

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

AUGUSTO MASIERO GIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS**

São Leopoldo

2018

AUGUSTO MASIERO GIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

São Leopoldo

2018

G463c Gil, Augusto Masiero
Contribuição ao estudo de dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas / por Augusto Masiero Gil. – 2018.
142 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2018.

“Orientador: Dr. Bernardo Fonseca Tutikian”.

1. Concreto autoadensável. 2. Concreto reforçado com fibras. 3. Fibras metálicas. 4. Método de dosagem. I. Título.

CDU: 691.32

AUGUSTO MASIERO GIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 29 de maio de 2018

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

*Aos meus pais,
com todo meu orgulho e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível porque tive ao meu lado pessoas que acreditaram em mim e me apoiaram de diversas formas. Agradeço imensamente à Deus por colocar as pessoas mencionadas a seguir em meu caminho, sem as quais, certamente, não seria possível concluir esta jornada.

Primeiramente, gostaria de agradecer o apoio de minha família, em especial dos meus pais, Raul e Maxi, por serem os melhores exemplos de honestidade e dedicação que eu poderia ter, além de todo o suporte que me dão na busca pelos meus sonhos. Ao meu irmão Leonardo, que inicia o curso de Engenharia Civil com grande interesse pela pesquisa e me ajudou imensamente em diversas etapas do programa experimental. À minha namorada e colega de mestrado, Patrícia, por todo o suporte e paciência que teve comigo, entendendo os motivos de minha ausência e me auxiliando em diversas etapas deste trabalho, desde a sua concepção até a sua defesa final, sempre com muito carinho e dedicação. 사랑해요!

Ao meu orientador, Prof. Bernardo, pela motivação e confiança na realização desta pesquisa, disponibilizando parte do seu escasso tempo na solução de dúvidas, transmissão de conhecimentos e conselhos, sempre com paciência e bom humor. Agradeço ainda aos demais professores do PPG em Engenharia Civil da Unisinos pelos conhecimentos transmitidos ao longo desta etapa, assim como aos colegas, que sempre foram parceiros na troca de conhecimentos, dúvidas e angústias.

Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Unisinos - itt Performance - pelo apoio físico e financeiro na realização desta pesquisa. Agradeço imensamente ao apoio de toda a sua equipe, que me auxiliaram e compreenderam pacientemente os motivos de eventuais transtornos proporcionados. Aos colegas do Laboratório de Segurança Contra Incêndios pelo apoio imensurável em diversas etapas do programa experimental: Fernando Cassel, Gabriel Bottin, Guilherme Hennemann, Gustavo Mânica, Gustavo Prager, Rodrigo Oliveira e Thomas Arnold. Aos colegas do Laboratório de Análise e Segurança Estrutural pelo apoio nos ensaios mecânicos: Maira Ott, Nataly Toma e Pedro Leuck. Aos colegas Fernanda Pacheco, Hinoel Ehrenbring, Rafael Heissler, Roberto Christ, Rodrigo Périco e Vinícius Ortolan, pela disposição para trocar de ideias e conhecimentos.

Aos colegas do Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos por toda a ajuda e companheirismo na realização das concretagens: André Stein, David Camacho, Ingrid Schorr, Júlio Daudt, Maurício Schafer e Tiago Schuck.

Às empresas Molder Estruturas, Coneresul e ArcelorMittal, em especial aos colegas Maurício Mendonça e Marcelo Krumenauer, pela confiança que tiveram no trabalho, fornecendo os materiais e o suporte necessário para o seu transporte e caracterização.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado, em especial, à Elisabete Hinchink pela paciência e apoio nos momentos de dificuldade. Muito obrigado.

“Que nossas filosofias sigam no mesmo passo das nossas tecnologias.

Que nossa compaixão siga no mesmo passo dos nossos poderes.

E que o amor, e não o medo, seja o motor da mudança”.

(BROWN, 2017).

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é conhecido por sua elevada fluidez e estabilidade reológica no estado fresco, enquanto que o concreto reforçado com fibras (CRF) é conhecido por sua elevada capacidade de absorção de energia, evitando a ruptura frágil do material. Na última década, tem sido buscada a sinergia destas tecnologias com o concreto autoadensável reforçado com fibras (CAA-RF), que, além de apresentar propriedades mecânicas avançadas, permite uma melhor dispersão das fibras. No entanto, a incorporação de fibras tende a ocasionar a perda de trabalhabilidade da mistura, devido ao intertravamento com os agregados e ao aumento da área superficial de materiais secos na mistura. Este trabalho teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem de CAA-RF, relacionando propriedades nos estados fresco e endurecido. Assim, a composição da mistura é alterada de modo a incluir fibras, mantendo a mesma espessura de argamassa sobre os agregados e as fibras da mistura de CAA original, considerando a área superficial de seus componentes e a composição volumétrica. Foram realizadas dosagens com três tipos de fibras metálicas, de diferentes características geométricas, incorporadas em três teores, de modo a compor o diagrama de dosagem proposto. Os resultados dos ensaios realizados no estado fresco evidenciaram pequenas alterações em suas propriedades, com o aumento do espalhamento, porém atendendo às mesmas classes da mistura referência. Verificou-se, no entanto, que misturas com maiores teores de fibras mais longas e com maior fator de forma apresentaram maior perda de estabilidade e de dispersão das fibras, evidenciando a ocorrência de segregação pelo excesso de fluidez das misturas. A partir dos ensaios no estado endurecido foi possível verificar que a incorporação de fibras pelo método proposto contribuiu para o aumento das propriedades mecânicas das misturas, com exceção do módulo de elasticidade. Foram verificados valores de resistência à compressão na ordem de 84,5 MPa, com influência significativa do tipo de fibra, de acordo com a análise de variância realizada. A instabilidade de algumas misturas afetou a distribuição de fibras na seção fissurada, apesar de haver o aumento do fator de tenacidade com o teor de incorporação, principal parâmetro adotado no diagrama de dosagem proposto.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Concreto reforçado com fibras. Fibras metálicas. Método de dosagem.

