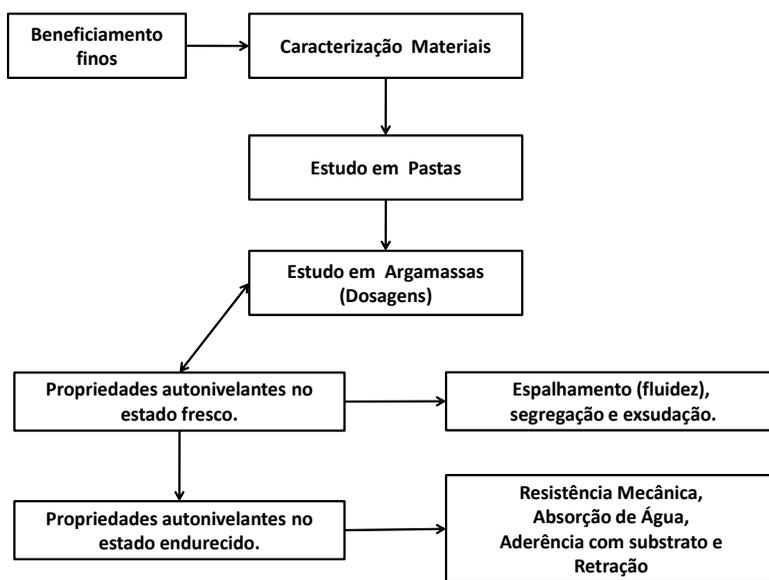


Figura 24: Fluxograma de Atividades da Metodologia Proposta.

Para a caracterização dos materiais foram realizados os ensaios de superfície específica, massa específica, análise granulométrica (peneiramento), granulometria (laser), perda de massa ao fogo, análise química (EDX) e as demais características dos materiais foram fornecida pela ficha técnica do produto disponibilizada pelo fornecedor.

O beneficiamento foi realizado nos finos de RCD, CZP e FC. Para os finos de RCD foi necessário realizar a britagem e moagem, pois os seus grãos foram disponibilizados com dimensões de agregado miúdo e graúdo. Após, os finos de RCD, CZP e FC foram peneirados.

O estudo em pasta teve como objetivo principal avaliar a compatibilidade entre os aditivos testados com o cimento. Foram utilizados aditivos superplastificantes (SP) para reduzir a relação a/c e obter a fluidez adequada.

Após escolha do aditivo, foi realizada a dosagem das argamassas autonivelantes e verificação de suas propriedades no estado fresco e endurecido. A dosagem foi realizada em função da substituição de cimento Portland por finos (FC, RCD e CZP) e também em função da porcentagem de aditivo. Com isso, foram efetuados os ensaios de Espalhamento na Mesa e T_{25} (Tempo de escoamento até 25 cm de diâmetro) para a avaliação das propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco, tais como, escoamento, segregação, exsudação e consistência. Para avaliar as propriedades das argamassas autonivelantes, no estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência mecânica (compressão e flexão), absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração, retração linear e empenamento dos cantos (*Curling*).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP V ARI (Alta Resistência Inicial). Este material foi doado por uma empresa concreteira da região da grande Florianópolis.

O cimento CP V ARI foi selecionado para utilização na pesquisa por apresentar características fundamentais e indispensáveis que devem ser consideradas nas argamassas autonivelantes, como elevada resistência inicial e final, mas também pela disponibilidade comercial deste produto.

3.1.2 Adições

As adições *filer* calcário, finos de RCD e finos de CZP foram utilizadas na pesquisa como substitutos do cimento Portland CPV ARI. A substituição do cimento por finos foi realizada com correção da massa específica.

O *filer* calcário foi utilizado como adição mineral para definir a mistura de referência, tendo em vista que outros autores já utilizaram *filer* calcário para produzir argamassas auto adensáveis e/ou autonivelantes (Pera e Ambroise, 2004; Sahmaram et al., 2006; Georgin et al., 2008; Libre et al., 2010; Onishi e Bier 2010; Rizwan e Bier, 2012).

O fino de RCD usado na pesquisa foi proveniente de uma usina de beneficiamento, situada na cidade de São Bernardo do Campo, estado de São Paulo, Brasil. O RCD disponibilizado pela usina é proveniente de operações de desmanche para reforma, demolições e restos de obras, ou seja, material desperdiçado por mau uso ou retrabalho.

A Figura 25 apresenta um organograma detalhado do processo de produção, coleta e preparo dos agregados reciclados.

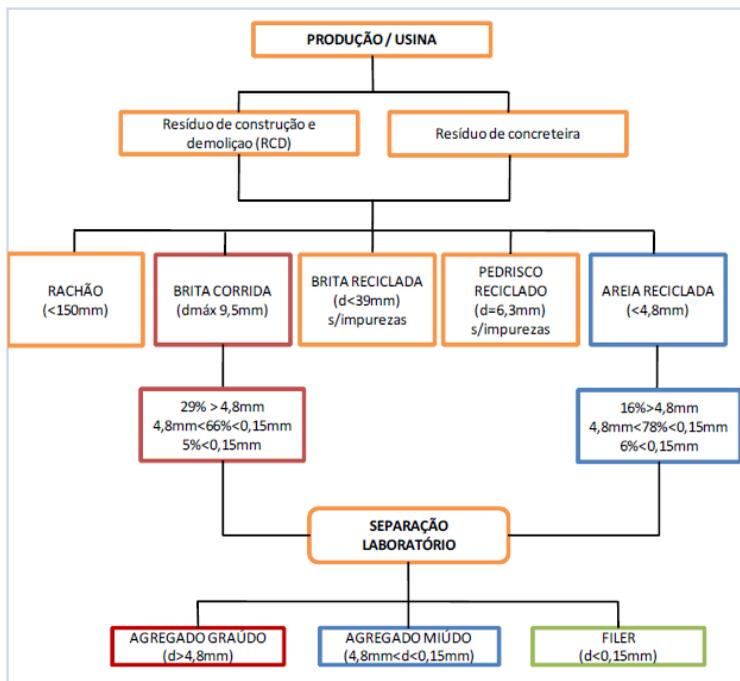


Figura 25: Fluxograma de Produção, Coleta e Preparação de RCD.

Fonte: Perius (2009).

O material (RCD) disponibilizado para a pesquisa encontrava-se com granulometria de agregado graúdo e miúdo. Para obter frações finas ($d < 0,15\text{mm}$) de RCD, primeiramente foi efetuado um processo de trituração e posteriormente moagem do material. Após, os finos de RCD foram peneirados em malha 0,15mm.

A cinza pesada utilizada foi recolhida em tanques de disposição do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado na cidade de Capivari de Baixa, Santa Catarina. Após, a cinza foi peneirada em malha 0,15mm para obter grãos com dimensões finas.

O processo esquemático de queima de carvão mineral em usinas termelétricas é apresentado na Figura 26.

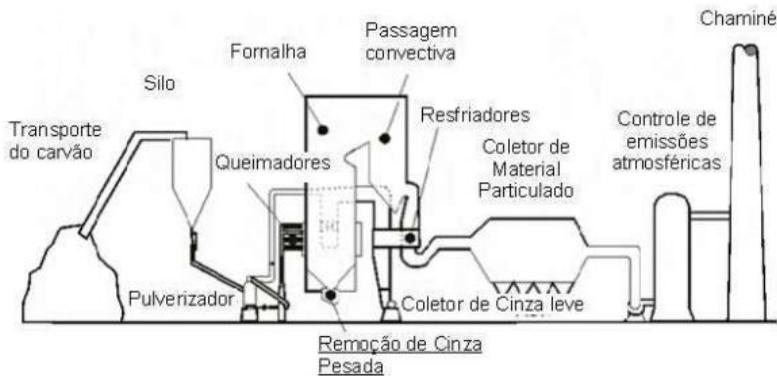


Figura 26: Processo de queima de carvão em usinas termelétricas.

Fonte: Farias (2005).

A cinza pesada foi coletada em um recipiente cheio de água posicionado em baixo da câmara de combustão. Quando uma quantidade suficiente de cinza pesada estava no recipiente, esse foi removido através de um jato de água de alta pressão e conduzido por um canal de limpeza para tanques de disposição ou para bacias de decantação para perda de umidade.

3.1.3 Agregado Natural

Como agregado foi utilizada a areia natural fina extraída em leito de rio, com origem quartzosa.

3.1.4 Aditivos

Os aditivos utilizados foram redutores de água do tipo superplastificante (SP). Foram testados dois tipos de aditivos, o primeiro com base química de policarboxilato, denominado na pesquisa como aditivo A, e o segundo com base química de éter policarboxílico, correspondente ao aditivo B.

As características dos aditivos SP, conforme ficha técnica dos fornecedores, encontram-se disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9: Ficha técnica aditivos superplastificantes.

Produto	Dosagem recomendada em função da massa de cimento	Cor	ph	Massa específica (g/cm ³)	Base química
A	0,3 à 1%	Castanho claro	5,5 ± 1,0	1,1 ± 0,2	Policarboxilato
B	0,2 à 1%	Castanho turvo	6,0 ± 1,0	1,087 ± 0,2	Éter policarboxílico

3.1.5 Água

As pastas e argamassas foram moldadas com água da rede pública local, fornecida pela CASAN (SC).

3.2 METODOS

A pesquisa foi realizada em quatro etapas. A Tabela 10 resume os ensaios realizados e os objetivos das etapas.

Tabela 10: Metodologia pesquisa: Etapa, ensaio e Objetivo.

Etapa	Ensaio	Objetivo
Beneficiamento dos finos	Britagem / Moagem	Fazer a equivalência dos grãos finos.
	Peneiramento	
Caracterização dos Materiais	Análise Granulométrica	Determinar as propriedades físicas e químicas dos materiais que serão utilizados.
	Granulometria a Laser	
	Superfície Específica (<i>Blaine</i>)	
	Massa Específica	
	Análise Química	
Estudo em Pasta	Compatibilidade de Aditivo (cone de <i>Marsh</i>)	Verificar a compatibilidade entre o cimento e aditivos.
Estudo em Argamassa	Espalhamento na mesa (<i>Mini Slump Flow Table</i>)	Ajustar o teor de aditivo e verificar as propriedades da argamassa no estado fresco.
	Resistência Mecânica (Compressão e Flexão)	Verificar as propriedades das argamassas autonivelantes no estado endurecido e analisar se as misturas compostas com finos reciclados possuem diferença significativa sobre o efeito <i>Curling</i>
	Absorção de Água por Capilaridade	
	Aderência à tração	
	Retração Linear	
Empenamento das bordas (<i>curling</i>)		

Após a caracterização das matérias primas, foi realizado o processo de beneficiamento dos finos. Primeiramente, britagem e moagem dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Em seguida, foi realizado o peneiramento dos finos de FC, RCD e CZP, em peneira com malha 0,15mm e fundo.

A próxima etapa foi realizar um estudo em pasta de cimento através do ensaio de compatibilidade de aditivo, utilizando o cone de *Marsh*. Para este ensaio foram testados dois aditivos SP, A e B, com bases químicas policarboxilato e éter policarboxílico, respectivamente.

O estudo em argamassas foi iniciado realizando experimentos com objetivo de definir a dosagem das misturas e avaliar as propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco e

endurecido. Para isso, foi realizado o ensaio de espalhamento na mesa (*mini slump flow*). A dosagem do teor de aditivo, necessário para obter o espalhamento requerido, variou em função da porcentagem de substituição de cimento (10%, 15% e 20%) e dos teores dos finos (FC, RCD e CZP). No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência mecânica (compressão e tração na flexão), absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração, retração linear e empenamento dos cantos (*curling*).

3.2.1 Beneficiamento dos finos

O processo de Beneficiamento do RCD foi dividido em três etapas: Britagem, Moagem e Peneiramento. Os procedimentos de britagem e moagem do RCD foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O material que necessitou de maior beneficiamento foi o RCD, pois este foi disponibilizado com tamanho de grãos superiores a 2,4mm. Com isso, o RCD necessitou primeiramente de um processo de redução de tamanho dos grãos. Após, os finos (FC, RCD e CZP) foram peneirados com a finalidade de obter grãos com dimensões inferiores a 0,15 mm.

3.2.1.1 Britagem do RCD

A britagem do RCD foi realizada nos grãos com dimensões superiores a 2,4mm. As amostras de RCD com granulometria de 4,8mm, 6,3mm, 9,5mm e 12,7mm, foram processadas em triturador, do tipo mandíbula, marca Marumby 5CV, por sucessivas vezes até que a granulometria do produto final se tornasse inferior a 2,4mm.

3.2.1.2 Moagem do RCD

Após obter grãos de RCD com dimensões inferiores a 2,4mm foi iniciado o processo de moagem, em um moinho de rodas, por um período de tempo de 5 minutos e após o material foi peneirado.

3.2.1.3 Peneiramento dos Finos

Os finos FC, RCD e CZP foram submetidos a um processo de peneiramento e os grãos utilizados foram os passantes na peneira de malha 0,15mm.

3.2.2 Caracterização dos Materiais

Para todos os ensaios a temperatura do ar no laboratório foi de (23 ± 2) °C e a umidade relativa do ar foi de (60 ± 5) %.

3.2.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada em conformidade com a orientação contida na norma ABNT NBR NM 248/2003 Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.

3.2.2.2 Granulometria à Laser

O ensaio de granulometria a laser foi realizado no laboratório Nanotec, da UFSC, utilizando o equipamento Microtrac S3500 (Figura 27).

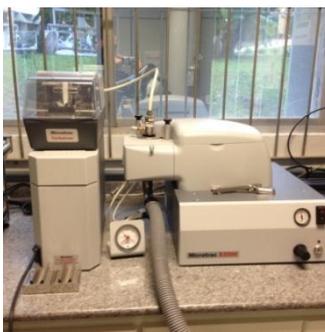


Figura 27: Equipamento Microtrac S3500.

3.2.2.3 Massa Específica

A massa específica da areia e dos finos (FC, RCD e CZP) foram determinadas pelo método do picnômetro de acordo com os procedimentos definidos na ABNT NBR NM 52/2009 Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

A massa específica do cimento foi determinada através do método do frasco volumétrico de *Le Chatelier* em conformidade com a ABNT NBR NM 23/2001 Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

3.2.2.4 Área Específica

O ensaio para verificar a área da superfície específica dos materiais (cimento e finos) foi realizado pelo método de *Blaine*, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR NM 76/1998 Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de *Blaine*).

3.2.2.5 Análise Química

O ensaio de Perda de Massa ao Fogo foi realizado em uma mufla disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC. A taxa de aquecimento da mufla foi de 10°C por minuto até que se atingiu uma temperatura final de 900°C , permanecendo nessa temperatura por o período de uma hora, com a finalidade de verificar a perda de massa ao fogo dos materiais. Esse ensaio foi realizado nos materiais com grãos inferiores a $0,15\text{mm}$ de diâmetro.

A análise química foi realizada no laboratório de ValoRes, da UFSC, em grãos inferiores a $0,15\text{mm}$, prensados em forma de pastilha (Figura 28, detalhe na posição esquerda inferior) e após as pastilhas foram ensaiadas no equipamento *Energy Dispersive X-Ray Spectrometer* 700 (EDX 700), da marca *Shimadzu* (Figura 28).



Figura 28: Equipamento para Realização do Ensaio EDX.

3.2.2.6 Absorção em placas de Concreto (substrato):

As placas de concreto foram utilizadas como substrato para realização do ensaio de resistência de aderência à tração. As placas de concreto tinham dimensões de $45 \times 45 \times 3$ cm e resistência mecânica de 35 MPa. Foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, com objetivo de verificar o potencial de absorção das placas. O ensaio de absorção de água no substrato foi realizado utilizando os mesmo procedimentos definidos no ensaio de absorção de água por capilaridade em argamassas (Item 3.2.4.2.2). No entanto, a altura das amostras extraídas das placas foram de 3cm .

3.2.3 Estudo em Pasta

Os estudos em pastas foram realizados para avaliar a compatibilidade entre o cimento e o aditivo.

As pastas de cimento foram confeccionadas com relação água/cimento de 0,4 e os teores de aditivos testados foram 0,1%, 0,2%, 0,4% e 0,6% em relação à massa de cimento CPV ARI.

As Pastas foram identificadas conforme o teor de aditivo (Tabela 11).

Tabela 11: Identificação das Pastas.

Pasta REF	sem aditivo
Pasta 1	0,1% de aditivo A
Pasta 2	0,2% de aditivo A
Pasta 3	0,4% de aditivo A
Pasta 4	0,6% de aditivo A
Pasta 5	0,1% de aditivo B
Pasta 6	0,2% de aditivo B
Pasta 7	0,4% de aditivo B

3.2.3.1 Aditivos

O ensaio de dosagem do aditivo foi realizado utilizando o cone de *Marsh* com objetivo de avaliar a compatibilidade do aditivo químico com o cimento Portland CPV ARI. Neste ensaio, foi avaliado o tempo de escoamento da pasta de cimento em função da porcentagem de aditivo.