ABSTRACT

Self-consolidating concrete (SCC) is known for its high fluidity and rheological stability in the fresh state, while fiber reinforced concrete (FRC) is known for its high energy absorption capacity, avoiding fragile rupture. In the last decade, the synergy of these technologies has been researched with self-consolidating fiber-reinforced concrete (FR-SCC), which allows better dispersion of the fibers, in addition to the advanced mechanical properties. However, the incorporation of fibers tends to cause the mixture's loss of workability due to its interlocking with the aggregates and the increase of dry materials' surface area in the mixture. This study aimed to contribute to the development of a mix design method for FR-SCC, relating properties in the fresh and hardened states. Thus, the mixture composition is modified to include fibers maintaining the same mortar thickness over aggregates and fibers as in the original SCC mixture, considering the surface area of its components and the volumetric composition. Mixtures with three types of steel fibers, of different geometric characteristics, incorporated in three contents each in order to compose the proposed mix design nomogram. The results of the tests performed in the fresh state showed small changes in their properties, with the increase of the slump-flow, but attending the same classes of the reference mixture. It was verified, however, that mixtures with higher fiber content, longer and with higher aspect ratio, showed greater loss of stability and fiber dispersion, evidencing the occurrence of fiber segregation due to excess mixture fluidity. From the tests in the hardened state it was possible to verify that the incorporation of fibers by the proposed method contributed to the improvement of mechanical properties, with the exception of the modulus of elasticity. Compressive strength values were verified in the order of 84.5 MPa, with significant influence of the fiber type, according to the analysis of variance performed. Although the instability of some blends in the fresh state affected the distribution of fibers in the cracked section, the toughness factor increased with the incorporation content, main parameter adopted in the dosage diagram.

Key-words: Self-consolidating concrete. Fiber reinforced concrete. Steel fibers. Mix design method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama carga versus deslocamento de compósitos de CRF	33
Figura 2 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto	36
Figura 3 – Influência da areia nas propriedades reológicas do concreto	40
Figura 4 – Resistência ao cisalhamento do concreto	46
Figura 5 – Propriedades reológicas de concretos com (a) diferentes viscosidades e (b) diferentes tensões de escoamento	47
Figura 6 – Diagrama esquemático da espessura do filme de argamassa	50
Figura 7 – Resumo das possíveis perturbações no esqueleto granular	51
Figura 8 – Desenvolvimento das tensões de tração em uma viga de concreto convencional e em uma viga de concreto reforçado com fibras	55
Figura 9 – Mecanismos de absorção de energia pela interação fibra-matriz	56
Figura 10 – Esquema do ensaio de flexão pelas normas (a) JSCE SF4 (JSCE, 1984) e (b) EN 14651 (EN, 2007)	58
Figura 11 – Diagrama de dosagem para concretos convencionais pelo método IBRACON	65
Figura 12 – Limites da zona de aplicação satisfatória para a relação entre as propriedades reológicas da pasta e o espaçamento entre os agregados	68
Figura 13 – Diagramas de dosagem de concretos dosados (a) considerando o teor de argamassa fixo e (b) considerando a proporção entre os agregados fixa	69
Figura 14 – (a) incorporação de fibras na composição granulométrica do esqueleto sólido e (b) definição da zona satisfatória de aplicação em função a partir do MRP	71
Figura 15 – Relação entre as propriedades das fibras com (a) e_{ar} pela simples incorporação de fibras e (b) redução no conteúdo de agregados	73
Figura 16 – Etapas que compõem o programa experimental deste estudo	75
Figura 17 – Organograma do modelo de método de dosagem proposto	79
Figura 18 – Diagrama de dosagem para os componentes da mistura	80
Figura 19 – Esquema das variáveis avaliadas	81
Figura 20 – Registro fotográfico das fibras (a) RF1, (b) RF2 e (c) RF3	86
Figura 21 – Sistema adotado para nomenclatura dos corpos de prova	89
Figura 22 – Exemplificação do esquema de verificação do índice de segregação ...	90
Figura 23 – Execução do ensaio de determinação do IDF	91

Figura 24 – Esquema do cálculo do módulo de elasticidade	93
Figura 25 – Esquema exemplificando o procedimento de ensaio de flexão	94
Figura 26 – Determinação da área sob a curva tensão-deslocamento.....	95
Figura 27 – Dosagem da mistura de CAA: (a) amostra utilizada na determinação do teor ideal de argamassa; e (b) espalhamento final da mistura	98
Figura 28 – Relação volumétrica entre a composição das misturas.....	103
Figura 29 – Análise comparativa dos resultados de espalhamento.....	105
Figura 30 – Análise comparativa dos resultados de t_{500}	106
Figura 31 – Análise comparativa dos resultados de IEV	109
Figura 32 – Análise comparativa dos resultados de IDF	111
Figura 33 – Análise comparativa dos resultados do Funil V	112
Figura 34 – Análise comparativa dos resultados de resistência à compressão.....	114
Figura 35 – Análise comparativa dos resultados de módulo de elasticidade.....	116
Figura 36 – Análise comparativa dos resultados de resistência à tração na flexão	118
Figura 37 – Diagrama carga-deformação das misturas RF1	119
Figura 38 – Diagrama carga-deformação das misturas RF2	121
Figura 39 – Diagrama carga-deformação das misturas RF3	123
Figura 40 – Análise comparativa dos resultados de fator de tenacidade.....	125
Figura 41 – Diagrama de dosagem para misturas RF1	127
Figura 42 – Diagrama de dosagem para misturas RF2	127
Figura 43 – Diagrama de dosagem para misturas RF3	128
Figura 44 – Diagrama-resumo da dosagem das misturas RF1, RF2 e RF3.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de fibras de diferentes tipos de materiais.....	37
Tabela 2 – Classificação e critérios normativos para fibras de aço.....	39
Tabela 3 – Ensaio para avaliação das propriedades do CAA no estado fresco	48
Tabela 4 – Exemplo do procedimento de cálculo da área superficial aproximada	77
Tabela 5 – Composição química do cimento	83
Tabela 6 – Composição granulométrica do cimento	83
Tabela 7 – Caracterização física dos agregados miúdos.....	84
Tabela 8 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.....	84
Tabela 9 – Caracterização física do agregado graúdo.....	85
Tabela 10 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	85
Tabela 11 – Características geométricas das fibras.....	86
Tabela 12 – Sequência de realização dos ensaios no estado fresco.....	87
Tabela 13 – Condições ambientais nos dias de mistura	88
Tabela 14 – Classificação do Índice de Estabilidade Visual.....	90
Tabela 15 – Propriedades da mistura de CAA	98
Tabela 16 – Traço em massa e em volume da mistura de CAA	99
Tabela 17 – Cálculo da área superficial aproximada dos agregados graúdos	99
Tabela 18 – Determinação do volume de vazios das misturas	100
Tabela 19 – Cálculo da área superficial aproximada das fibras	101
Tabela 20 – Cálculo dos traços para os diferentes tipos e teores de fibras	102
Tabela 21 – Resultados de espalhamento e tempo de escoamento (t_{500})	104
Tabela 22 – ANOVA para o espalhamento	106
Tabela 23 – ANOVA para o t_{500}	107
Tabela 24 – Resultados obtidos na determinação do IEV.....	108
Tabela 25 – ANOVA para o IEV	110
Tabela 26 – Resultados obtidos na determinação do IDF.....	110
Tabela 27 – ANOVA para o IDF	111
Tabela 28 – Resultados de viscosidade plástica pelo Funil V	112
Tabela 29 – Resultados de resistência à compressão axial.....	114
Tabela 30 – ANOVA para a resistência à compressão	115
Tabela 31 – Resultados de módulo de elasticidade	116
Tabela 32 – ANOVA para o módulo de elasticidade	117