Foram testados dois aditivos SP, A (policarboxilato) e B (éter carboxílico), com objetivo de reduzir a relação a/c e obter a fluidez adequada. A escolha dos aditivos SP foi baseada nos resultados de pesquisas desenvolvidas por outros autores (Pera e Ambroise, 2004; Sahmaram et al. 2006; Georgin et al 2008; Libre et al. 2010; Onishi e Bier, 2010; Katsiadramis et al. 2010; Rizwan e Bier, 2012; Medipour et al. 2013).

Para todas as pastas foram realizadas medições dos tempos de escoamento necessários para preencher o volume de 800 ml, em um frasco graduado, posicionado abaixo da extremidade inferior do cone de *Marsh* (Figura 29). Antes da medição dos tempos de escoamento a pasta foi misturada lentamente com uma espátula por um período de 30 segundos para realizar a homogeneização da mistura. As medidas do tempo de escoamento foram registradas em períodos de tempo pré definidos até o instante em que a pasta não pudesse ser mais capaz de fluir no cone. Os tempos de medição foram: 0 (logo após preparo da mistura); 300; 600; 900; 1200; 1800; 3600; 4500; 5400; 7200; 9000; 12600; 16200; 19800; 23400; 27000; 30600; 34200; 37800; 41400; 45000 e 48600 segundos.



Figura 29: Aparato utilizado no ensaio de compatibilidade de aditivo.

O ensaio teve como objetivo analisar o teor ótimo de aditivo para obter um bom escoamento da pasta sem que ocorram mudanças significativas no processo de hidratação do aglomerante. Para isso, foram avaliadas a fluidez e a retenção da fluidez da pasta em relação ao teor de aditivos (A e B).

3.2.4 Estudo em Argamassas

As argamassas autonivelantes de referencia foram compostas com cimento Portland, areia natural, adição mineral (FC), aditivo químico e água. As demais misturas tiveram substituição parcial da adição de referencia (FC) por finos de RCD e CZP, além de aditivo químico, cimento Portland, areia natural e água. Com isso, foram produzidas misturas ternárias e quaternárias, variando o teor das adições (finos de RCD, CZP e FC). Os finos (RCD, CZP e FC) foram utilizados como substitutos parciais do cimento Portland CP V ARI, em porcentagens de 10%, 15% e 20%. O fluxograma esquemático dos teores de finos utilizados é mostrado na Figura 30.

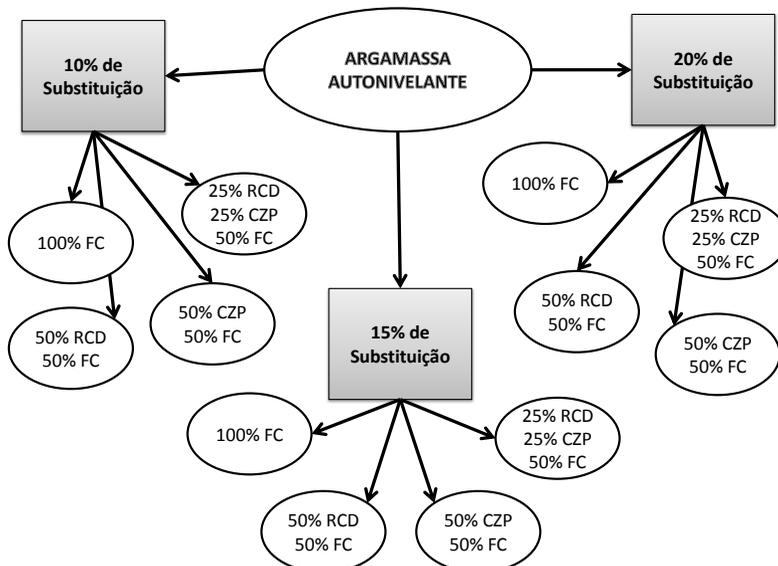


Figura 30: Substituição Parcial do Cimento por finos(FC, RCD e CZP).

A substituição do cimento pelos finos foi realizada com relação ao volume absoluto dos materiais, em função da diferença significativa entre as massas específicas dos finos.

As argamassas autonivelantes foram identificadas de acordo com o material utilizado e o teor de substituição de cimento (Tabela 12).

Tabela 12: Identificação das argamassas autonivelantes.

FC 10	10% de substituição de cimento por FC (100%).
FC + RCD 10	10% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (50%).
FC + CZP 10	10% de substituição de cimento por FC (50%) + CZP (50%).
FC + RCD + CZP 10	10% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (25%) + CZP (25%).
FC 15	15% de substituição de cimento por FC (100%).
FC + RCD 15	15% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (50%).
FC + CZP 15	15% de substituição de cimento por FC (50%) + CZP (50%).
FC + RCD + CZP 15	15% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (25%) + CZP (25%).
FC 20	20% de substituição de cimento por FC (100%).
FC + RCD 20	20% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (50%).
FC + CZP 20	20% de substituição de cimento por FC (50%) + CZP (50%).
FC + RCD + CZP 20	20% de substituição de cimento por FC (50%) + RCD (25%) + CZP (25%).

O preparo das argamassas autonivelantes foi efetuado de forma similar aos procedimentos descritos pela NBR 13276/2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Porém, como se trata

de argamassas autonivelantes não foi necessário realizar nenhum tipo de adensamento.

O traço estabelecido para esse sistema de argamassas foi 1:2 (cimento/areia), visando alcançar elevadas resistências mecânicas, conforme bibliografia (Sahmaram et al., 2006; Libre et al., 2010; Rizwan e Bier, 2012; Medipour et al., 2013). A relação água/cimento utilizada foi 0,5, conforme bibliografia (Katsiadramis et al., 2010; Libre et al. 2010; Onishi e Bier 2010; Turk, 2012).

Inicialmente foram realizados experimentos para avaliar as propriedades da argamassa no estado fresco e dessa forma obter misturas com características autonivelantes. Com isso, foi efetuada a dosagem das argamassas para determinação dos teores ótimos de aditivo e porcentagem de finos. Para isso, foram testados teores de aditivo variando entre 0,2% até 0,5% por massa de aglomerante.

Após a realização dos ensaios no estado fresco foram desenvolvidos os ensaios no estado endurecido para avaliar a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração, retração linear e empenamento das bordas (*curling*), visando obter indicadores de durabilidade.

3.2.4.1 Ensaios no Estado Fresco

Os ensaios no estado fresco tiveram como objetivo principal obter argamassas com propriedades de espalhamento entre 24 e 27 cm, sem que ocorressem sinais de segregação. Com isso, foi realizada a dosagem das argamassas através do ensaio de espalhamento. Somente após realização dos ensaios de espalhamento e verificação das propriedades peculiares em argamassas autonivelantes, no estado fresco, foram definidos os traços para realização dos demais experimentos da pesquisa. Nessa etapa, também foram verificadas as evoluções das temperaturas de hidratação das argamassas em função do tempo.

3.2.4.1.1 *Espalhamento na Mesa*

O ensaio de espalhamento na mesa teve como objetivo principal avaliar o teor de aditivo ótimo para um espalhamento em conformidade com as exigências necessárias em argamassas autonivelantes. Este ensaio também serviu para verificar visualmente sinais de segregação dos constituintes das misturas em função dos teores de aditivos e finos utilizados.

O ensaio de espalhamento consistiu no preenchimento de um mini tronco de cone, o qual foi retirado verticalmente para que a

argamassa autonivelante pudesse se espalhar livremente sob seu peso próprio (Figura 31). Em seguida, foram medidos dois diâmetros ortogonais. O valor final registrado foi a média destas duas medidas (d). O procedimento para o ensaio em argamassas encontra-se definido na ABNT NBR 13276-1995 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Porém, como se trata de experimento em argamassa autonivelante, não foi necessário efetuar adensado mecânico na mesa, para que se pudesse avaliar a propriedade de escoamento sem interferências externas.



Figura 31: Ensaio de espalhamento na mesa.

Para escolha dos teores de aditivo SP das argamassas autonivelantes, dessa pesquisa, foi determinado um espalhamento entre 25 e 26 cm, de acordo com bibliografia pesquisada (Tabela 13). Também foi levado em consideração, as misturas com melhor comportamento no estado fresco, ou seja, as misturas que se comportaram coesas sem sinais de segregação ou exsudação e apresentaram um bom aspecto visual.

Tabela 13: Valores de espalhamento para argamassas autonivelantes.

Autores	Georgin et al. (2008)	Katsiadramis et al. (2010)	Rizwan e Bier (2012)
Espalhamento	25 a 27 cm	24 a 26 cm	≥ 26 cm

O ensaio de espalhamento, em concreto auto adensável, serve também para medir o tempo necessário de escoamento até 50 cm de diâmetro (T_{50}), relacionando a velocidade de fluidez com a viscosidade. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma NBR 15823-2/2010 – Determinação do Espalhamento e Tempo de

Escoamento – Método do cone de Abrams, estabelece os procedimentos necessários para realização dos ensaios de espalhamento (*slump Flow*) e tempo de escoamento (T_{50}) em concreto auto adensável. No entanto, como se tratou do teste em argamassas autonivelantes foi utilizado o mini cone e o tempo de espalhamento foi definido para atingir 25 centímetros de diâmetro (T_{25}), como realizado por Rizwan e Bier (2012). Nos testes realizados, por estes autores, os tempos considerados satisfatórios variaram entre 12 e 18 segundos.

Os primeiros testes de dosagem procederam nas argamassas de Referência. Parte do cimento (10%, 15% e 20%) foi substituído por *filer* calcário (FC) e foram testados os seguintes teores de aditivos SP (policarboxilato): 0,2%; 0,25%; 0,3%; 0,35%; 0,4%; 0,45% e 0,5% da massa de aglomerantes.

Os próximos ensaios de espalhamento na mesa foram desenvolvidos em argamassas autonivelantes com substituições de 10%, 15% e 20% de cimento por *Filer* Calcário (FC) e finos de resíduos de Construção e Demolição (RCD). A substituição do cimento (10%, 15% e 20%) foi dividida entre o FC e RCD (50% cada fino). Foram testados os seguintes teores de aditivos SP: 0,3%; 0,35%; 0,40%; 0,45 e 0,5% da massa de aglomerante.

Em seguida, foram realizados os mesmo ensaios de maneira idêntica aos realizados em misturas de FC e RCD, mas utilizando FC e finos de Cinza Pesada (CZP).

Por último, foram realizados os ensaios de espalhamento na mesa para as misturas formuladas com FC, RCD e CZP. Para estas misturas os teores de substituição de cimento (10%, 15% e 20%) por finos foram de 50% para o FC, 25% para o RCD e 25% para a CZP, em função do volume absoluto dos materiais.

3.2.4.1.2 *Evolução da Temperatura de Hidratação das Argamassas*

Para avaliar a evolução da temperatura das argamassas foi utilizado um calorímetro semi adiabático, tendo como base os procedimentos do laboratório de VaLores. O aparato experimental está apresentado na Figura 32.

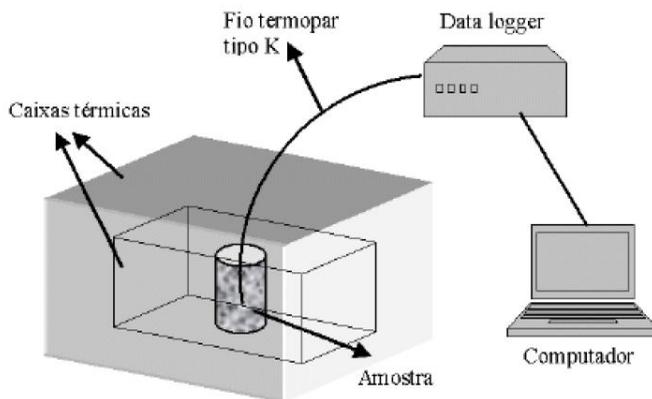


Figura 32: Aparato utilizado no ensaio de evolução da temperatura das argamassas.

Fonte: Andrade (2008).

Após produção das argamassas escolhidas, no ensaio de espalhamento, as misturas foram colocadas em um recipiente cilíndrico de poliestireno, com altura de 12 cm e diâmetro de 7 cm, ainda no estado fresco. Um termopar, tipo K, foi posicionado na metade da altura da amostra para medir a evolução da temperatura. O recipiente cilíndrico foi revestido com uma folha de alumínio e posteriormente, foi colocado em uma caixa térmica (Figura 33).



Figura 33: Recipiente cilíndrico e Fio Termopar (esquerda) e Amostra na Caixa Térmica (direita).

As medidas das temperaturas das argamassas autonivelantes foram processadas em um data *Logger Hewlett-Packard*, modelo

34970A conectado a um computador, com leituras a cada 20 segundos (Figura 34).



Figura 34: Recipiente com Amostra (esquerda) e Aparato para Medição da temperatura das argamassas (direita).

O experimento permitiu medir a variação da temperatura ao longo do tempo de ensaio indicando a evolução da cinética de hidratação da argamassa.

De acordo com Silva (2001), a curva de evolução da temperatura é dividida e apresentada conforme os processos químicos, devido às reações de hidratação em pastas de cimento (Figura 35).

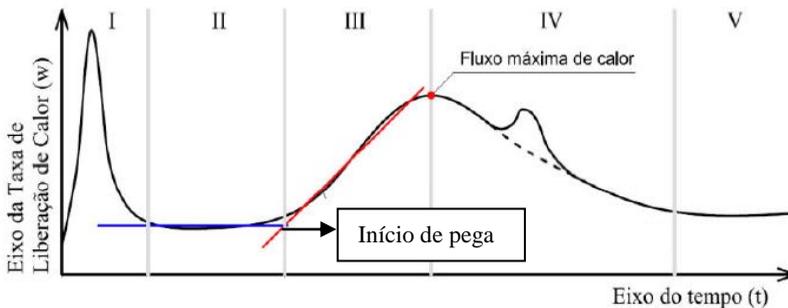


Figura 35: Evolução da liberação de calor em função do tempo.

Fonte: Silva (2001) - Adaptado.

O contato do cimento com a água gera uma alta liberação de calor (I), correspondente à hidratação inicial na superfície das partículas, que ocorre de maneira rápida e intensa. O período (II) é denominado de período de indução ou dormência, onde uma pequena quantidade de calor é liberada e a velocidade das reações é reduzida. O período (III), chamado de período de aceleração, é caracterizado pela formação dos principais produtos de hidratação do cimento, como o CSH, e está associado à liberação de um elevado calor de hidratação. No período (III) encontram-se o início e fim de pega. O período (IV) é conhecido como período de desaceleração ou pós-aceleração que se inicia após o fim de pega, com a redução das reações de hidratação. O período (V) é denominado como estágio final onde a liberação de calor é insignificante (TAYLOR, 1990).

3.2.4.2 Ensaios no Estado Endurecido

3.2.4.2.1 Resistência à Tração na Flexão e Compressão

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, assim como a moldagem e cura dos corpos de prova foram realizados conforme a norma técnica da ABNT denominada NBR 13279/2005 Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão. Como se tratava de argamassa autonivelante não foi necessário realizar o procedimento de adensamento, como previsto na NBR 13279/2005.

Os corpos de prova foram rompidos no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC em uma prensa, marca Solotest (Figura 36), posicionando o corpo de prova no dispositivo de apoio do equipamento e aplicando uma carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura do mesmo. A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 3:

Sendo:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

$$\text{Equação 3: } R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{40^3}$$

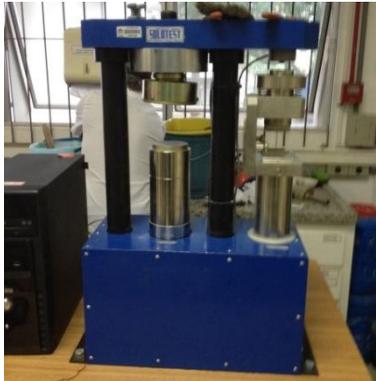


Figura 36: Equipamento para ruptura dos corpos de prova.

Para o ensaio de resistência à compressão, utilizou-se a mesma amostra e prensa citada no ensaio de resistência à tração na flexão. Após o ensaio de flexão, os corpos de prova rompidos em duas partes, foram posicionados no dispositivo de apoio do equipamento e então foi aplicada uma carga de $500 \pm 50 \text{ N/s}$ até a ruptura das amostras. A resistência à compressão é calculada pela Equação 4 e seus valores finais representam a média aritmética das amostras.

Sendo:

R_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = carga máxima aplicada (N);

A = área da seção, considerada quadrada 40×40 (mm²).

$$\text{Equação 4: } R_c = \frac{F_c}{A}$$

3.2.4.2.2 Absorção de Água por Capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, foi utilizado o procedimento desenvolvido pelo laboratório de ValoRes. Este procedimento consiste em medir a variação da altura de uma coluna de água, contida em um tubo de Mariotte graduado, em função do tempo. A variação de altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pelo contato com a base da amostra. Os corpos de prova tiveram suas faces, laterais e superior, envolvidas com um filme de PVC com objetivo de minimizar a evaporação de água através dessas superfícies. A leitura do volume de água absorvida foi determinada de maneira contínua desde os primeiros instantes do ensaio. Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados nas argamassas com 28 dias de idade (Figura 37).