Tabela 33 – Resultados do ensaio de flexão	117
Tabela 34 – ANOVA para a resistência à tração na flexão.....	119
Tabela 35 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF1	120
Tabela 36 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF2	122
Tabela 37 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF3	124
Tabela 38 – ANOVA para o fator de tenacidade.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
CAA	Concreto Autoadensável
CAA-RF	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EN	European Normative
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IEV	Índice de Estabilidade Visual
IDP	Índice de Dispersão das Fibras
INT	Instituto Nacional de Tecnologia do estado de Rio de Janeiro
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
ITERS	Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
MEC	Modelo de Empacotamento compressível
MRP	Modelo Reológico da Pasta
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
RF1	Reforçado com Fibra Tipo 1
RF2	Reforçado com Fibra Tipo 2
RF3	Reforçado com Fibra Tipo 3

LISTA DE SÍMBOLOS

h_v	altura da viga
T_b	área sob a curva até o deslocamento equivalente a 3 mm
A_f	área superficial de fibras
A_b	área superficial dos agregados graúdos
P	carga máxima aplicada
L_f	comprimento das fibras
C	consumo de cimento
δT_b	deslocamento equivalente a $L_v/150$
D_f	diâmetro da fibra
D_b	diâmetro do agregado graúdo
$d_{eq,fibra}$	diâmetro equivalente da fibra considerada como uma esfera
D_{av}	diâmetro médio dos agregados
D_{ss}	espaçamento entre os agregados
e_{ar}	espessura da camada de argamassa sobre os agregados graúdos
FT	fator de tenacidade
b_v	largura do corpo de prova
M_{CE}	massa de concreto na parte externa do espalhamento
M_{CI}	massa de concreto na parte interna do espalhamento
M_{FE}	massa de fibras na parte externa do espalhamento
M_{FI}	massa de fibras na parte interna do espalhamento
γ_{fibra}	massa específica das fibras
M_{esp}	massa específica do agregado
$\gamma_{agregado}$	massa específica dos agregados
M_{unit}	massa unitária do agregado
m	quantidade total de agregados
a/c	relação água/cimento
f_{ck}	resistência à compressão axial característica
σ_v	resistência à tração na flexão da viga
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento
T_0	tensão de escoamento
α	teor de argamassa

L_v	vão teórico da viga
μ	viscosidade plástica
V_{ap}	volume de argamassa de preenchimento
V_{ar}	volume de argamassa de recobrimento
V_{at}	volume de argamassa total
V_v	volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	28
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo Geral	30
1.2.2 Objetivos Específicos	31
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	31
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	31
2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS	33
2.1 PARÂMETROS RELEVANTES SOBRE OS CONSTITUINTES	35
2.1.1 Fibras	35
2.1.2 Agregados	39
2.1.3 Cimentos e Adições Minerais	41
2.1.4 Aditivos Químicos	42
2.2 RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO E AS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO	44
2.2.1 Propriedades no Estado Fresco	45
2.2.1.1 Comportamento Reológico no Estado Fresco	46
2.2.1.2 Avaliação das Propriedades no Estado Fresco	47
2.2.1.3 Fatores de Influência nas Propriedades do Estado Fresco	49
2.2.2 Propriedades no Estado Endurecido	54
2.2.2.1 Mecanismo de Reforço das Fibras	55
2.2.2.2 Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido	57
2.2.2.3 Fatores de Influência nas Propriedades do Estado Endurecido	58
2.3 PARÂMETROS DE DOSAGEM	60
2.3.1 Tipos de Dosagem	62
2.3.2 Desenvolvimento Metodológico da Dosagem de Concretos	63
2.3.2.1 Dosagem de Concretos Convencionais	63
2.3.2.2 Dosagem de Concretos Autoadensáveis	65
2.3.2.3 Dosagem de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras	69
2.3.3 Considerações sobre os Métodos de Dosagem Apresentados	73
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
3.1 PLANO DE PESQUISA	75

3.1.1 Etapa 1: Desenvolvimento do Modelo	75
3.1.1.1 Composição da Mistura de CAA.....	76
3.1.1.2 Inclusão das Fibras.....	78
3.1.2 Etapa 2: Aplicação do Modelo no Método de Dosagem.....	79
3.1.3 Etapa 3: Validação do Método de Dosagem.....	81
3.1.3.1 Variáveis da Pesquisa	82
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	83
3.2.1 Cimento	83
3.2.2 Agregado Miúdo.....	84
3.2.3 Agregado Graúdo	84
3.2.4 Fibras	85
3.2.5 Aditivo Químico	86
3.3 PROCEDIMENTOS DE MISTURA, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	86
3.4 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO	89
3.4.1 Ensaio no Estado Fresco	89
3.4.1.1 Espalhamento e Tempo de Escoamento da Mistura de Concreto.....	89
3.4.1.2 Índice de Estabilidade Visual (IEV) e Índice de Dispersão das Fibras (IDF). 89	
3.4.1.3 Viscosidade Plástica pelo Funil-V	91
3.4.2 Ensaio no Estado Endurecido	92
3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial	92
3.4.2.2 Módulo de Elasticidade.....	92
3.4.2.3 Resistência à Tração na Flexão e Fator de Tenacidade.....	93
3.5 ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS	95
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	97
4.1 DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	97
4.1.1 Dosagem da Mistura de CAA.....	97
4.1.2 Caracterização da Mistura de CAA.....	98
4.1.3 Inclusão das Fibras	100
4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	104
4.2.1 Espalhamento e Tempo de Escoamento (t_{500}).....	104
4.2.2 Índice de Estabilidade Visual (IEV) e Índice de Dispersão das Fibras (IDF)	107
4.2.3 Viscosidade Plástica pelo Funil V	111

4.3 ENSAIOS DO ESTADO ENDURECIDO	113
4.3.1 Resistência à Compressão Axial	113
4.3.2 Módulo de Elasticidade.....	115
4.3.3 Resistência à Tração na Flexão e Fator de Tenacidade.....	117
4.4 DIAGRAMAS DE DOSAGEM.....	126
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS.....	135

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto devem ser capazes de manter as funções que lhe foram atribuídas durante um determinado período de vida, que deve ser previsto na etapa de projeto. (NEVILLE, 2015). Verifica-se, no entanto, uma grande dificuldade por parte da indústria da construção relacionada à escassez de mão de obra qualificada e falhas de projeto e execução, que resultam na deterioração precoce deste tipo de estrutura. (NUNES, 2001). Aliado ao conceito de sustentabilidade, Hooton e Bickley (2014) acentuam a necessidade de se projetar e executar obras com uma vida útil adequada para que se reduza a extração de matéria prima e o consumo de energia dispendidos durante a sua construção.