Figura 37: Aparato utilizado no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a Equação 5, prevista na NBR 9975 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade (1995).

Sendo:

A = absorção de água, em porcentagem (%);

mh = massa da amostra em condições úmidas (g);

ms = massa da amostra seca (g).

$$\text{Equação 5: } A = \frac{mh - ms}{ms} \times 100$$

A relação entre o volume do líquido absorvido (cm³) pela área da seção transversal do corpo de prova (cm²) em função da raiz do tempo permitiu determinar o coeficiente de sorptividade. A sorptividade foi obtida através da inclinação da reta formada.

3.2.4.2.3 Resistência de Aderência à Tração

Os ensaios para determinação da aderência à tração foram realizados de acordo com a norma técnica da ABNT NBR 13528/2010 Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.

Antes da moldagem das argamassas, os substratos foram previamente umedecidos para evitar perda de água excessiva da argamassa para o substrato. As argamassas autonivelantes foram moldadas em formas de madeira fixada sobre placas de concreto (Figura

38). Os traços utilizados foram os escolhidos após os ensaios de espalhamento na mesa. Após 28 dias da moldagem, foram coladas pastilhas nas placas para que o ensaio fosse realizado. O ensaio foi realizado com um dinamômetro acoplado à pastilha e foi aplicado um esforço de tração perpendicular ao corpo de prova com uma taxa de carregamento de 250 ± 50 N/s, até a ruptura. A Figura 37 mostra o aparato utilizado no experimento.



Figura 38: Aparato Utilizado no Ensaio de Aderência à Tração.

Esse ensaio foi realizado no LMCC da UFSC e a resistência de aderência à tração foi calculada de acordo com a Equação 6.

Sendo:

R = resistência de aderência a tração (MPa);

P = carga de ruptura (N);

A = área do corpo de prova (mm^2).

$$\text{Equação 6: } R = \frac{P}{A}$$

3.2.4.2.4 Variação e Estabilidade Dimensional

Para avaliar a estabilidade dimensional (*curling*) o experimento em placas foi realizado de maneira similar aos desenvolvidos por Pera e Ambroise (2004) e Le-Bihanet al. (2012), que avaliaram a retração por secagem em argamassas autonivelantes.

O equipamento utilizado para verificar a variação e estabilidade dimensional das argamassas autonivelantes foi desenvolvido pelo *Institut National des Sciences Appliquées* (INSA), de Lyon, França, e foi aprimorado pelo laboratório do grupo ValoRes.

Os ensaios para medir os deslocamentos dos cantos em placas (*Curling*) e a variação dimensional (retração linear) de argamassas autonivelantes foram realizados simultaneamente com a mesma amostra. Os valores de variação volumétrica foram coletados automaticamente

através de um equipamento de aquisição de dados (*Data Logger*), o qual estava conectado a um computador para o armazenamento dos dados (Figura 39).



Figura 39: Aparato utilizado nos ensaios de *Curling* e Retração Linear.

A retração linear das argamassas foi medida utilizando um sensor de deslocamento, do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear). A amostra foi moldada num molde de aço. Para reduzir o atrito entre a amostra e o molde, placas de teflon foram dispostas nas faces do molde. As dimensões do prisma foram 50 cm de comprimento, 7 cm de largura e 7 cm de altura. Após início de pega, as faces laterais do molde de aço foram removidas e as medidas de deslocamento foram iniciadas.

Para medir o empenamento (*curling*) foram dispostos quatro LVDTs nos cantos e dois no centro da placa (Figura 40). As dimensões da placa utilizada foram de: 33 cm (largura), 33 cm (comprimento) e 3 cm (espessura). Um corte esquemático do equipamento está disponibilizado na Figura 40. Por fim, foi fixada sob o equipamento, uma célula de carga que registrou a cinética de perda de massa de água para o ambiente.

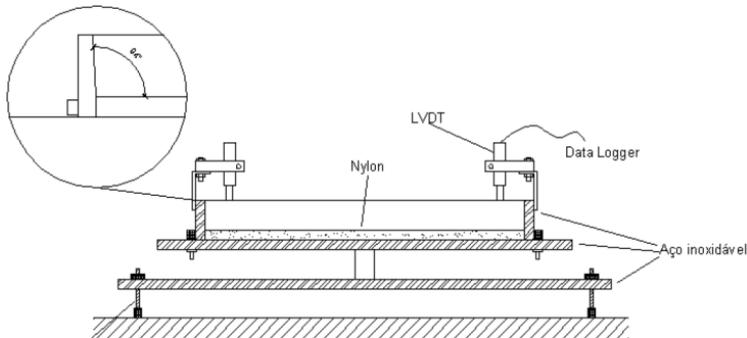


Figura 40: Corte Esquemático do Equipamento para Medir a Estabilidade Dimensional.

Fonte: Perius (2009).

Em paralelo, para determinar o tempo de endurecimento das argamassas, foi realizado o experimento de evolução da temperatura de hidratação das argamassas. Dessa forma, após início de endurecimento da argamassa, os equipamentos para coleta de dados de retração e *curling* foram ligados por um período de 5 a 10 dias consecutivos. A temperatura ($23^0 \pm 2$) e umidade ($60\% \pm 5$) foram controladas durante todo o período de ensaio. A representação dos LVTDs está disponibilizada na Figura 41.

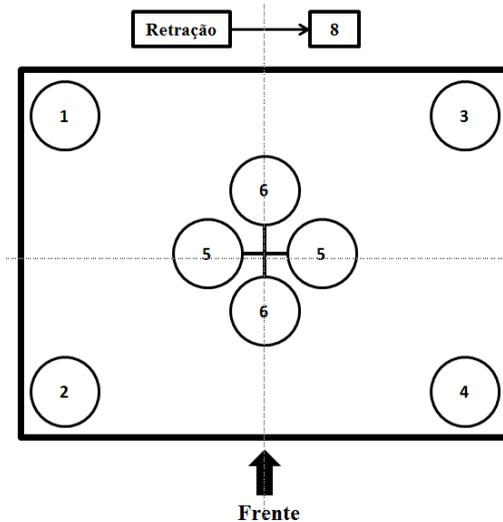


Figura 41: Localização e numeração dos LVTDs para medição dos deslocamentos do *curling* e da retração linear.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica da areia natural e os limites das zonas (ótima e utilizável), conforme ABNT NBR 7211/2009 – Agregados para concreto, encontram-se disponibilizados na Figura 42.

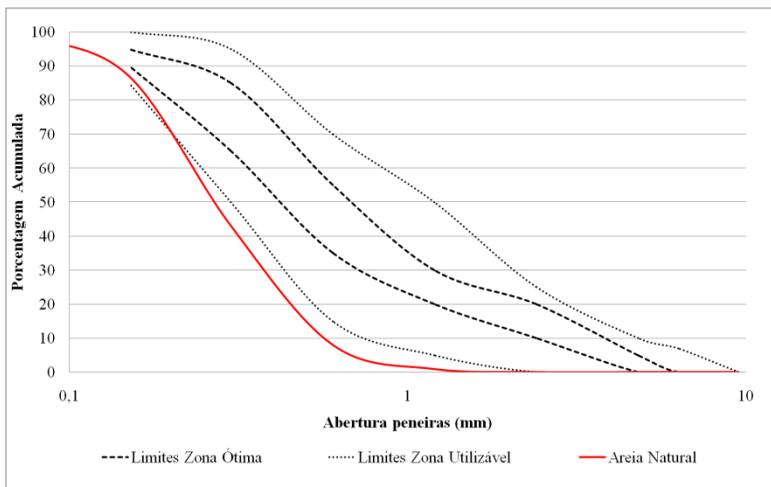


Figura 42: Curva granulométrica da areia natural.

Os resultados obtidos foram: dimensão máxima característica igual a 1,2 mm, dimensão mínima característica igual a 0,075 mm e módulo de finura igual a 1,39. Os valores finais foram determinados pelas médias aritméticas de três amostras. Pôde-se constatar também, que aproximadamente 13% da areia natural é composta por grãos finos (inferiores a 0,15mm). De acordo com Benabed et al. (2012) o uso de areias ricas em finos é importante para melhorar a propriedade de fluidez.

Pode-se observar no gráfico (Figura 42) que a areia natural não se encontra dentro dos limites da zona utilizável da NBR 7211/2009, com isso, este agregado não poderia ser utilizado para produção de concreto convencional sem um estudo de dosagem. Como o objetivo de nossa pesquisa se refere a produção de argamassas autonivelantes, a granulometria desta areia, com elevado teor de partículas finas, é de

grande interesse por proporcionar melhorias na propriedade de fluidez do material.

4.1.2 Granulometria à Laser

Os resultados referentes a distribuição granulométrica dos finos são apresentados no gráfico da Figura 43.

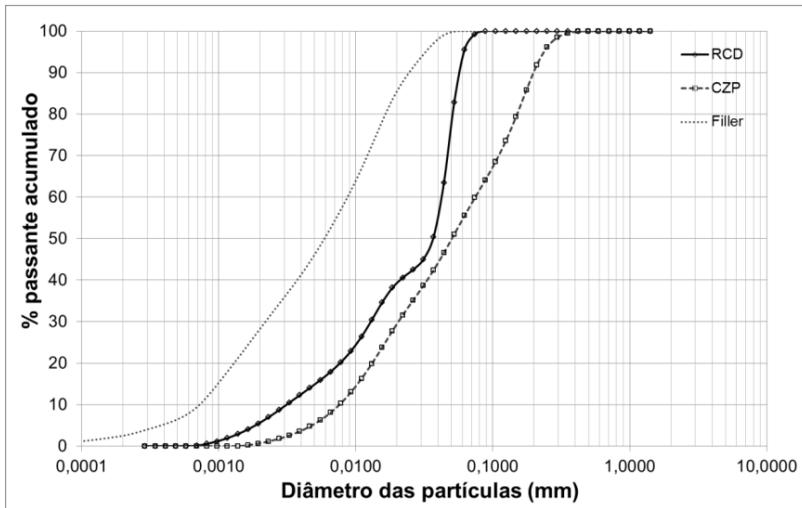


Figura 43: Gráfico de granulometria dos finos.

O material mais fino foi o FC, com todos os grãos inferiores a 50 μm e 10% dos seus grãos inferiores a 0,75 μm . Os finos de RCD apresentaram grãos com dimensões inferiores a 75 μm , sendo 10% destes grãos inferiores a 2 μm . No entanto, foi verificada uma descontinuidade na curva granulométrica, provavelmente devido ao processo de moagem do RCD. O material com as maiores dimensões de grãos encontradas foi a CZP, sendo 100% < 0,15 mm e 10% < 7,5 μm .

Foi possível verificar que todos os grãos de FC e RCD são inferiores a 0,075 mm, enquanto que aproximadamente 30% dos grãos de CZP são maiores. A finura do material influencia na área específica e em propriedades das argamassas autonivelantes como, por exemplo, no espalhamento.

4.1.3 Massa Específica

Os valores para massa específica dos materiais estão resumidos na Tabela 14.

Tabela 14: Massa Específica Materiais

Material	Método	Massa Específica	
Areia natural	Picnômetro	2,61	g/cm ³
Finos CZP	Picnômetro	1,92	g/cm ³
Finos RCD	Picnômetro	2,46	g/cm ³
Filer calcário	Picnômetro	2,68	g/cm ³
Cimento CPV ARI	Le Chatelier	3,04	g/cm ³

Pôde-se perceber que a cinza pesada apresentou a menor massa específica, provavelmente em função da sua elevada porosidade interna.

4.1.4 Área Específica

Os resultados para área superficial específica são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Área Específica Materiais

Materiais	Área Específica	
CPV ARI	5052,433	cm ² /g
Filer calcário	2275,861	cm ² /g
Finos CZP	2175,707	cm ² /g
Finos RCD	5023,043	cm ² /g

Pode-se verificar a diferença significativa entre as áreas específicas dos materiais analisados, devido às diferentes características específicas das partículas finas (tamanho, forma e morfologia de superfície).

4.1.5 Análise Química

Os resultados dos ensaios de perda de massa ao fogo e análise química em amostras de cimento CPV ARI, Filer Calcário (FC), cinza pesada (CZP) e resíduos de construção e demolição (RCD) encontram-se disponibilizados na Tabela 16.

Os resultados obtidos para perda de massa ao fogo do cimento CPV ARI, apresentaram-se dentro dos limites das exigências químicas definidas pela NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial (1991).

Tabela 16: Análise Química dos Materiais

Finos CZP		Finos RCD		Cimento CPV ARI		Filer Calcário	
Óxidos	Teores (%)						
SiO ₂	40,819	CaO	41,202	CaO	74,795	CaO	54,788
Al ₂ O ₃	37,458	SiO ₂	29,048	SiO ₂	12,303	SiO ₂	4,321
Fe ₂ O ₃	5,713	Fe ₂ O ₃	9,805	Fe ₂ O ₃	4,458	Fe ₂ O ₃	0,775
K ₂ O	5,197	K ₂ O	3,905	K ₂ O	2,071	K ₂ O	0,472
CaO	1,733	TiO ₂	1,447	SO ₃	1,984	SrO	0,044
SO ₃	0,293	SO ₃	0,645	TiO ₂	0,587	CO ₂	39,6
V ₂ O ₅	0,114	SrO	0,262	SrO	0,384		
ZnO	0,034	MnO	0,173	MnO	0,174		
Rb ₂ O	0,027	ZnO	0,063	CO ₂	3,243		
SrO	0,024	Rb ₂ O	0,03				
Y ₂ O ₃	0,017	CO ₂	13,22				
CO ₂	6,674						

Pode-se perceber que apenas os finos de cinza pesada apresentaram alumínio em quantidade significativa (37%), em contrapartida o teor de CaO (1,7) foi bem inferior aos demais materiais. De uma forma geral todos os materiais são compostos principalmente por SiO₂, CaO, Fe₂O₃, CO₂ e K₂O.

4.1.6 Absorção em placas de concreto (substrato)

Os ensaios de absorção em placas foram realizados de maneira análoga ao ensaio de absorção de água por capilaridade. O valor médio para absorção de água por capilaridade das placas de concreto foi de 6,18%. O resultado médio para volume de água absorvida em função do tempo, das quatro amostras extraídas do substrato, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Valores de absorção de água do substrato.

Absorção de água por capilaridade (cm ³)				
Amostra	Área (cm ²)	Tempos (minutos)		
		1	10	30
CP	19,625	1,15	3,14	4,40

Os valores de absorção de água por capilaridade das placas de concreto não foram muito elevados.

4.2 ESTUDO EM PASTAS

4.2.1 Aditivos

O gráfico (Figura 44) representa os resultados para tempos de escoamento até 800ml para as pastas compostas com Aditivo A.

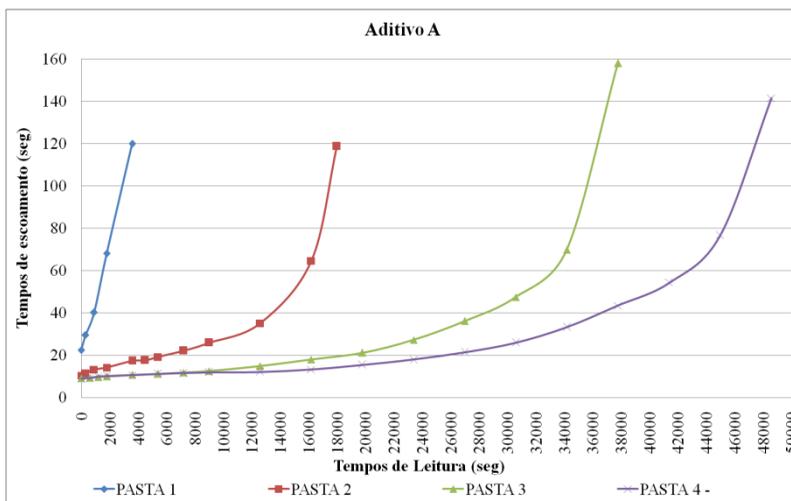


Figura 44: Tempos de escoamento em função do tempo - Aditivo A.

Os tempos de escoamento inicial ($T=0$) e retenção da fluidez, ou seja, o tempo que a pasta foi capaz de continuar fluindo no cone de *Marsh* são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Tempos de escoamento inicial e retenção da fluidez em pastas.

Aditivo A			
Pasta	Teor de aditivo (%)	Tempo de escoamento inicial (segundos)	Tempo de retenção da fluidez (minutos)
Pasta REF	0	-	-
Pasta 1	0,1	22,3	75
Pasta 2	0,2	10,32	300
Pasta 3	0,4	9,12	630
Pasta 4	0,6	8,88	810

A Pasta REF, sem aditivo, não foi capaz de fluir completamente no cone de *Marsh*. Já a Pasta 1, foi capaz de fluir completamente no cone, até 75 minutos após preparo da mistura. Na leitura $t=0$ a Pasta 2 apresentou 10 segundos de escoamento, sendo este tempo metade do obtido pela Pasta 1. No entanto, pode-se notar que o tempo de retenção da fluidez foi fortemente alterado, pois a Pasta 2, se manteve fluindo pelo cone de *Marsh* até 300 minutos (5 horas). A Pasta 3 apresentou tempo de escoamento inicial ($t=0$) muito próximo da Pasta 2. No entanto os tempos de retenção da fluidez foram alterados, a Pasta 3, se manteve fluindo no cone até 630 minutos (10,5 horas). A Pasta 4 apresentou tempos de escoamento inicial ($t=0$) com valores muito próximos da Pasta 3. Mas, outra vez, o tempo de retenção da fluidez da Pasta 4 foi aumentado em 3 horas quando comparado com a Pasta 3. Portanto, não foram mais realizados testes com maiores porcentagens de aditivo A, pois o tempo de escoamento inicial não estava sendo tão afetado, mas sim o tempo de retenção da fluidez. Conforme Seifert et al. (2012), em sistemas de argamassas autonivelantes, a propriedade de elevado tempo de pega não pode ser considerada como um resultado satisfatório.

Após análise dos resultados, concluiu-se que o teor ótimo do aditivo A foi de 0,2% da massa de aglomerante. Nessa porcentagem, a pasta apresentou uma boa fluidez nos tempos iniciais e esta fluidez foi mantida por um período de aproximadamente 5 horas.

O aumento no tempo de retenção da fluidez implicará em um maior tempo de pega. Portanto, o ensaio realizado com o cone de *Marsh* serviu também para comprovar que a porcentagem de aditivo influencia no tempo de pega da mistura. Conforme Felekoglu (2008), o aumento do teor de aditivo SP aumenta o tempo de pega da mistura.

Os resultados para tempos de escoamento até 800ml para as pastas compostas com Aditivo B são mostrados na Figura 45.

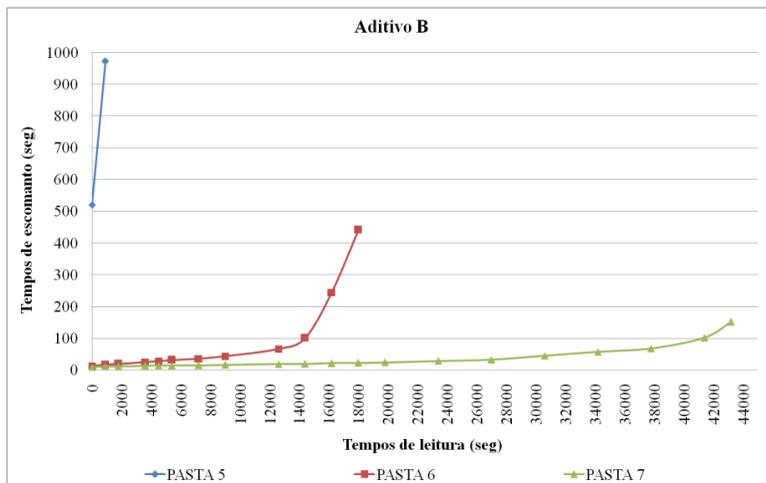


Figura 45: Tempos de escoamento em função do tempo - Aditivo B.

De maneira similar aos resultados encontrados para o aditivo químico A, o teor ótimo do aditivo B foi de 0,2% da massa de cimento CPV ARI. Os resultados de retenção de fluidez para 0,4% do aditivo analisado foram considerados elevados (12 horas) e não desejáveis, para pastas que estarão presentes em argamassas autonivelantes. Percebeu-se também que o tempo de fluidez inicial não foi fortemente afetado para teores de Aditivo B de 0,2 e 0,4%.

Os tempos de escoamento inicial ($T=0$) e retenção da fluidez são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Tempos de escoamento inicial e retenção da fluidez em pastas.

Aditivo B			
Pasta	Teor de aditivo (%)	Tempo de escoamento inicial (segundos)	Tempo de retenção da fluidez (minutos)
Pasta REF	0	-	-
Pasta 5	0,1	520	75
Pasta 6	0,2	12,4	300
Pasta 7	0,4	9,31	630

O escoamento inicial da Pasta 6 (12,4 segundos) foi menos eficiente que o tempo apresentado na Pasta 2 (10,3 segundos). A retenção da fluidez foi a mesma (5 horas) para ambas as Pastas 2 e 6, no entanto, o tempo de escoamento até 800ml, nesse período de leitura, foi

bem menor na Pasta 2 (200 segundos) quando comparado com a Pasta 6 (450 segundos).

Podemos concluir que as pastas compostas por aditivo SP com base química policarboxilato (A) apresentou resultados mais eficientes quando comparados com o aditivo SP com base química éter carboxílico (B). Os resultados e conclusões alcançadas encontram-se de acordo com pesquisas realizadas por Sahmaran et al. (2006).

Após realização dos experimentos podemos constatar a grande influência do teor de aditivo SP no aumento da fluidez e nos tempos de pega das pastas de cimento. Elevados tempos de pega não podem ser considerados uma boa opção para uso em argamassas autonivelantes, pois uma das características desse sistema de argamassas é secagem rápida com elevada resistência inicial.

4.3 ESTUDO EM ARGAMASSAS

4.3.1 Ensaios no Estado Fresco

4.3.1.1 *Espalhamento na Mesa*

Os resultados dos ensaios de espalhamento na mesa em função do teor de aditivo SP, para as argamassas autonivelantes com 10%, 15% e 20% de substituição, são mostrados na Figura 46, 47 e 48, respectivamente.

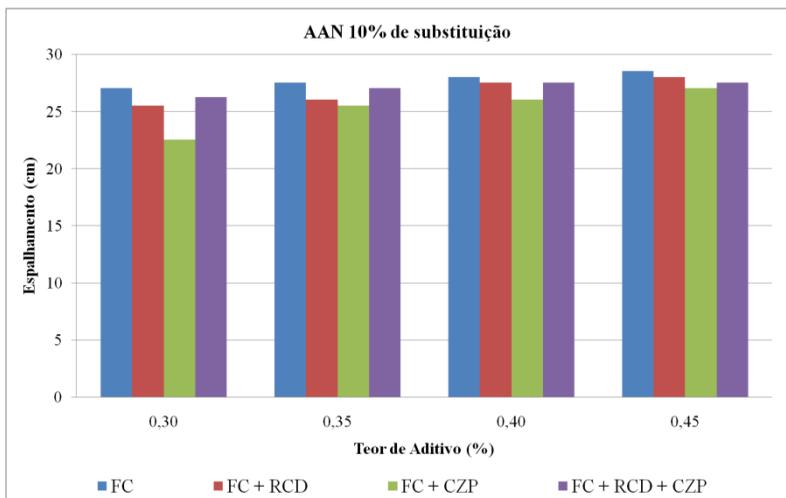


Figura 46: Espalhamento em função do teor de aditivo SP para argamassas autonivelantes com 10% de substituição.

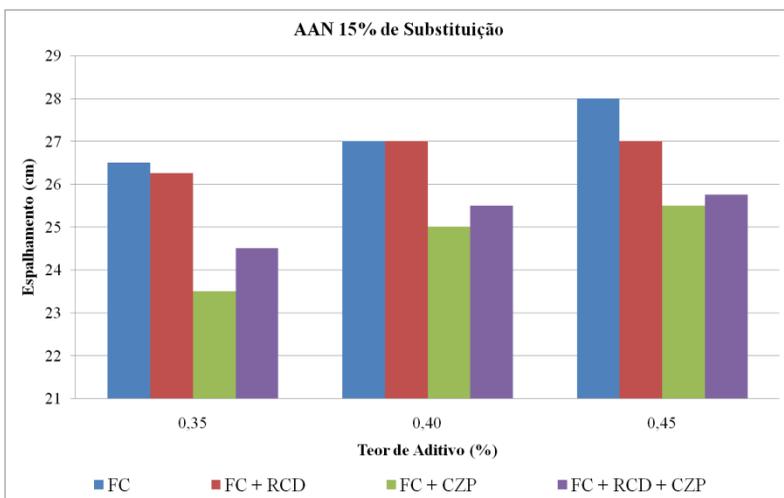


Figura 47: Espalhamento em função do teor de aditivo SP para argamassas autonivelantes com 15% de substituição.

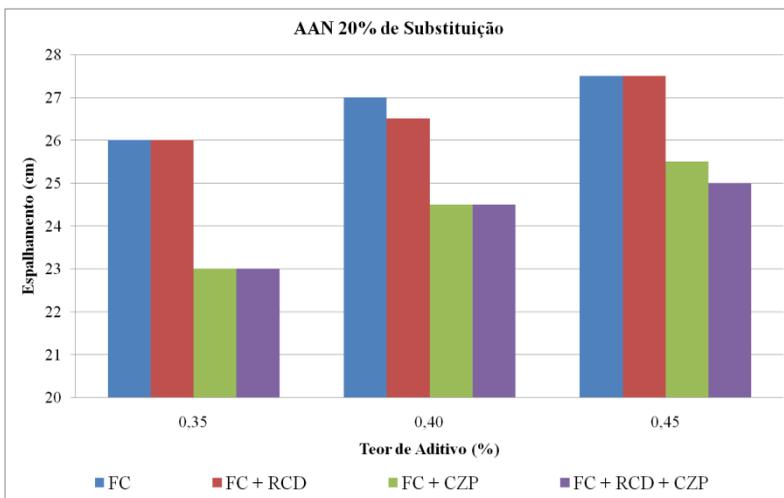


Figura 48: Espalhamento em função do teor de aditivo SP para argamassas autonivelantes com 20% de substituição.

O teor máximo do aditivo SP utilizado foi 0,40%, acima desse valor, o espalhamento das argamassas não variou significativamente,

além disso, todas as misturas com 0,45% e 0,50% apresentaram sinais de exsudação e/ou segregação.

É possível verificar, nas Figuras 46, 47 e 48, que o espalhamento diminui com o aumento da porcentagem de finos, em todas as misturas analisadas. Os mesmos resultados foram encontrados por Libre et al. (2010) e Benabed et al. (2012). Estes autores afirmam que os resultados podem ser explicados pelo aumento da finura e a área superficial específica dos finos, pois com o aumento do teor de finos torna-se necessário mais água para molhar a superfície das partículas e manter a mesma fluidez.

As argamassas compostas com FC e com teor de aditivo de 0,3% e 0,35% apresentaram espalhamento variando de 25 a 27,5 cm, considerados satisfatórios para sistemas autonivelantes, em todos os teores de substituição analisados (10%, 15% e 20%), além de apresentarem misturas homogêneas sem sinais de segregação ou exsudação. Na medida em que o teor de aditivo SP foi aumentado (0,40%, 0,45% e 0,5%) foi notada uma maior tendência para exsudação e/ou segregação. Essa exsudação muitas vezes não apareceu no instante do espalhamento, mas sim em momentos após o espalhamento, quando as argamassas foram dispostas sobre placas de vidro, conforme exemplo na Figura 49. De acordo com Libre et al. (2010) o aumento dos teores de aditivo SP (poli-carboxílico), ou da relação a/c, tende a aumentar o índice de segregação das misturas.

O exemplo da Figura 49, lado esquerdo, foi da argamassa autonivelantes composta com 10% de substituição de cimento por FC e 0,5% de aditivo SP, enquanto ao lado direito, temos a argamassa autonivelante com 20% de substituição de cimento por FC e 0,5% SP.



Figura 49: Sinais de exsudação em argamassas autonivelantes de referência (FC10) dispostas em placas de vidro.

Podemos constatar nos resultados dos ensaios, que a adição de RCD na mistura tende a diminuir a fluidez das argamassas, quando comparada com as misturas de referência (100% FC). Este fato provavelmente ocorreu devido elevada área específica dos grãos, como comprovado no ensaio pelo método de *Blaine*.

As argamassas compostas por FC + RCD e com 0,35% de aditivo SP apresentaram espalhamento variando de 26 a 26,5 cm, para 10%, 15% e 20% de substituição de cimento. Os resultados podem ser considerados satisfatórios para sistemas autonivelantes, pois as misturas se apresentaram homogêneas sem sinais de segregação ou exsudação. Com o aumento da porcentagem de aditivo (0,40%, 0,45% e 0,5%) foi observada uma maior tendência para exsudação que as argamassas autonivelantes de referência, compostas apenas com FC.

As argamassas contendo FC + CZP e com 0,40% de aditivo SP apresentaram espalhamento variando de 24 a 26 cm, para todos os teores de substituição de cimento analisados. No entanto, nem todos os resultados puderam ser considerados como satisfatórios para sistemas autonivelantes, pois as misturas com 20% de substituição de cimento demonstraram-se mais propensas à segregação. Os resultados com teor de aditivo de 0,45% e 0,5% apresentaram exsudação menor que as observadas nas argamassas compostas apenas com FC e também nas argamassas FC + RCD, devido ao elevado potencial de absorção de água da Cinza Pesada. Esta absorção de água mais elevada da CZP possivelmente está relacionada com o volume de vazios internos, conforme resultado encontrado no ensaio com o Picnômetro. No entanto, foi verificada uma maior tendência à segregação dos constituintes da mistura, principalmente para 20% de substituição de cimento e maiores teores de aditivo (0,45% e 0,50%). Nestes casos, foi observado uma maior concentração de material no centro e o formato das bordas não se apresentou tão arredondado, como nas demais argamassas.

As argamassas com 0,40% de aditivo SP apresentaram espalhamento satisfatórios para sistemas autonivelantes, com 10% e 15% de substituição de cimento por FC + RCD + CZP, além de apresentarem misturas homogêneas sem sinais de segregação ou exsudação. No entanto, as misturas com 20% de substituição não apresentaram espalhamentos tão eficientes quando comparados com a mistura de referência, além de se apresentarem como sendo as misturas mais propensas à segregação. Os resultados com teores de aditivo SP de 0,45% e 0,5% não apresentaram exsudação. Possivelmente, devido ao

elevado potencial de absorção de água dos finos de RCD e CZP. A mistura de FC + RCD + CZP, com 20% de substituição do cimento, se comportou com as bordas em forma apontada, demonstrado maior tendência à segregação.

Após análises dos resultados de dosagem decidiu-se utilizar substituições em teores de apenas 10% e 15%, uma vez que as misturas de FC + CZP e FC + RCD + CZP com 20% de substituição se apresentaram mais propensas à segregação, além de proporcionarem menores valores de espalhamento. Resultados similares foram encontrados por Benabed et al (2012). Os autores concluíram que o teor de *filer* calcário (FC) influencia no ensaio de espalhamento e o *filer* calcário apresenta melhores respostas em porcentagens de 10 e 15% de substituição do cimento. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da finura e à área superficial específica dos *filers*, pois com o aumento do teor de finos torna-se necessário mais água para molhar a superfície das partículas e manter a mesma fluidez.

Para as argamassas com 10% de substituição definiu-se utilizar como parâmetro para espalhamento 26 cm, pois todas as misturas testadas apresentaram bons resultados de consistência e demonstraram um bom aspecto visual. Enquanto que para as misturas com 15% de substituição optou-se por 25 cm de espalhamento, uma vez que as misturas FC + CZP e FC + RCD + CZP apresentaram sinais de segregação para espalhamentos maiores.

Com isso, os principais parâmetros para definição das argamassas foram:

1. Espalhamento entre 25 e 26 cm, de acordo com a revisão bibliográfica (EFNARC, 2002; Katsiadramis et al., 2010; Georgin et al. 2008; Rizwan e Bier 2012);
2. Argamassas com bom aspecto visual, sem sinais de segregação ou exsudação.

Os resultados de todos os ensaios de espalhamento realizados e os teores de aditivos utilizados na pesquisa encontram-se resumidos na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de Espalhamento (cm).

Teor de substituição de cimento por finos (%)	Percentual de aditivo SP (%)	Filer	Filer + RCD	Filer + CZP	Filer + RCD + CZP
10	0,20	20,5			
	0,25	26			24,75
	0,30	27	25,5	22,5	26,25
	0,35	27,5	26,5	25,5	27
	0,40	28	27,5	26	27,5
	0,45	28,5	28	27	27,5
15	0,50	28,5	28,5	27,5	
	0,30	25,5	25,5	21	
	0,35	26,5	26,25	23,5	24,5
	0,40	27	27	25	25,5
	0,45	28	27,5	25,5	26,5
20	0,50	29	28	26,5	
	0,30	25	25	20	
	0,35	26	26	23	23
	0,40	27	26,5	24	24
	0,45	27,5	27	25,5	25,5
	0,50	28	28	26	

Legenda:

	Argamassas com Exsudação/Segregação
	Argamassas com Espalhamento insatisfatório
	Argamassas com Espalhamento Satisfatório
	Argamassas Escolhidas

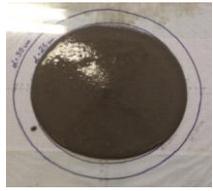
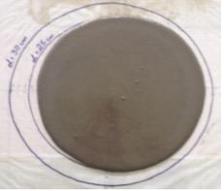
Os traços escolhidos encontram-se disponíveis na Tabela 21.