Avanços em tecnologia do concreto têm permitido a melhoria de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, pelo emprego de novos materiais e uso de novas técnicas de proporcionamento. O concreto evoluiu de uma composição básica, composta por cimento, areia, brita e água, para misturas complexas, contendo aditivos químicos, adições minerais, fibras, entre outros. Isso tem resultado em concretos mais resistentes às diversas formas de degradação, mais duráveis e, por consequência, de menor impacto ambiental, sendo considerados concretos de alto desempenho (CAD). (AÏTCIN, 2003; TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Uma das principais limitações do concreto se refere ao seu comportamento frágil e à sua baixa capacidade de deformar-se antes de sofrer ruptura, o que se reflete em valores de resistência à tração muito mais baixos do que os de resistência à compressão. Essa deficiência vem sendo compensada com a incorporação de barras de aço, resultando em estruturas de concreto armado, largamente empregadas na construção civil. Apesar de eficiente, esse sistema não é capaz de controlar a fissuração localizada das estruturas, o que pode vir a comprometer sua durabilidade por permitir a entrada de agentes agressivos. (FIGUEIREDO, 2011b; QUININO, 2015).

Assim, um dos principais objetivos em tecnologia do concreto consiste na busca pelo aumento da sua resistência à tração, distribuindo essa capacidade ao longo de todo o material. O concreto reforçado com fibras (CRF) visa suprir esta demanda, cuja aplicação se encontra em diversas situações. (ACI, 2009). Segundo Mehta e Monteiro (2014), a substituição parcial ou total da barras de aço por fibras pode oferecer três vantagens principais: (a) resistência à fissuração em toda a

massa de concreto; (b) menor sensibilidade à corrosão das armaduras; e (c) redução do custo de mão de obra.

Para Aitcin (2003), a definição de CAD inclui outros aspectos além da elevada resistência mecânica, como propriedades avançadas no estado fresco e longa vida útil, que não são encontradas no concreto convencional. Sendo a escassez de mão de obra qualificada um dos principais fatores que afetam a qualidade da execução de estruturas de concreto e, por consequência, comprometem a sua durabilidade, o concreto autoadensável (CAA) emerge como uma alternativa viável para solucionar este problema. (BASHEERUDEEN; ANANDAN, 2015). A utilização de um concreto mais fluido, capaz de escoar pelo seu próprio peso, passar por obstáculos e preencher as fôrmas sem riscos de segregação apresenta diversas vantagens, como o aumento da velocidade de execução e a redução da mão de obra nas concretagens, além do melhor acabamento das peças. (IBRACON, 2015).

A sinergia entre as tecnologias do CAA e do CRF, resultando no concreto autoadensável reforçado com fibras (CAA-RF), apresenta grande potencial de melhoria do processo de produção das estruturas de concreto. Destaca-se a maior eficiência econômica do processo, que permite a redução do consumo de energia e da mão de obra, além de resultar em peças de maior qualidade no que se refere a acabamento e durabilidade. Por esses motivos, Khayat e De Schutter (2014) evidenciam que o CAA-RF também favorece a sustentabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O uso de fibras como alternativa de reforço estrutural do concreto não é uma novidade no meio técnico. Diversos estudos foram realizados buscando avaliar as propriedades desses compósitos, principalmente no que se refere ao seu comportamento mecânico. No geral, esses estudos indicam o potencial de aplicação do material para melhorar a resposta pós-fissuração do material e a sua capacidade de absorção de energia. (DESNERCK et al., 2014). Os avanços obtidos no desenvolvimento das propriedades desses compósitos, assim como o melhor entendimento de suas composições, têm contribuído para o aumento da durabilidade das estruturas e, por sua vez, para redução do impacto ambiental ocasionado pela indústria do concreto. (HOOTON; BICKLEY, 2014).

Na última década, o CAA-RF tem sido usado em diversas aplicações estruturais, que incluem lajes, vigas protendidas, segmentos de túneis, painéis de fachada, entre outros. (FERRARA, 2014). A maior vantagem da incorporação de fibras no CAA está relacionada à ausência de vibração, que permite uma distribuição mais homogênea das fibras, sem a sua segregação. (FERRARA; PARK; SHAH, 2007). Essa incorporação, no entanto, afeta o seu desempenho no estado fresco, devido à elevada área superficial das fibras, que demandam um volume maior de pasta para garantir a lubrificação dos componentes, além do travamento entre as fibras e os agregados graúdos ou entre as próprias fibras. (KHAYAT; KASSIMI; GHODDOUSI, 2014; MARTINIE; ROSSI; ROUSSEL, 2010).

A redução do impacto da inclusão de fibras na trabalhabilidade do material é geralmente compensada com o uso de aditivos químicos. Considerando o maior custo desse tipo de concreto, a viabilização de sua utilização está atrelada a um melhor conhecimento da influência das características e do conteúdo das fibras sobre as propriedades reológicas e mecânicas do CAA-RF. (KHAYAT; KASSIMI; GHODDOUSI, 2014). Boggio (2000) destaca a etapa de dosagem como uma das mais importantes para otimização da produção de estruturas de concreto, que reflete na redução de custos e possibilita a produção de concretos com melhor desempenho e durabilidade.

O correto proporcionamento de uma mistura de CAA-RF deve considerar a obtenção de uma trabalhabilidade adequada, associada às propriedades mecânicas requeridas no estado endurecido. Os métodos encontrados na literatura atentam para inclusão de fibras em uma mistura de CAA de forma empírica, enquanto outros relacionam suas características físicas com as de outros componentes da mistura, introduzindo novos conceitos no meio técnico. (FERRARA, 2014). Inicialmente, De Larrard (1999) introduziu o conceito de “volume de perturbação” para inclusão de fibras no seu modelo de empacotamento compressivo. Grünwald (2004) relacionou o conteúdo e a distribuição granulométrica dos agregados com a habilidade passante do material, definindo um “fator máximo de fibra”, que representa a relação do comprimento da fibra com o diâmetro máximo do agregado. Ferrara, Park e Shah (2007) apresentaram a definição do “diâmetro equivalente de empacotamento”, relacionando as dimensões das fibras às de uma esfera fictícia com mesma área superficial, cujo diâmetro resulta em um material de partículas homogêneas passantes na mesma peneira. Mais recentemente, Khayat, Kassimi e Ghoddousi

(2014) buscaram manter a mesma “espessura da argamassa de recobrimento” sobre os componentes sólidos para evitar a perda de trabalhabilidade da mistura.