Tabela 21: Traços escolhidos na pesquisa.

Relação a / c	Traço c : a	Teor de Aditivo (%)	Teor de Finos (%)			Teor de Substituição de Cimento	Identificação
			FC	RCD	CZP		
0,50	1 : 2	0,25	100			10%	FC 10
		0,35	50	50			FC + RCD 10
		0,4	50		50		FC + CZP 10
		0,3	50	25	25		FC + RCD + CZP 10
		0,3	100			15%	FC 15
		0,3	50	50			FC + RCD 15
		0,4	50		50		FC + CZP 15
		0,4	50	25	25		FC + RCD + CZP 15

As imagens dos espalhamentos e das bordas das argamassas autonivelantes escolhidas, com 10 e 15% de substituição, são mostradas na Tabela 22.

Tabela 22: Argamassas Autonivelantes com 10 e 15% de substituição.

Argamassas Autonivelantes	Espalhamento	Argamassas Autonivelantes	Espalhamento
FC 10		FC 15	
FC + RCD 10		FC + RCD 15	
FC + CZP 10		FC + CZP 15	
FC + RCD +CZP 10		FC + RCD +CZP 15	

Os tempos de espalhamento foram registrados nas argamassas escolhidas. Os resultados para os tempos de espalhamento até 25 cm, em segundos, encontram-se resumidos na Tabela 23.

Tabela 23: Tempos de espalhamentos (segundos).

Tempos	10% de substituição				15% de substituição			
	FC	FC + RCD	FC + CZP	FC + RCD +CZP	FC	FC + RCD	FC + CZP	FC + RCD +CZP
T15	1	1	1	1	1	1	1	1
T20	3	3	3	3	3	3	3	3
T25	10	10	8	9	11	11	12	11

O gráfico de colunas com os resultados do ensaio T_{25} é mostrado na Figura 50.

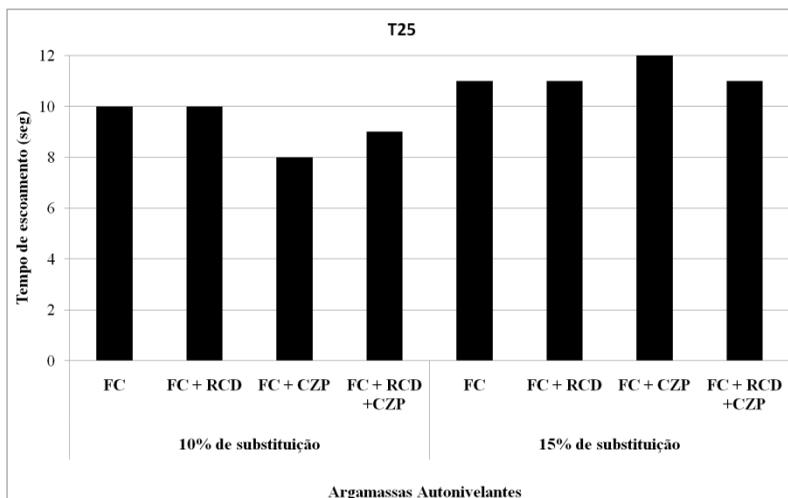


Figura 50: Resultados de T_{25} Argamassas Autonivelantes.

De acordo com Rizwan e Bier (2012) os tempos considerados satisfatórios para T_{25} variam entre 12 e 18 segundos. A maior parte das argamassas produzidas apresentaram menores tempos de espalhamento T_{25} quando comparado com a bibliografia, indicando que as misturas produzidas foram mais fluidas. A mistura FC + CZP (10% de substituição) apresentou os menores tempos de escoamento até 25cm de diâmetro, provavelmente devido ao maior teor de aditivo utilizado. Para 15% de substituição, a mistura FC + CZP apresentou os maiores tempos, possivelmente devido a sua menor massa específica, que em maiores porcentagens aumentou a absorção inicial de água e consequentemente reduziu a fluidez.

4.3.1.2 Evolução da Temperatura de Hidratação das Argamassas

A avaliação da evolução das temperaturas das argamassas em função do tempo foi realizada nas misturas escolhidas na etapa anterior. Os resultados são mostrados nas Figuras 51 e 52, para 10% e 15% de substituição, respectivamente.

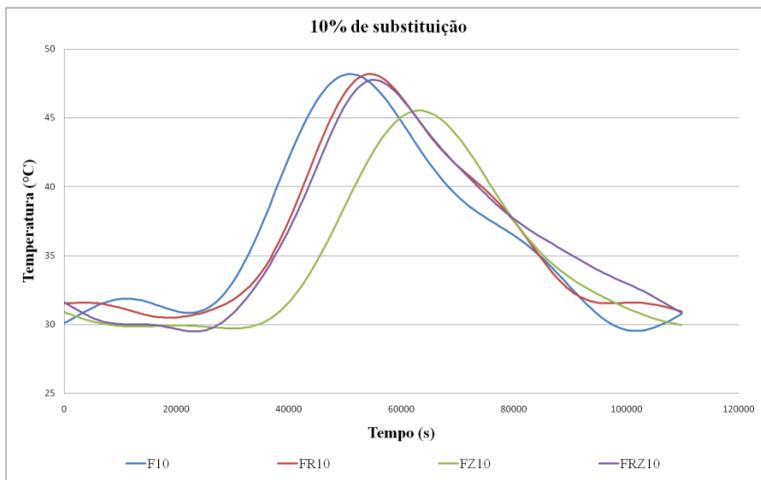


Figura 51: Evolução da temperatura em função do tempo para argamassas autonivelantes com 10% de substituição.

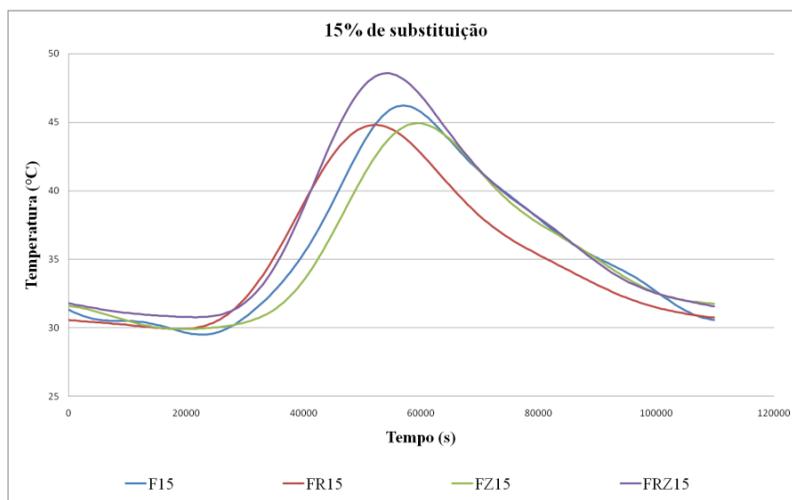


Figura 52: Evolução da temperatura em função do tempo para argamassas autonivelantes com 15% de substituição.

Para determinar os tempos de início de endurecimento das argamassas foram escolhidos os pontos da curva onde se iniciaram a elevação gradual da temperatura. Para determinar os tempos necessários para alcançar a temperatura máxima, foram escolhidos os pontos com maior pico de temperatura no gráfico.

Após análise dos gráficos (Figuras 51 e 52), foi desenvolvido um histograma (Figura 53) com o resumo dos tempos de aceleração das reações de hidratação das argamassas autonivelantes, com 10% e 15% de substituição.

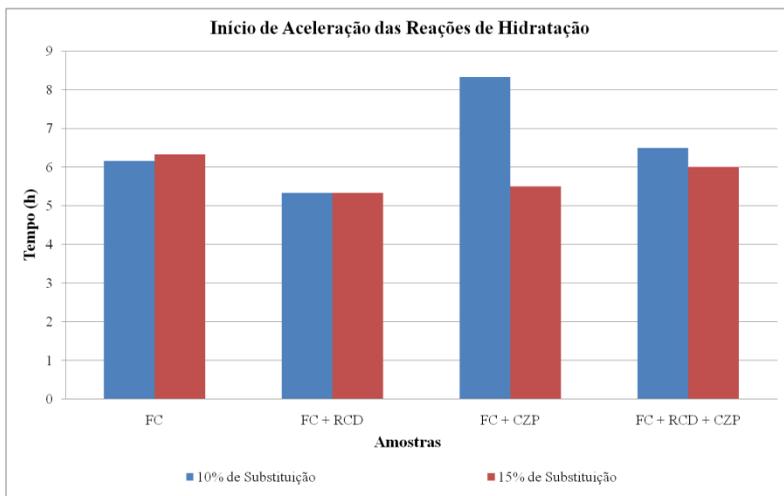


Figura 53: Tempos início da aceleração das reações de hidratação das argamassas autonivelantes.

Para as argamassas testadas a mistura de FC + CZP 10 foi a que apresentou o maior tempo para início de aceleração das reações de hidratação. Este fato pode ter ocorrido devido ao maior teor de aditivo SP utilizado para atingir o espalhamento necessário. Outra hipótese para este resultado seriam as características físicas da cinza. Foi observado por outros autores (Sahmaran et al. 2006) que a adição de cinza volante aumentava o tempo de início de pega das argamassas devido as suas características físicas (forma e tamanho das partículas) que apresentaram menor área específica, e consequentemente, maior disponibilidade de água na mistura. As demais misturas apresentaram tempos de início de endurecimento da argamassa variando entre 5 e 6 horas, aproximadamente.

Os resultados para as temperaturas máximas geradas pelas reações de hidratação das argamassas autonivelantes, com 10% e 15% de substituição, são apresentados no histograma da Figura 54.

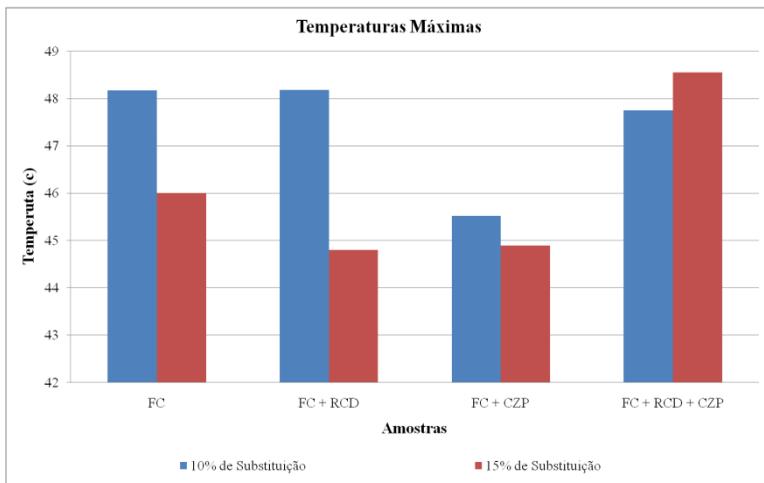


Figura 54: Temperaturas máximas de hidratação das argamassas autonivelantes.

As argamassas FC + CZP 15 e FC + RCD 15 apresentaram as menores temperaturas máximas. Embora a diferença de temperatura máxima entre todas as misturas produzidas tenha sido pequena ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), a mistura com menor temperatura máxima pode ajudar a reduzir a retração em argamassas autonivelantes. Menores temperaturas durante o processo de hidratação tendem a reduzir a quantidade de água que irá evaporar e, conseqüentemente, a variação dimensional pode diminuir. Rizwan e Bier (2012) concluíram em seus experimentos que a adição de cinzas (volantes) aumentam o tempo de início de pega, embora melhore a trabalhabilidade e reduza a geração de calor inicial, e conseqüentemente, a retração.

Para as argamassas com 15% de substituição, todas as amostras apresentaram tempos para início de endurecimento menor do que a referência (FC 15). Entretanto, para 10% de substituição a argamassa FC + CZP 10 necessitou aproximadamente 8 horas para iniciar a aceleração das reações de hidratação, sendo este o resultado menos eficiente.

A temperatura máxima, nas misturas testadas com 10% de substituição, foi maior na argamassa de referência (FC 10) e na mistura FC + RCD 10. Neste caso, mesmo com a pequena variação de temperatura máxima entre as amostras, as demais misturas (FC + RCD + CZP 10 e FC + CZP 10) apresentaram resultados mais eficientes. Para as misturas com 15% de substituição foi observado que a argamassa FC + RCD + CZP 15 apresentou a maior temperatura máxima, sendo que os

resultados das misturas FC + RCD 15 e FC + CZP 15 foram inferiores a referência (FC), e, portanto, mais eficientes.

4.3.2 Ensaios no Estado Endurecido

4.3.2.1 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados nas misturas escolhidas nos ensaios de dosagem de argamassas. Todas as argamassas foram rompidas aos 1^o, 7^o e 28^o dias de idade.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, para as argamassas com 10% de substituição são apresentados na Figura 55.

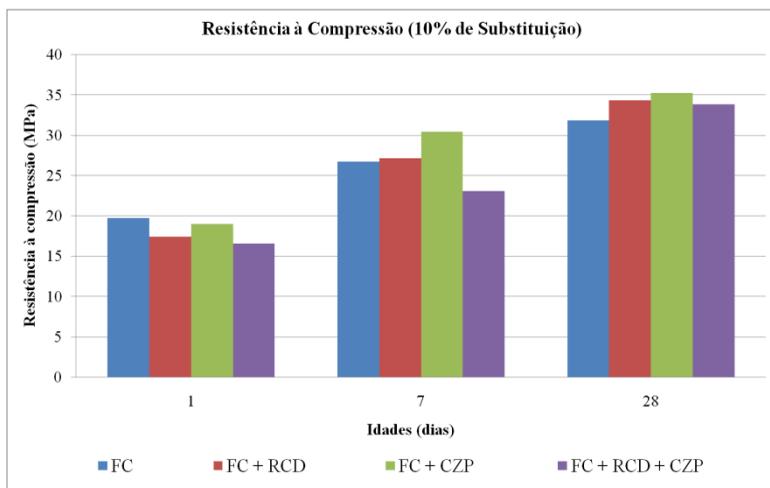


Figura 55: Resistência à Compressão de Argamassas Autonivelantes com 10% de Substituição.

Nas primeiras idades (1 dia) a resistência à compressão das argamassas com FC foram maiores quando comparadas com as demais. No entanto, em idades mais avançadas (7 e 28 dias) o maior resultado de resistência à compressão foi obtido nas argamassas com FC + CZP e aos 28 dias de idade o menor resultado de resistência à compressão foi apresentado para a argamassa de referência (FC). Este fato pode ser explicado pela melhor cura interna proporcionada pelos finos reciclados ao longo do tempo. Os finos de RCD e CZP demandam mais água no momento de mistura, devido a sua elevada área específica, massa específica e/ou porosidade, reduzindo a água disponível na mistura e consequentemente a relação a/c. Essa elevada absorção inicial pode

reduzir a hidratação dos grãos de cimento, nas primeiras idades. Porém, a umidade absorvida pelos finos inicialmente é liberada com o decorrer do tempo e assim o processo de hidratação tem continuidade nas partículas de cimento que não foram totalmente hidratadas, resultando em maiores resistências mecânicas aos 28 dias de idade das amostras.

Os resultados de resistência à compressão em argamassas autonivelantes com 15% são apresentados na Figura 56.

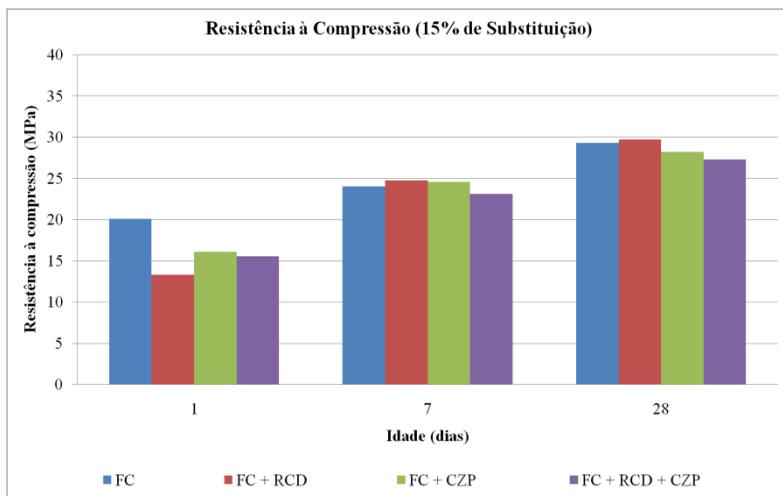


Figura 56: Resistência à Compressão de Argamassas Autonivelantes com 15% de Substituição.

Com os resultados apresentados no histograma (Figura 56) pode-se verificar que novamente a argamassa de referência (FC) apresentou as maiores resistências na primeira idade (1 dia) analisada. Porém, em idades mais avançadas (7 e 28 dias de idade) a mistura FC + RCD obteve os maiores resultados de resistência à compressão, devido ao melhor processo de cura interna proporcionado pelas argamassas compostas com finos de RCD. Os finos de RCD provavelmente aumentaram a absorção inicial de água, em função da sua elevada área específica. Com isso, a disponibilidade de água para as reações de hidratação do cimento foi reduzida e consequentemente a resistência em um dia de idade foi menor. Ao decorrer do tempo a umidade inicialmente absorvida pelos finos foi liberada na argamassa e a hidratação dos grãos que não foram inicialmente hidratados ocorreu em idades mais avançadas. No entanto, outros fatores podem ter contribuído para os maiores valores de resistência nas misturas com finos de RCD

como: os resíduos de cimento presentes nos finos de RCD e a redução da relação a/c em função da maior absorção inicial de água.

Em todas as argamassas produzidas constatou-se elevada resistência inicial (1 dia), quando todos os resultados apresentaram valores superiores a 14 MPa. Sendo assim, pode-se afirmar que a cura do contrapiso autonivelante aconteceu em até 24 horas. Depois disso, a superfície pode ser liberada para tráfego de operários.

Argamassas com resultados de alta resistência mecânica geralmente apresentam uma microestrutura pouco porosa e com isso podem ser mais resistentes a agentes agressivos externos que geram degradação no material. Além disso, de acordo com Seifert et al. (2012), a elevada resistência inicial é um parâmetro necessário em argamassas autonivelantes.

4.3.2.2 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas autonivelantes com 10% de substituição são apresentados na Figura 57.

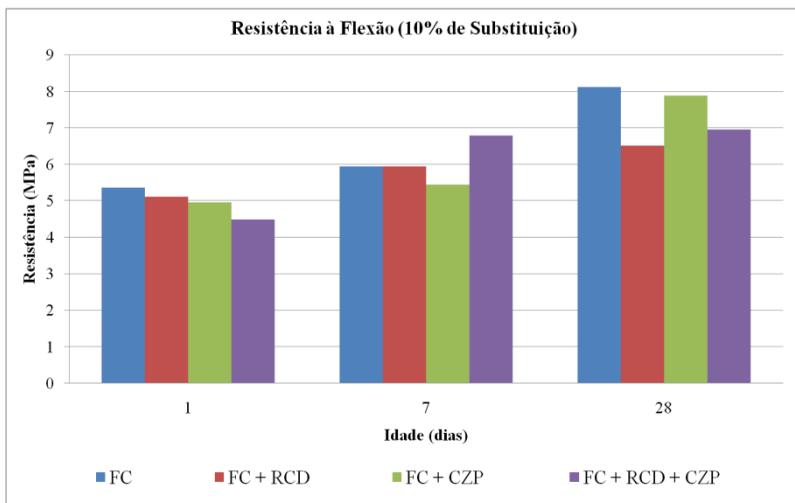


Figura 57: Resistência à Tração na Flexão de Argamassas Autonivelantes com 10% de Substituição.

Para as amostras, com 10% de substituição, pode-se verificar que as argamassas de referência (FC) apresentaram os maiores resultados nas idades de 1 e 28 dias. Aos 7 dias de idade a argamassa FC + RCD + CZP apresentou os maiores resultados de resistência.

Os maiores valores de resistência à tração na flexão foram obtidos nas misturas com FC + RCD 15, conforme histograma apresentado na Figura 58.

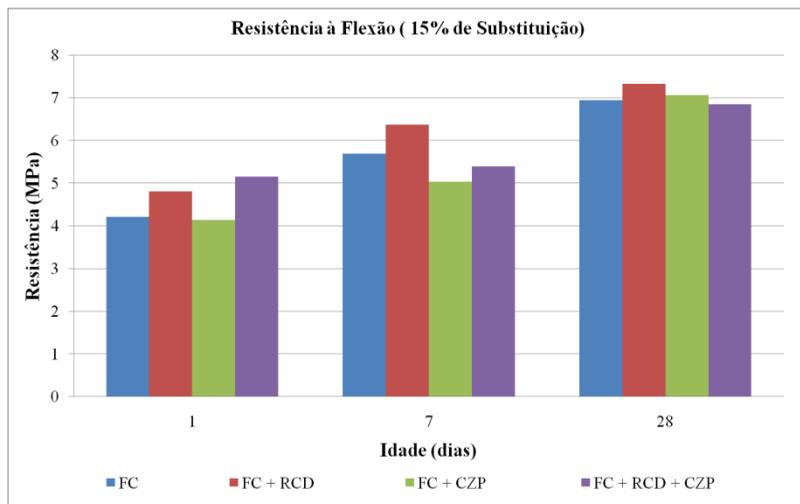


Figura 58: Resistência à Tração na Flexão de Argamassas Autonivelantes com 15% de Substituição.

É possível verificar que praticamente todas as amostras analisadas, com 15% de substituição, permaneceram dentro de um limite de valores, principalmente aos 28 dias de idade, não havendo diferenças acentuadas entre as resistências alcançadas.

4.3.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

Os valores de absorção de água por capilaridade, em um período de 24 horas, são resumidos na Tabela 24.

Tabela 24: Absorção de água por capilaridade (%).

Absorção de água por capilaridade (%)							
FC 10	FC + RCD 10	FC + CZP 10	FC + RCD + CZP 10	FC 15	FC + RCD 15	FC + CZP 15	FC + RCD + CZP 15
1,40	1,07	0,79	0,78	1,80	1,50	1,73	1,86

O gráfico contendo os valores de absorção de água das argamassas autonivelantes, com 10% de substituição, em função do tempo são apresentados na Figura 59.

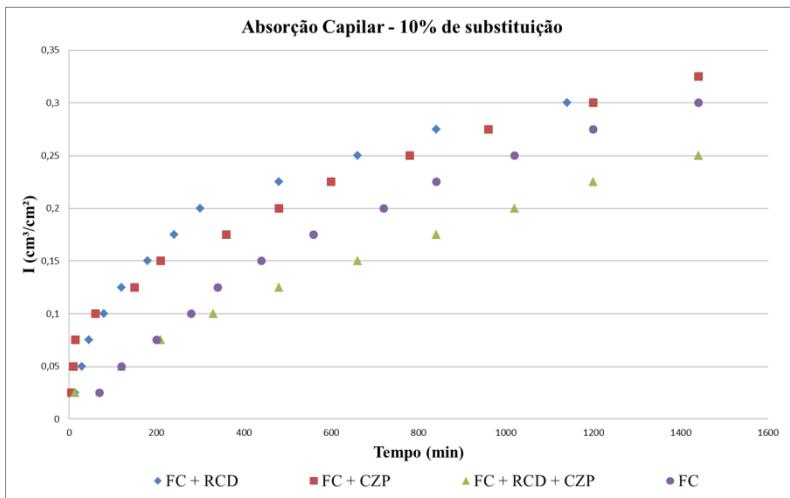


Figura 59: Absorção capilar em Argamassas Autonivelantes com 10% de substituição.

É possível verificar na Figura 59 que as argamassas com maior potencial de absorção de água são as FC + RCD 10 e FC + CZP 10. A argamassa que apresentou menor absorção capilar foi FC + RCD + CZP 10. Uma suposta hipótese para esse comportamento foi que, em teores de 10% de substituição, a adição dos finos de FC, RCD e CZP promoveram um melhor empacotamento das partículas, causando uma diminuição na porosidade da matriz e fazendo com que haja menor absorção de água.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade em argamassas autonivelantes, com 15% de substituição, apresentaram resultados com valores muito próximos para todas as amostras. Porém, foi possível perceber que a argamassas FC + RCD + CZP 15 apresentou a menor absorção capilar. O gráfico contendo os valores de absorção de água das argamassas autonivelantes, com 15% de substituição, em função do tempo são mostrados na Figura 60.

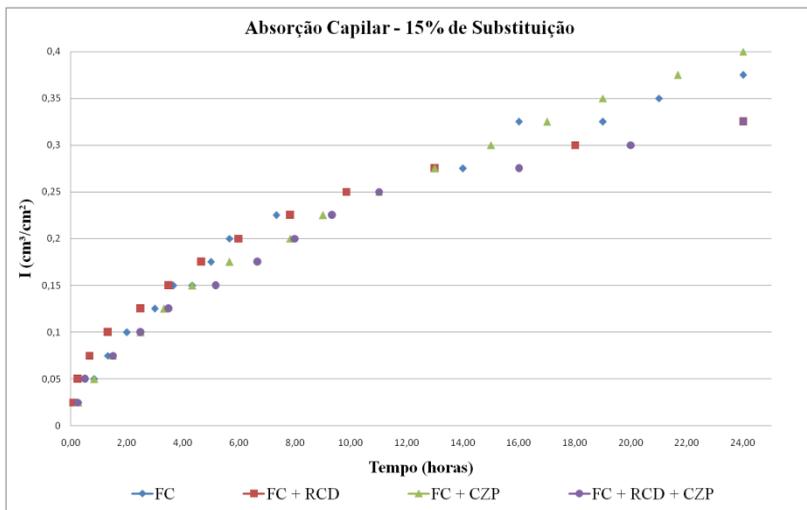


Figura 60: Absorção capilar em Argamassas Autonivelantes com 15% de substituição.

Os resultados para sorptividade em argamassas com 10% de substituição são mostrados na Figura 61.

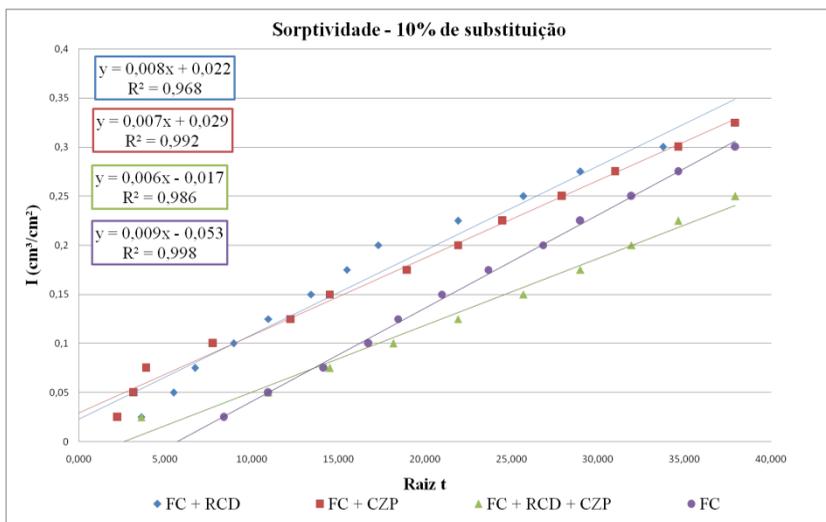


Figura 61: Sorptividade em Argamassas Autonivelantes com 10% de substituição.

Os valores de sorptividade para as argamassas com 15% de substituição estão disponíveis na Figura 62.

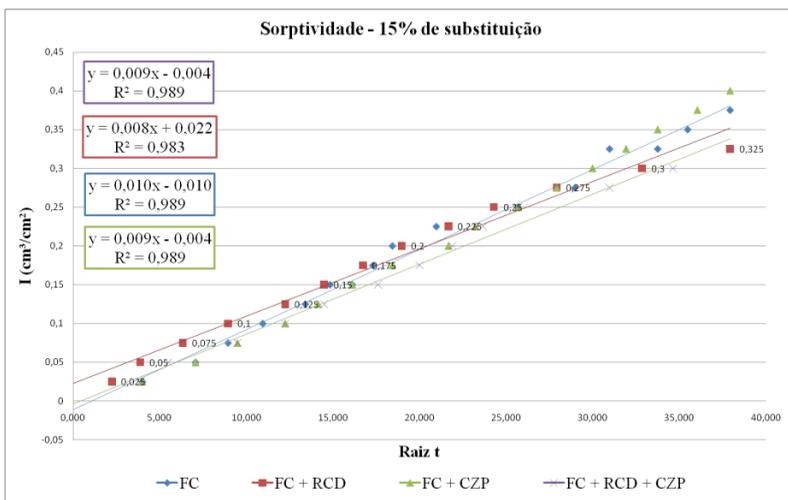


Figura 62: Sorptividade em Argamassas Autonivelantes com 15% de substituição.

Os valores de sorptividade foram obtidos após determinação da inclinação das retas, conforme equações geradas pelas linhas de tendência (Figuras 61 e 62). Maiores sorptividades indicam maiores taxas de absorção. A Figura 63 resume os valores de sorptividade das argamassas.

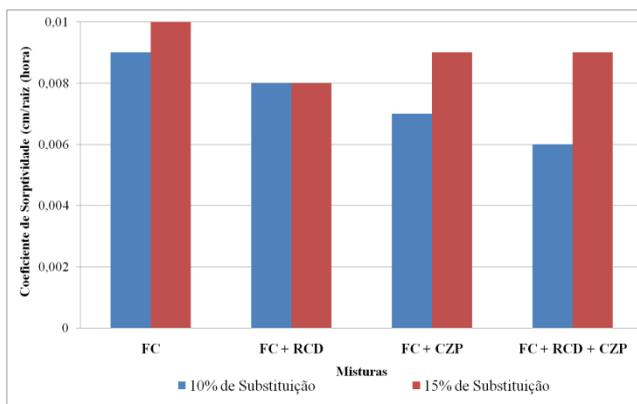


Figura 63: Coeficiente de Sorptividade das argamassas autonivelantes.

As misturas de referência (FC) apresentaram os maiores valores para o coeficiente de sorptividade, para 10% e 15% de substituição, quando comparadas com as argamassas compostas com finos. Esse resultado pode ser relacionado com o valor obtido no ensaio de resistência mecânica aos 28 dias de idade, porque o aumento da porosidade provoca redução nos valores de resistência à compressão. No entanto, a argamassa FC + CZP 10 obteve o maior valor de resistência, mas a menor sorptividade foi observada na mistura FC + RCD + CZP 10. Uma hipótese para essa ocorrência pode ser o melhor empacotamento dos grãos gerado pela interação entre os finos de FC, RCD e CZP e dessa forma provavelmente ocorreu diminuição nas conexões entre os poros e/ou na porosidade aberta. Conforme Rizwan e Bier (2012), a absorção de água não é simplesmente uma função do tamanho de poro máximo, mas isso também depende da porosidade e das conexões entre os poros.

Todas as misturas com 15% de substituição apresentaram valores de sorptividade próximos. A argamassa FC + RCD 15 apresentou o menor valor de sorptividade indicando menor absorção de água por capilaridade. Este resultado pode ser relacionado com o valor de resistência a compressão da mistura FC + RCD 15 (28 dias de idade), pois argamassas com estruturas menos porosas tendem a absorver menos água e apresentar maiores valores de resistência. No entanto, a argamassa FC 15 obteve o maior valor de sorptividade, mas a resistência à compressão foi um pouco maior que as argamassas FC + CZP 15 e FC + RCD + CZP 15. Uma hipótese para essa ocorrência seria porque as argamassas com finos (RCD e CZP) devem ter formado uma microestrutura com menor porosidade aberta e/ou maior tortuosidade, conseqüentemente um caminho mais difícil de ser percorrido pela água.

Foi observado que as argamassas com 15% de substituição apresentaram maiores valores de absorção de água por capilaridade, exceto para a mistura FC + RCD, quando comparado com as argamassas com 10% de substituição, possivelmente devido ao menor teor de cimento. Dessa forma, pode-se deduzir que as argamassas com 10% de substituição tendem a formar uma microestrutura menos porosa. Esses resultados podem ser relacionados com valores de resistência à compressão obtidos.

Também foi possível verificar que todas as argamassas analisadas (10 e 15% de substituição) apresentaram uma baixa absorção de água indicando uma microestrutura pouco porosa. Essa característica

verificada nas argamassas produzidas indica possibilidade de maior durabilidade do material.

4.3.2.4 Resistência de Aderência à tração

Os resultados para a resistência de aderência à tração, das argamassas autonivelantes com 10% de substituição, estão apresentados na Tabela 25. Os valores destacados (em vermelho) foram descartados por se afastarem em $\pm 30\%$ do valor médio.

Tabela 25: Resistência à flexão em argamassas autonivelantes com 10% de substituição.