Verifica-se, no entanto, que estes métodos são pouco difundidos e, apesar de embasados cientificamente, apresentam barreiras para implementação prática, por não permitirem a otimização das propriedades da mistura. Nota-se ainda que poucos estudos foram realizados no Brasil sobre o assunto e, de acordo com Figueiredo (2011), a incorporação de fibras no concreto é feita basicamente de forma empírica, incorporando-se teores fixos para verificação de suas propriedades, sem controle adequado da qualidade, o que pode elevar o custo do material. Além do mais, a ausência de um método de dosagem adequado aos materiais locais, normalizado ou reconhecido por instituições de pesquisa, podem acabar limitando o seu uso.

Esta pesquisa se insere nesse contexto e busca contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem para CAA-RF. A otimização do processo de dosagem é de interesse para engenheiros que empregam o CAA-RF direcionado às aplicações estruturais, projetos de reabilitação e obras de infraestrutura, que são de grande demanda para países em desenvolvimento. Além disso, permite a otimização do consumo de cimento para níveis mais elevados de resistência, reduzindo os impactos ambientais proporcionados pelo processo de produção deste material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) desenvolver um modelo teórico para incorporação de fibras em uma mistura de CAA por substituição do agregado graúdo, considerando a área superficial dos componentes;
- b) propor um procedimento de dosagem para CAA-RF que resulte em um diagrama relacionando a composição e as propriedades da mistura;
- c) verificar a influência que os diferentes tipos de fibra exercem nas propriedades reológicas dos CAA-RF dosados pelo modelo proposto;
- d) verificar a influência que os diferentes tipos de fibra exercem nas propriedades mecânicas dos CAA-RF dosados pelo modelo proposto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura desta dissertação está dividida em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo de introdução é apresentada uma visão geral do tema, assim como a justificativa, objetivos geral e específicos e delimitações da pesquisa. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o CAA-RF, de modo a apresentar os conceitos necessários para uma adequada compreensão do tema e do método proposto. O terceiro capítulo detalha o programa experimental deste estudo, que é dividido no desenvolvimento do modelo de dosagem, sua aplicação no método de dosagem e validação do método proposto pela avaliação de concretos produzidos com três tipos de fibras. São apresentados ainda os materiais e métodos que serão empregados para aplicação e validação do método de dosagem proposto. O quarto capítulo contempla a apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos estados fresco e endurecido. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

O método de dosagem para CAA-RF proposto nesta dissertação é estruturado em estudos desenvolvidos por outros autores, buscando combinar

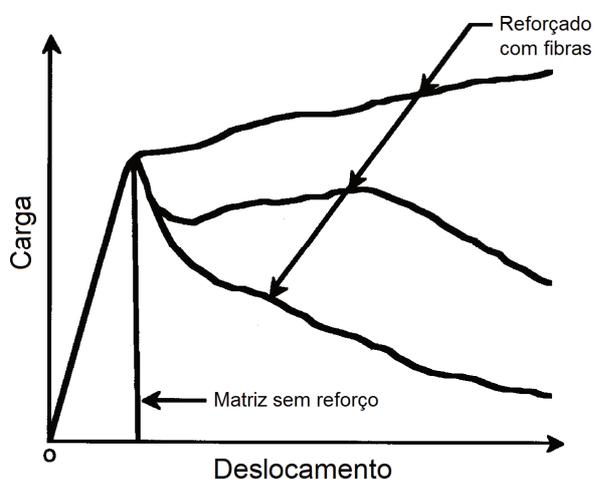
diferentes técnicas já testadas em um único modelo. Devido às limitações impostas pelo tempo disponível para realização de uma dissertação de mestrado, foi adotado apenas um tipo de cada material componente dos concretos produzidos. Os agregados miúdos e graúdos são de origem quartzosa e basáltica respectivamente, enquanto que o cimento empregado é do tipo CPV. Foram testadas fibras metálicas com ancoragens e relação comprimento/fator 45/30, 65/60 e 80/60. Cada tipo de fibra foi incorporado em teores de 0,50%, 0,75% e 1,00% em relação ao volume.

2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

O desenvolvimento de compósitos cimentícios estruturais reforçados com fibras iniciou na década de 1960 e desde então diversos tipos de fibras vêm sendo testados como alternativa de reforço. (LEE; BARR, 2003). Em oposição ao reforço convencional realizado com barras de aço, que necessita montagem prévia, o reforço com fibras é realizado durante a mistura do concreto, reduzindo tempo e custos com mão de obra. Além disso, as fibras permitem distribuir o reforço ao longo de todo o material, enquanto que as barras de aço atuam de forma localizada, o que diferencia a aplicabilidade destes dois tipos de reforço. (FIGUEIREDO, 2011b).

A incorporação de fibras na mistura tende a proporcionar uma melhoria de suas propriedades mecânicas, como resistência à tração, módulo de elasticidade e capacidade de absorção de energia durante o carregamento. (BENTUR; MINDESS, 2007). Por imporem obstáculos à fissuração, as fibras funcionam como uma ponte de transferência dos esforços solicitantes ao longo de uma fissura, reduzindo a velocidade de sua propagação. (NUNES; AGOPYAN, 1998). Como resultado, o comportamento do material é alterado do estado frágil para o estado pseudo-dúctil, apresentando maior deformação antes da ruptura. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999). Apresenta-se, na Figura 1, um exemplo hipotético deste comportamento, onde é possível observar que o reforço com fibras aumenta a capacidade resistente do material após a fissuração da matriz e aumenta com o teor e com as características das fibras empregadas.

Figura 1 – Diagrama carga versus deslocamento de compósitos de CRF



Fonte: ACI TC544 (2002, p. 3).

O CAA foi desenvolvido no Japão, no final da década de 1980, como alternativa para solucionar problemas relacionados à escassez de mão de obra e à realização de concretagens em locais de difícil acesso. A eliminação da etapa de adensamento mecânico é permitida por sua elevada fluidez e estabilidade reológica no estado fresco e torna este material uma excelente alternativa para aplicação em elementos complexos e com elevada densidade de armaduras. Aos poucos percebeu-se o elevado potencial desta tecnologia, sendo empregada em substituição ao concreto convencional em diversas aplicações. (DACZKO, 2012).

Técnicas buscando a incorporação de fibras no CAA têm sido avaliadas desde o início dos anos 2000, sendo a união dessas tecnologias comprovadamente factível em diversos ramos de aplicação. (FERRARA, 2014). Desde então, diversos tipos de fibras têm sido testados, constatando-se a influência do material constituinte das fibras, suas características geométricas e sua fração volumétrica nas propriedades reológicas das misturas produzidas. (FERRARA; PARK; SHAH, 2007; KHAYAT; KASSIMI; GHODDOUSI, 2014). Ferrara, Park e Shah (2007) destacam que o elevado desempenho do CAA no estado fresco pode permitir uma melhor dispersão das fibras, que é um critério determinante para confiabilidade no uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras.