ARGAMASSAS AUTONIVELANTES - 10% de Substituição								
Amostra	FC		FC + RCD		FC + CZP		FC + RCD + CZP	
	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura
1	0,54	A	1,03	A	0,79	S/A	0,97	S/A
2	0,79	A	0,93	A	1,16	A	0,77	S/A
3	0,81	A	1,02	S/A	0,73	S/A	0,93	S/A
4	0,57	S/A	0,90	A	0,94	S/A	0,81	S/A
5	0,86	S/A	0,60	A	0,86	S/A	1,02	A
6	0,88	A	0,93	A	0,62	S/A	0,95	S/A
7	0,99	S/A	0,63	A	0,97	S/A	0,61	A
8	0,65	A	0,46	A	1,04	S/A	0,88	A
9	0,77	A	0,70	A	0,94	S/A	0,68	S/A
10	0,91	S/A	0,97	A	0,77	S/A	0,57	A
11	0,66	A	0,55	S/A	0,79	S/A	0,41	A
12	0,87	S/A	0,30	F	0,84	S/A	0,58	A
Média	0,78		0,75		0,87		0,76	
S	Ruptura no substrato							
S/A	Ruptura na interface substrato argamassa							
A	Ruptura na argamassa							
F	Falha na colagem da peça metálica							

Podemos constatar que a argamassa que apresentou os maiores valores médios de resistência foi a mistura FC + CZP 10. A mesma argamassa apresentou praticamente todas as rupturas na interface substrato com argamassa, indicando uma superfície com alta resistência à tração. A Argamassa FC + RCD apresentou, na maior parte de seus resultados, ruptura na superfície da argamassa, demonstrando este ser o ponto mais fraco do sistema.

Na Tabela 26 estão disponibilizados os resultados dos ensaios de resistência à tração em argamassas autonivelantes com 15% de substituição.

Tabela 26: Resistência à flexão em argamassas autonivelantes com 15% de substituição.

ARGAMASSAS AUTONIVELANTES - 15% de Substituição								
Amostra	FC		FC + RCD		FC + CZP		FC + RCD + CZP	
	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura
1	0,92	S/A	0,86	S/A	0,94	S/A	1,07	S/A
2	0,97	S/A	0,81	S/A	0,69	S/A	0,90	S/A
3	0,86	S/A	0,58	S/A	0,49	S/A	1,03	S/A
4	0,86	A	0,78	S/A	0,92	S/A	0,75	A
5	0,99	A	0,69	S/A	1,02	S/A	0,63	S/A
6	0,69	A	0,80	A	0,77	S/A	0,98	S/A
7	0,61	A	1,00	S/A	1,02	A	1,08	S/A
8	0,43	A	0,88	S/A	0,66	A	1,01	S/A
9	0,54	A	0,72	A	0,92	S/A	0,43	F
10	0,53	A	0,98	S/A	0,72	S/A	0,95	A
11	0,56	A	0,62	A	0,74	A	1,06	S/A
12	0,94	S/A	0,31	F	0,92	S/A	0,47	A
Média	0,74		0,75		0,82		0,86	
S	Ruptura no substrato							
S/A	Ruptura na interface substrato argamassa							
A	Ruptura na argamassa							
F	Falha na colagem da peça metálica							

Os ensaios de resistência de aderência à tração apresentaram resultados com valores próximos para 10 e 15% de substituição. No entanto, a argamassa FC + RCD + CZP (15% de substituição) apresentou a maior média de resistência, com a maior parte das rupturas na interface substrato com argamassa. A mistura com maior parte dos resultados de ruptura na parte superficial da argamassa foi a FC (15%).

A Figura 64 se refere às amostras após realização dos ensaios.



Figura 64: Amostras após ensaios de resistência de aderência à tração.

Podemos verificar que os valores obtidos, nos ensaios de resistência de aderência à tração foram altos, comprovando que as argamassas autonivelantes produzidas apresentaram elevada resistência à tração e uma boa aderência com substrato. Dessa forma, mais uma propriedade mencionada na bibliografia foi comprovada na pesquisa, aumentando as possibilidades de durabilidade das argamassas autonivelantes produzidas. Tendo em vista que argamassas com baixos valores de aderência são mais propensas a se desprender do substrato a vida útil do material pode ser reduzida.

4.3.2.5 *Varição Dimensional (Retração Linear)*

Os resultados para retração linear são mostrados na Figura 65.

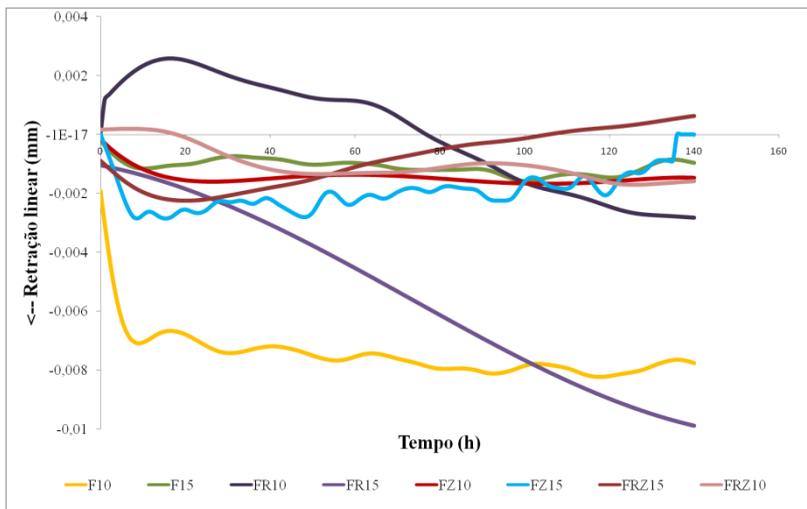


Figura 65: Valores de Retração Linear.

Como pode ser verificado na Figura 65 as maiores retrações são apresentadas nas argamassas FR15 (FC + RCD 15) e F10 (FC10). A argamassa FR10 (FC + RCD 10) apresentou valores positivos no gráfico até 80 horas, indicando expansão do material, sendo este um resultado não esperado.

Os valores dos deslocamentos finais de retração linear, das argamassas autonivelantes produzidas, são resumidos no histograma (Figura 66).

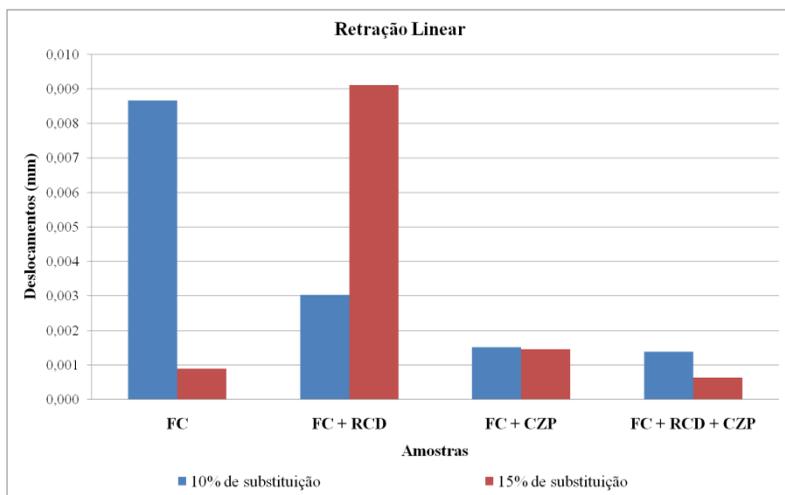


Figura 66: Valores de retração linear das amostras.

Para as argamassas com 10% de substituição, todas as misturas com finos reciclados foram mais eficientes que a referência, pois apresentaram menores deslocamentos. Enquanto que para 15% de substituição, a argamassa FC + RCD 15 apresentou o pior resultado de todas as amostras testadas. No entanto, a argamassa FC + RCD + CZP 15 apresentou os menores deslocamentos de retração linear (0,006 mm) das oito misturas analisadas. As misturas FC + CZP não apresentaram grandes variações de deslocamentos com o aumento no teor de finos (10 para 15%).

Diante dos resultados é possível concluir que as misturas FC + CZP e FC + RCD + CZP, apresentaram bons resultados para ambas as porcentagens de substituições testadas (10 e 15%). As amostras compostas com FC + RCD 15 e FC 10 apresentaram altos valores de retração linear, indicando, que essas formulações não devem ser utilizadas para produzir argamassas autonivelantes. Portanto, o RCD utilizado na pesquisa não apresentou bom desempenho para os ensaios de retração. Entretanto, esses resultados podem sofrer variações em função da origem dos resíduos, como por exemplo, resíduos de concreto, resíduos de alvenaria, resíduos de argamassa, resíduos mistos (concreto, argamassa e alvenaria), entre outros.

4.3.2.6 Estabilidade Dimensional (curling)

Os resultados de *curling* da argamassa de referência, para 10% de substituição, (FC 10) são mostrados na Figura 67.

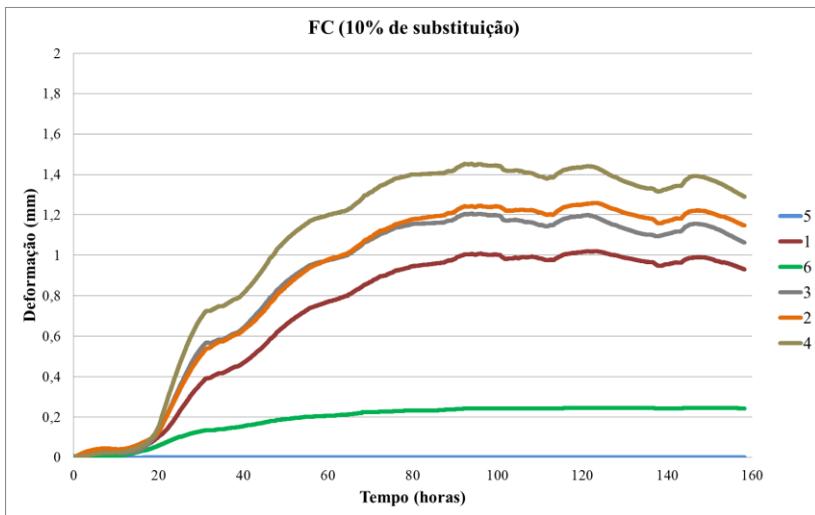


Figura 67: Valores de *Curling* da amostra FC 10.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC+RCD 10) são apresentados na Figura 68.

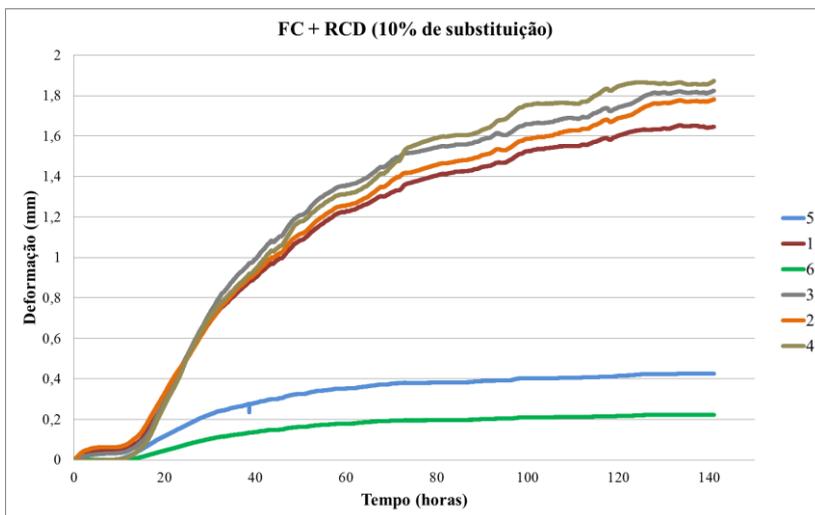


Figura 68: Valores de *Curling* da amostra FC + RCD 10.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC+ RCD + CZP 10) podem ser observados na Figura 69.

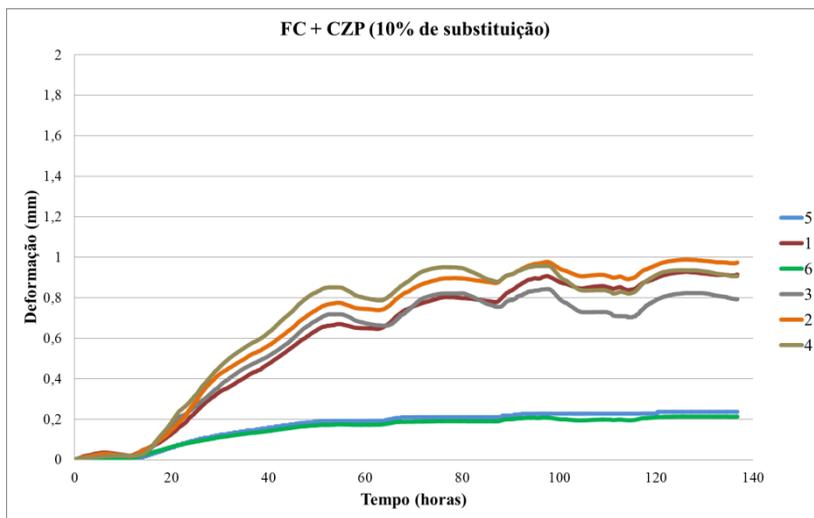


Figura 69: Valores de *Curling* da amostra FC + CZP 10.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC+ RCD + CZP 10) são dispostos na Figura 70.

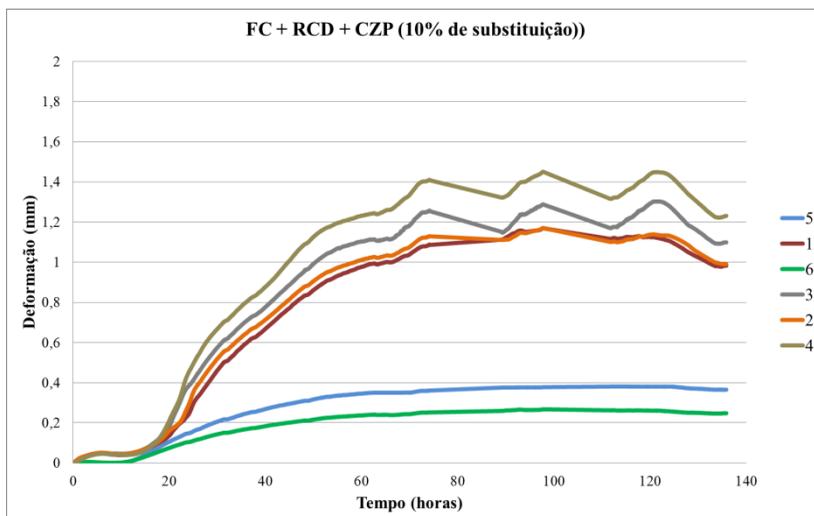


Figura 70: Valores de *Curling* da amostra FC + RCD + CZP 10.

Os resultados para as variações dimensionais da argamassa de referencia (FC15) são demonstrados na Figura 71.

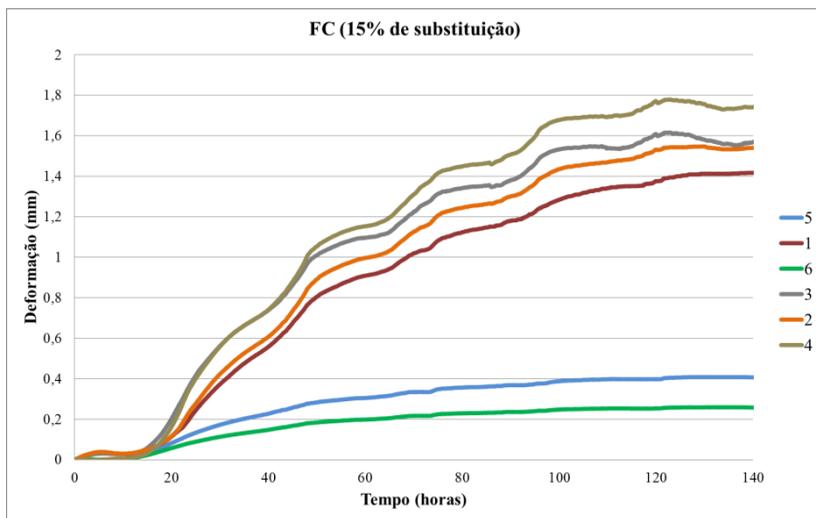


Figura 71: Variações Dimensionais da amostra FC 15.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC + RCD 15) encontram-se disponíveis na Figura 72.

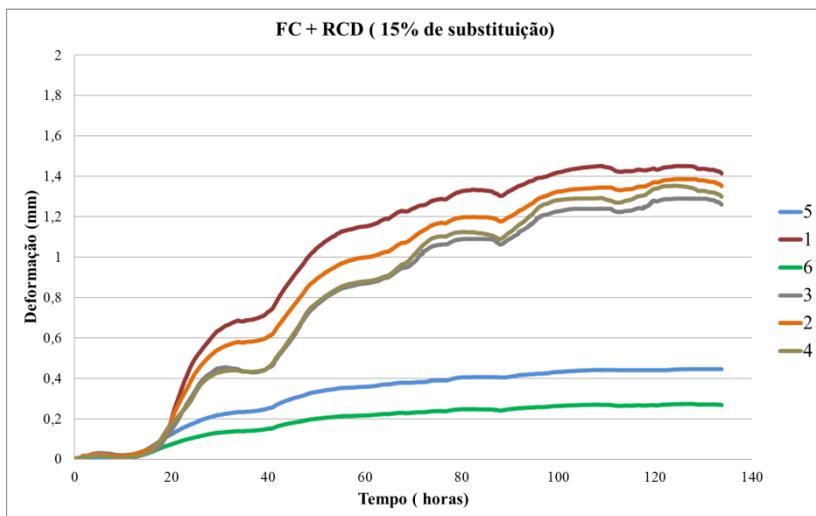


Figura 72: Valores de *Curling* da amostra FC + RCD 15.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC + CZP 15) encontram-se apresentados na Figura 73.