De modo geral, a incorporação de fibras de qualquer tipo e em qualquer quantidade afetará as propriedades reológicas do compósito. Essa alteração pode ser explicada pela interação entre os elementos constituintes, fortemente influenciado pelo agregado graúdo e a sua relação com as características dimensionais das fibras, que pode dificultar a mobilidade dos materiais. Outro fator relevante é a elevada área superficial, que demanda maior quantidade de água de amassamento para manter a mesma trabalhabilidade, gerando um ponto conflitante com a durabilidade da matriz. (FIGUEIREDO, 2011b; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nos itens que seguem são abordados os principais aspectos relacionados aos materiais constituintes do CAA-RF e as relações entre a composição e as propriedades do compósito. Por fim, são abordados os parâmetros relevantes na dosagem de concretos, através de uma revisão dos diferentes métodos encontrados na literatura, que serviram de base para o desenvolvimento do método proposto nesta dissertação.

2.1 PARÂMETROS RELEVANTES SOBRE OS CONSTITUINTES

O desenvolvimento e controle do concreto começa com a compreensão da influência de cada material componente da mistura, onde a combinação de suas propriedades governará as características do concreto produzido, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Como as características e a disponibilidade dos materiais diferem de acordo com a localidade, não é possível obter misturas com as mesmas propriedades para uma mesma composição, especialmente aquelas com alto desempenho. (DACZKO, 2012). Sendo assim, a etapa de proporcionamento dos materiais deve levar em consideração as características dos mesmos e a influência nas propriedades do compósito.

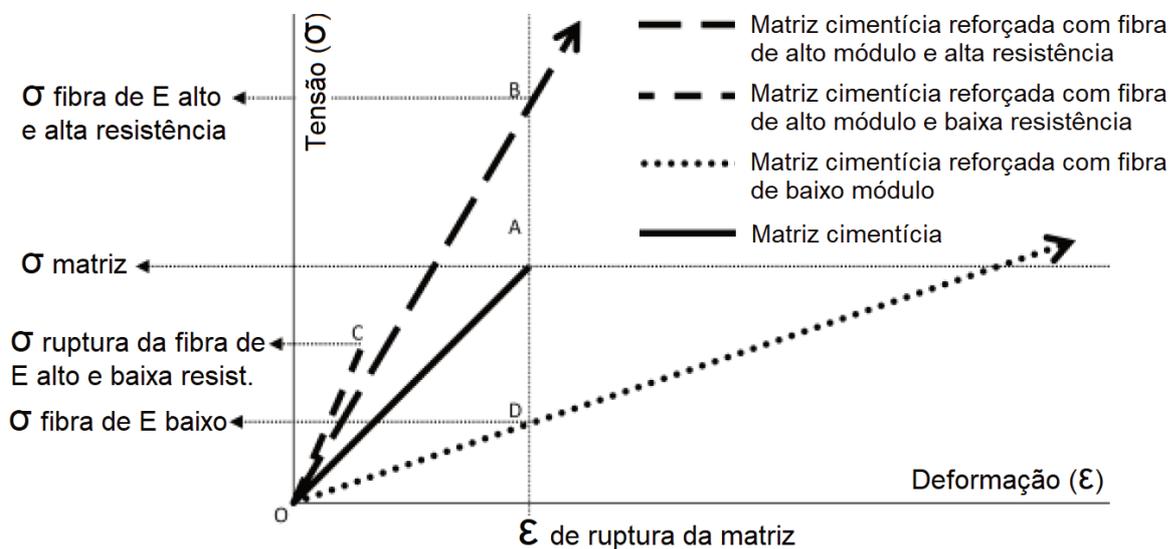
2.1.1 Fibras

As fibras incorporadas no concreto são geralmente descontínuas e distribuídas aleatoriamente na mistura, podendo ser produzidas a partir de vários materiais, formas e tamanhos. Podem ser classificadas de acordo com a natureza do material, sendo as fibras metálicas e poliméricas com maior campo de aplicação, ou ainda como macrofibras ou microfibras, que se destinam ao reforço estrutural do concreto e ao controle da fissuração por retração plástica, respectivamente. Além disso, podem ser consideradas rígidas ou flexíveis, e ainda monofilamentos ou multifilamentos, entre outros. (FIGUEIREDO, 2011b; QUININO, 2015).

Além das propriedades do material constituinte, as principais características de interesse para sua incorporação ao concreto são o fator de forma e o teor de incorporação. O fator de forma representa a relação entre o comprimento da fibra não alongada pelo diâmetro equivalente, que é o diâmetro do círculo equivalente da área da sua seção transversal. O teor de incorporação corresponde à fração do volume de fibras em relação ao volume total de material, expresso em porcentagem, podendo ainda ser expresso em função do seu consumo em relação a um metro cúbico de material. Buscando relacionar estas características, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) introduziram o conceito de “fator de fibra”, que é o produto do fator de forma com o teor de fibras e é utilizado para avaliação das propriedades de compósitos reforçados com diferentes tipos de fibra.

A capacidade de reforço que a fibra poderá proporcionar ao concreto depende das propriedades do material constituinte, prioritariamente do seu módulo de elasticidade e da sua resistência mecânica. (FIGUEIREDO, 2011a). De modo a ilustrar a influência das propriedades das fibras no comportamento mecânico do compósito, Figueiredo (2011a) apresenta o esquema hipotético da Figura 2 para uma matriz cimentícia reforçada com fibras de baixo e alto módulo de elasticidade, sendo testados dois valores de resistência para as fibras de alto módulo.

Figura 2 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto



Fonte: Figueiredo (2011a, p. 1198).

Buscando a finalidade de reforço estrutural, observa-se que a matriz reforçada com fibra de baixo módulo apresenta uma tensão mais baixa do que a matriz não reforçada para o mesmo nível de deformação, demandando maiores teores para que a tensão de ruptura por fibra não seja excedida. Por outro lado, matrizes reforçadas com fibras de alto módulo de elasticidade podem apresentar um elevado nível de tensão no momento de ruptura do compósito, porém se a sua resistência à tração for baixa, sua capacidade de reforço pós-fissuração poderá ser inexistente. Sendo assim, somente as fibras que apresentam módulo de elasticidade e resistência à tração maior que a do concreto são capazes de servir como reforço de compósitos com função estrutural. (FIGUEIREDO, 2011a). Na Tabela 1 são apresentadas as principais características e propriedades mecânicas de fibras compostas por diferentes tipos de materiais.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de fibras de diferentes tipos de materiais

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Amianto	0,02-0,4	2,6-3,4	164-196	3,1-3,5	2-3
Aramida (kevlar)	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Celulose	-	1,20	10	0,3-0,5	-
Madeira	-	1,50	71	0,9	-
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16-20
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Polipropileno	20-400	0,90-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Sisal	10-50	1,50	-	0,8	3,0
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Matriz de cimento (para comparação)	-	1,50-2,50	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007, p. 2).

Com base nas propriedades dos materiais é possível perceber que as fibras de aço possuem potencial para atuar no reforço do concreto. (BENTUR; MINDESS, 2007). Grabois (2012) ressalta o potencial de uso das fibras de aço como um reforço suplementar às barras de aço. Já as fibras que não apresentam potencial para o reforço do concreto, como as de nylon e as de polipropileno, podem contribuir para o controle da fissuração no estado fresco, por efeito da retração plástica, ou ainda para outras propriedades no estado endurecido, como melhoria da resistência ao fogo. (FIB, 2007; KLINGSCH, 2014).

Buscando comparar o comportamento de concretos convencionais reforçados com macrofibras de polipropileno e de aço, Salvador e Figueiredo (2013) utilizaram uma matriz de concreto com resistência característica de 35 MPa. As fibras de polipropileno, com 54 mm de comprimento e 0,32 mm de diâmetro, foram incorporadas em teores de 0,22, 0,33, 0,50, 0,66, 0,82 e 1,0%, enquanto que as fibras de aço, com 60 mm de comprimento e 0,75 mm de diâmetro, foram incorporadas em teores de 0,19, 0,32 e 0,45%. Os autores constataram que as fibras de aço podem ser substituídas por fibras de polipropileno, desde que em maiores teores de incorporação. Verifica-se, no entanto, que isso poderá ocasionar um impacto ainda maior nas propriedades reológicas da mistura e que, por apresentarem maior rigidez, as fibras de aço conferem maiores resistências residuais para baixos níveis de deformação, enquanto que para grandes níveis de deformação, a carga resistida pode ser superada pelas fibras de polipropileno.

Outra alternativa de reforço é a combinação de dois ou mais tipos de fibras no reforço de compósitos cimentícios, técnica conhecida como hibridização, que busca uma sinergia entre fibras de diferentes materiais e dimensões, atuando em formas e tempos distintos ao longo do carregamento. (THANON; RAMLI, 2011). Nesta combinação, fibras maiores interagem com os agregados e possibilitam um aumento da capacidade portante do compósito, enquanto que as fibras menores auxiliam no controle do processo de fissuração interna, retardando o desenvolvimento das fissuras. (BANTHIA; GUPTA, 2004). Quinino (2015) apresenta uma investigação de combinações binárias e terciárias de fibras de aço, polipropileno e carbono, em teores de 0,60%, 0,80% e 1,15%, utilizando uma matriz de concreto convencional com resistência à compressão nominal de 25 MPa. Os resultados mostraram que a combinação de fibras metálicas e sintéticas contribuem para o ganho de resistência à flexão, aproximadamente, na faixa de 50 a 90%, dependendo do teor total de fibras e a combinação entre elas.

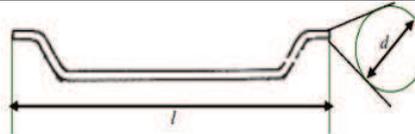
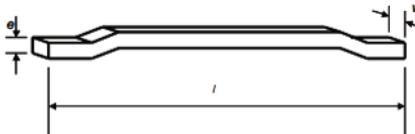
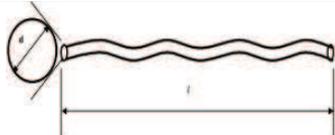
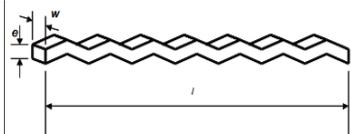
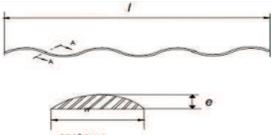
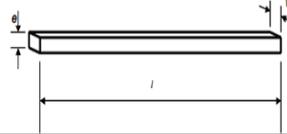
As fibras de aço apresentam potencial de melhoria das propriedades mecânicas de resistência à tração, compressão, módulo de elasticidade, resistência à fissuração, fadiga, impacto e abrasão, além da maior resistência à retração, expansão térmica e resistência ao fogo. (ACI, 2009). As fibras de aço possuem comprimentos que variam de 25 mm a 60 mm, o que as divide em fibras curtas e longas. Com relação à conformação geométrica, as fibras podem ser retas, corrugadas ou, de modo mais geral, com ganchos nas extremidades para melhorar a ancoragem. Podem ser fornecidas soltas ou, para facilitar o processo de mistura e homogeneização do material, coladas em “pentas” hidrossolúveis, que se dissolvem no concreto. (ABNT, 2007).

A norma brasileira de fibras de aço para concreto, NBR 15530 (ABNT, 2007b), apresenta a classificação das fibras em função de seu tipo e estabelece requisitos. Com relação à conformação geométrica da fibra, a norma as divide em tipo A, C e R, para fibras com ancoragens, corrugadas e retas, respectivamente. Além disso, a norma apresenta classificações para o formato da seção transversal, que está associada ao tipo de aço utilizado na sua produção, classificando-as como classe I, II ou III para as fibras oriundas de arame trefilado a frio, chapa laminada cortada a frio ou de arame trefilado e escarificado, respectivamente.

Como critérios de produção, a NBR 15530 (ABNT, 2007b) apresenta limites de resistência à tração mínima para o aço empregado na fabricação das fibras e um

fator de forma mínimo para cada tipo e classe de fibra, conforme apresentado na Tabela 2. Como critérios de aceitação, são previstos ensaios de verificação dimensional, verificação de defeitos e teste de dobramento. (ABNT, 2007).

Tabela 2 – Classificação e critérios normativos para fibras de aço

Tipo	Classe	Geometria	Limite de resistência à tração do aço (MPa)	Fator de forma mínimo
A	I		1000	40
	II		500	30
C	I		800	40
	II		500	30
	III		800	30
R	I		1000	40
	II		500	30

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 15530 (ABNT, 2007b)