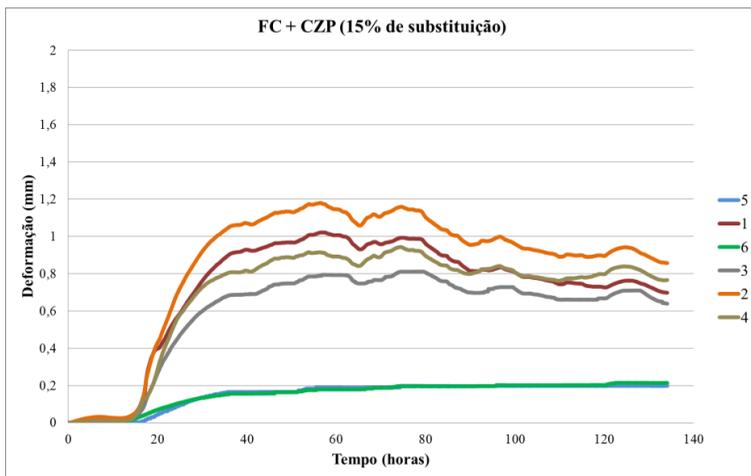


Figura 73: Valores de *Curling* da amostra FC + CZP 15.

Os resultados para *curling* da argamassa (FC + RCD + CZP 15) são mostrados na Figura 74.

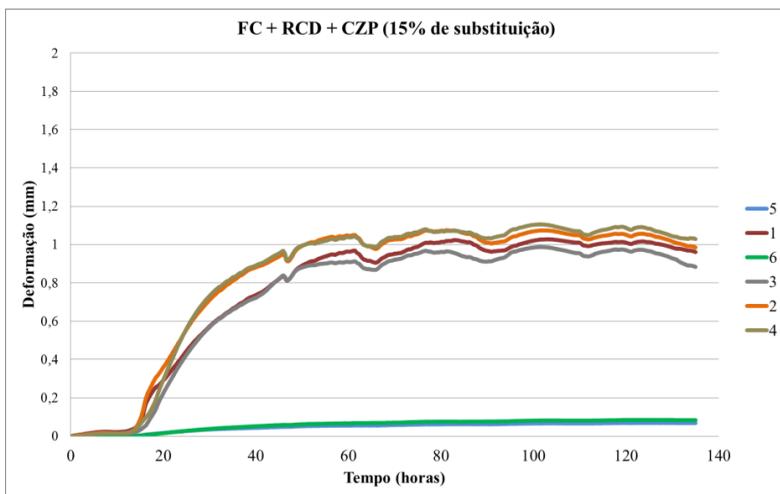


Figura 74: Valores de *Curling* da amostra FC + RCD + CZP 15.

De acordo com Le-Bihan et al. (2012), as variações dimensionais devido ao processo de secagem das placas geram como resultados curvas ascendentes, que são mais acentuadas nos cantos (*curling*). Os resultados de *curling* encontrados pelos autores para 70 horas de ensaio foram 0,7mm de deslocamento. A argamassa autonivelante FC + CZP 15, obteve 0,74 mm de deslocamento médio nos cantos (*curling*).

As médias dos valores dos deslocamentos finais devido ao fenômeno *curling* gerado nas argamassas autonivelantes produzidas, são resumidas no histograma (Figura 75).

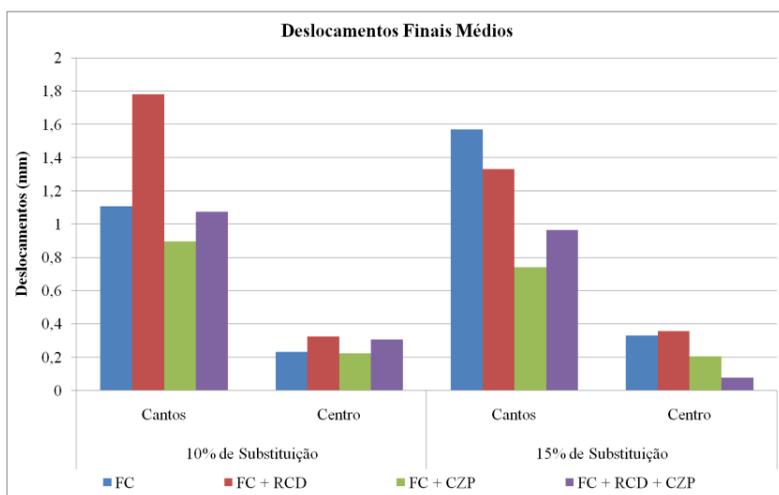


Figura 75: Deslocamentos Médios dos cantos e centro das placas.

Para 10% de substituição, apenas a amostra FC + RCD 10 apresentou valores de deslocamento médio dos cantos, maior do que a referência (FC). Para 15% de substituição, todas as argamassas autonivelantes foram mais eficientes que a referência e a amostra FC + CZP 15 apresentou o melhor resultado de todas as argamassas produzidas. Foi possível observar uma redução nos resultados de deslocamento dos cantos, com o aumento do teor de finos, exceto para a argamassa de referência.

Diante dos resultados obtidos, é possível constatar a melhoria proporcionada nas argamassas autonivelantes decorrentes da adição da cinza pesada para reduzir a retração. Outros autores (Sahmaran et al. 2006 e Rizwan e Bier 2012) também concluíram que a adição de cinza

(volante) reduzia a retração em argamassas autonivelantes e/ou auto adensáveis.

Foi verificado visualmente que nenhuma das amostras produzidas apresentaram fissuras. Maiores valores de retração podem originar fissuras e conseqüentemente proporcionar uma porta de entrada para agentes agressivos externos que geram degradação no material, como por exemplo, sais, ácidos, microrganismos, água, entre outros. A ação desses agentes externos na argamassa autonivelante tende a reduzir a vida útil do material.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no estudo em pastas comprovaram a maior eficiência do aditivo SP, com base química policarboxilato, para produção de pastas com cimento CPV ARI. Nessa etapa, também foi possível constatar que o teor de aditivo SP influencia no tempo de retenção da fluidez e consequentemente nos tempos de pega.

No estudo de dosagem de argamassas autonivelantes foi possível verificar a viabilidade de uso dos finos reciclados (RCD e CZP) para teores de substituição de 10 e 15%. As argamassas com finos de RCD demonstraram valores de espalhamento próximos com a mistura de referência (FC), além de apresentarem uma consistência adequada e um bom aspecto visual. Enquanto as argamassas com finos de CZP demonstraram maior eficácia no combate à exsudação, apesar de reduzir o espalhamento em relação a referência. Com isso, a utilização de CZP em composições ternárias de aglomerantes (CP + FC + CZP) demandaram maiores quantidades de aditivo SP. No entanto, as misturas quaternárias (CP + FC + RCD + CZP) não exigiram teores muito elevados de aditivo SP. Dessa forma, ambos os materiais analisados (CZP e RCD) apresentaram um potencial de aplicabilidade, bem como um importante tema a ser explorado em pesquisas futuras.

Para os resultados de resistência mecânica foi possível verificar que todas as argamassas apresentaram altos valores, como exigido em sistemas autonivelantes. Essa propriedade possibilita diferenciais na utilização das argamassas autonivelantes, como por exemplo, redução da espessura do piso e possibilidade de locomoção no local (piso) após 24h, possibilitando redução de custos e/ou de cronogramas. Nas primeiras idades (1 dia) a argamassa de referência apresentou os valores mais altos. No entanto, de um ponto de vista geral, as argamassas compostas com finos reciclados apresentaram maiores resistências em idades avançadas (28 dias). Uma hipótese a ser considerada é a de otimização da cura interna proporcionada pelos finos, ao decorrer do tempo.

Os resultados de absorção de água por capilaridade comprovaram que todas as argamassas produzidas apresentaram baixos valores de absorção, indicando uma microestrutura pouco porosa. Isso explica os elevados resultados de resistência mecânica obtidos. As argamassas de referência apresentaram maior coeficiente de absorção (sorptividade), aos 28 dias de idade, provavelmente devido ao melhor empacotamento dos grãos proporcionados pela adição de RCD e/ou CZP. A argamassa FC + RCD + CZP apresentou a menor sorptividade, mas a resistência mecânica foi inferior nas argamassas FC + RCD e FC

+ CZP. Uma hipótese para essa ocorrência foi que a microestrutura das misturas quaternárias poderia ter maior tortuosidade e menor porosidade aberta.

Para os resultados dos experimentos de resistência de aderência à tração foi possível verificar que as argamassas produzidas apresentaram uma boa aderência com o substrato, como exigido em bibliografia para argamassas autonivelantes.

O principal foco da presente pesquisa foi avaliar a retração, sendo esse um dos principais problemas gerados em argamassas autonivelantes. Para *curling*, os valores obtidos, demonstram que a argamassa FC + CZP 15 apresentou os resultados mais eficientes e a argamassas FC + RCD 10 obtiveram os piores, indicando que esta mistura ternária poderia comprometer a durabilidade do material. A amostra FC + RCD + CZP 15 foi a mais eficiente para o ensaio de retração linear. Dessa forma, foi possível concluir que a utilização de finos de Cinza Pesada reduzem os valores da retração por secagem. Por fim, podemos concluir que as argamassas FC + CZP 15 e FC + RCD + CZP 15 foram as misturas mais eficientes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após análise dos resultados encontrados e verificação das possibilidades de continuidade e aprimoramento em pesquisa científica, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros.

❖ Realizar um estudo mais aprofundado de dosagem, principalmente em relação aos traços, variando relações c:a (cimento/areia), como por exemplo, 1:2,5 e verificar as influências na possível durabilidade do material.

❖ Realizar um estudo da microestrutura da argamassa, da forma e textura dos finos (FC, RCD e CZP); estabelecer novas porcentagens de substituições entre os finos, exemplo 33% RCD; 33% CZP; 33% FC e verificar as influências nas propriedades das argamassas autonivelantes.

❖ Realizar um estudo com dois cimentos, como por exemplo, Portland e Aluminoso, mais os finos (FC, RCD e CZP) e verificar as influências nas propriedades das argamassas autonivelantes.

7 REFERÊNCIAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13276** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência (2005).
2. ____**NBR 13279** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (2005).
3. ____**NBR 13528** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração (2010).
4. ____**NBR 15823-1** Concreto auto adensável, classificação, controle e aceitação no estado fresco (2010).
5. ____**NBR 15823-2** Determinação do Espalhamento e Tempo de Escoamento – Método do cone de Abrams (2010).
6. ____**NBR 15823-5** Determinação da Viscosidade – Método do Funil V (2010).
7. ____**NBR NM 23** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (2001).
8. ____**NBR NM 248** Agregados – Determinação da composição granulométrica (2003).
9. ____**ABNT NBR NM 52** Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (2009).
10. ____**NBR 5733** Cimento Portland de alta resistência inicial (1991).
11. ____**NBR 7211** Agregados para concreto (2009).
12. ____**NBR NM 76** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) (1998).

13. ____ **NBR 9975** – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade (1995).
14. ALRIFAI, A.; AGGOUN, S.; KADRI, A.; KENAI, S.; KADRI, E.H. **Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 47, p. 969-976, 2013.
15. ANDRADE, L.B.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. **Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 609-614, 2009.
16. ANDRADE, L. B. Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica do concreto. Tese. Universidade federal de Santa Catarina, 2008.
17. BENABED, B. KADRI, E. H. AZZOUZ, L. KENAI, S. **Properties of self-compacting mortar made with various types of sand**. Cement & Concrete Composites, v. 34, p.1167-1173, 2012.
18. DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. **Sustainable development and climate change initiatives**. Cement and Concrete Research, v.38, p. 115-127, 2008.
19. EFNARC – European Federation for Specialist Construction and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In, EFNARC, 2002.
20. FARIAS, E. R. Utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - Análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis (SC), 2005.
21. FERRARI, L.; KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; PLANK, J. **Interaction of cement model systems with superplasticizers**

- investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements.** Journal of Colloid Interface Science, v.347, p. 15-24, 2010.
22. FELEKOGLU, B. **A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, V.22, p. 646-654, 2008.
 23. FIGUEROLA, V. Contrapiso Autonivelante - Cuidados na especificação e na execução. Técnica, Edição 214, p. 18-21, 2015.
 24. GEORGIN, J.F.; AMBROISE, J.; PÉRA, J.; REYNOUARD, J.M. **Development of self-leveling screed based on calcium sulfoaluminate cement: Modelling of curling due to drying.** Cement & Concrete Composites, v.30, p. 769-778, 2008.
 25. GEORGIN, J.F.; LE BIHAN, T.; AMBROISE, J.; PÉRA, J. **Early-age behavior of materials with a cement matrix.** . Cement and Concrete Research, v.40, p. 997-1008, 2010.
 26. ITIM, A.; EZZIANE, H.; KADRI, E.H. **Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions.** Construction and Building Materials, v. 25, p. 3603-3609, 2011.
 27. JIMÉNEZ, J.R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J.M.; BRITO, J. **Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing.** Construction and Building Materials, v. 40, p. 679-690, 2013.
 28. JUENGER, M.C.G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J.H. **Advances in alternative cementitious binders.** Cement and Concrete Research, v.41, p. 1232-1243, 2011.
 29. KATSIADRAMIS, A.B.; SOTIROPOULOU; PANDERMARAKIS, Z.G. **Rheological and Mechanical Response Modifications for a Self-Leveling Mortar.** EPJ Web of Conferences 6, 23002, 2010.

30. LIBRE, N.A.; KHOSHNAZAR, R.; SHEKARCHI, M. **Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 1262-1271, 2010.
31. LE-BIHAN, T.; GEORGIN, J.F.; MICHEL, M.; AMBROISE, J.; MORESTIN, F. **Measurements and modeling of cement base materials deformation at early age: The cause of sulfo-aluminous cement.** Cement and Concrete Research, v.42, p. 1055-1065, 2012.
32. MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. **Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers.** Construction and Building Materials, v. 44, p. 101-109, 2013.
33. MEHDIPOUR, I.; RAZZAGUI, M.S.; AMINI, K.; SHEKARCHI, M. **Effect of mineral admixtures on fluidity and stability of self-consolidating mortar subjected to prolonged mixing time.** Construction and Building Materials, v. 40, p. 1029-1037, 2013.
34. MIRANDA, L.F.R.; SELMO, M.S. **CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m on mortar properties.** Construction and Building Materials, v. 20, p. 615-624, 2006.
35. NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** Dissertação: Mestrado. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975
36. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Ed. Pini, 2ª edição. São Paulo, 1997. 828 p.
37. NUNES, S. C. B. **BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL: TECNOLOGIA E PROPRIEDADES.** Porto, 2001. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia (FEUP).

38. ONISHI, K.; BIER, T. **Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments.** Cement and Concrete Research, v.40, p. 1034-1040, 2010.
39. PÉRA, J.; AMBROISE, J. **New applications of calcium sulfoaluminate cement.** Cement and Concrete Research, v.34, p. 671-676, 2004.
40. PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. **The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates.** Cement & Concrete Composites, v. 34, p. 1044-1052, 2012.
41. PERIUS, G. R. **INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE AGREGADOS RECICLADOS SOBRE A RETRAÇÃO POR SECAGEM EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.** Florianópolis (SC), 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
42. RESOLUÇÃO CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, N^o 307, 5/07/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.
43. RIZWAN, S.A.; BIER, T.A. **Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars.** Construction and Building Materials, v. 27, p. 398-403, 2012.
44. SAFIUDDIN, M.D.; SALAM, M.A.; JUMAAT, M.Z. **Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete.** Archives of Civil and Mechanical Engineering v. XI, p. 1023-1041, 2011.
45. SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H.A.; YAMAN, I.O. **The effect of chemical admixtures and mineral additives on properties of self-compacting mortars.** Cement& Concrete Composites, v. 28, p. 432-440, 2006.
46. SCHWARTZENTRUBER, D'ALOIA L, LE ROY R, CORDIN J. **Rheological behavior of fresh cement pastes formulated**

- from a self-compacting concrete (SCC).** Cement and Concrete Research, v.36, p. 1208-1213, 2006.
47. SEIFERT, S.; NEUBAUER, J.; NEUNHOEFFER, F.G. **Spatially resolved quantitative in-situ phase analysis of a self-leveling compound.** Cement and Concrete Research, v.42, p. 919-927, 2012.
48. SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros hec e eva na microestrutura de pastas de cimento Portland.** Florianópolis (SC), 2001. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
49. TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** Thomas Telford Ltd, 1990.
50. TURK, K. **Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume.** Construction and Building Materials, v. 37, p. 326-334, 2012.