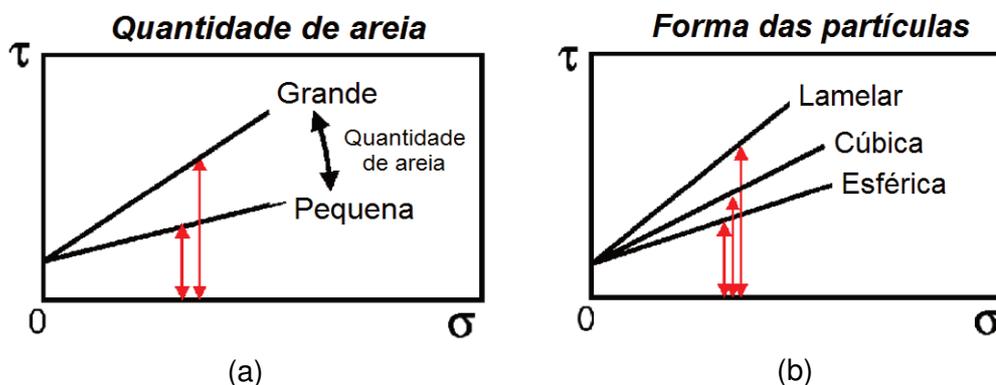
2.1.2 Agregados

As características de forma, textura e composição granulométrica dos agregados influenciam na demanda por pasta e, por sua vez, no comportamento do concreto no estado fresco. Agregados com forma arredondada e textura lisa são preferíveis para obtenção de misturas mais fluidas, pois permitem um melhor empacotamento e apresentam menor área superficial, o que reduz o consumo de

pasta e água. (NEVILLE, 2015). Além disso, tanto o volume total de agregados quanto a proporção entre os agregados miúdos e graúdos, são aspectos relevantes no processo de dosagem. (MELO, 2005). A utilização de uma curva granulométrica contínua, na qual os grãos menores preenchem os espaços deixados por grãos maiores, tende a resultar em misturas mais estáveis e com menor risco de segregação. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015; REPETTE, 2005).

Na Figura 3, Okamura e Ouchi (2003) apresentam a influência da quantidade e da forma dos grãos de areia sobre as propriedades reológicas de argamassas. É possível observar que quanto maior a quantidade e quanto mais lamelares forem as partículas, maior será a resistência ao cisalhamento, reduzindo a deformabilidade da mistura. Segundo Melo (2005), a quantidade de agregado miúdo empregada na mistura deve ser baixa para evitar o contato direto entre os grãos, que ocasiona uma redução na deformabilidade. Partículas esféricas apresentam menor travamento entre si, reduzindo a dificuldade para o seu rolamento.

Figura 3 – Influência da areia nas propriedades reológicas do concreto



Fonte: Okamura e Ouchi (2003, p. 8).

Deve-se atentar para a distribuição granulométrica, onde as areias muito grossas podem aumentar a probabilidade de segregação. Nesses casos, busca-se uma combinação com materiais finos, como areias e adições minerais, de modo a proporcionar uma maior estabilidade da mistura no estado fresco. (EFNARC, 2002). Nesse sentido, o método de dosagem para CAA proposto por Tutikian (2004) tem como base incorporação de materiais finos em substituição ao agregado miúdo para reduzir a segregação da mistura pela colocação do aditivo superplastificante. Já o método proposto por Tutikian (2007) tem como base o empacotamento prévio das partículas. Após a execução de um programa experimental comparando o uso de

areia fina e cinza volante, constatou que é possível obter resultados similares no estado fresco apesar de as adições minerais pozolânicas apresentarem melhores resultados em termos de durabilidade. Comparando os dois métodos, o autor constatou que, empregando-se os mesmos materiais, é possível obter misturais mais econômicas com métodos que consideram o empacotamento prévio das partículas, com maior precisão para métodos experimentais, uma vez que consideram a influência da forma dos grãos, além da distribuição granulométrica.

Com relação aos agregados graúdos, recomenda-se não empregar diâmetros máximos superiores a 19 mm, sendo mais usual diâmetros de 12,5 mm, ou ainda uma combinação entre agregados com estas características. Marangon (2006) ressalta que quanto maior for a dimensão máxima de um tipo de agregado, maior deverá ser a viscosidade da pasta para evitar a segregação e por isso recomenda o uso de granulometrias mais finas e contínuas. A forma e a textura superficial também são características importantes que influenciam na aderência com a pasta de cimento, podendo gerar um efeito inverso entre as propriedades nos estados fresco e endurecido. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Por fim, a composição granulométrica do agregado irá determinar o empacotamento obtido, que é um dos parâmetros utilizados na determinação da fração do material na etapa de proporcionamento.

Figueiredo (2000) ressalta a necessidade de compatibilidade dimensional entre os agregados graúdos e as fibras, recomendando a utilização de fibras com comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo. Respeitar esse critério permite que as fibras atuem como reforço do concreto e não como reforço da argamassa do concreto. Uma vez que a fratura se propaga a partir da interface entre o agregado graúdo e a argamassa, esta compatibilidade geométrica permite que um maior número de fibras atue como ponte de transferência de tensões ao longo de uma fissura.

2.1.3 Cimentos e Adições Minerais

Apesar de não existirem restrições quanto ao cimento empregado na produção de concretos especiais, as características físicas e químicas do cimento podem apresentar influência sobre o comportamento reológico do concreto no estado fresco. De acordo com Nunes (2001), cimentos mais finos apresentam

aumento da quantidade de partículas em contato com a água, redução da distância entre os grãos e aumento na frequência de colisão entre eles, resultando em misturas com maior viscosidade e menor tensão de escoamento. Como a adsorção do aditivo superplastificante ocorre principalmente pelo aluminato tricálcico (C_3A), recomenda-se o uso de cimentos com teores menores do que 10% para garantir que a distribuição ocorra de forma mais uniforme e que a fluidez da mistura seja mantida por um maior período de tempo. (EFNARC, 2005).

Com relação às adições minerais, tanto inertes quanto reativas, Tutikian e Dal Molin (2015) destacam seu potencial para reduzir a fricção entre os agregados e obter um maior empacotamento granular, permitindo o aumento da viscosidade da mistura e da sua estabilidade no estado fresco. O desempenho das adições minerais no concreto dependerá do teor incorporado e de suas características físico-químicas, como a composição química, forma cristalográfica, distribuição granulométrica, forma e textura das partículas. (MOOSBERG-BUSTNES, 2003).

2.1.4 Aditivos Químicos

Aditivos químicos são empregados no concreto com o objetivo de alterar algumas de suas propriedades, de modo a torná-lo mais adequado para o fim que se destina. Existem diversos tipos no mercado, utilizados para aumentar a fluidez, modificar a viscosidade, incorporar ar, retardar ou acelerar a pega, entre outros. Para que o concreto atinja as características de autoadensabilidade faz-se necessário o uso de aditivos superplastificantes, de modo a permitir o alcance de maior fluidez com redução no consumo de água. No entanto, misturas que apresentam pouca coesão demandam o uso de aditivos modificadores de viscosidade, principalmente pela falta de materiais finos para evitar a sua segregação. (ACI, 2016; MELO, 2005; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Os aditivos superplastificantes possuem a função de aumentar a fluidez do concreto para uma mesma quantidade de água ou permitir a redução do consumo de água para manter a mesma fluidez. (DE LARRARD, 1999). Consistem, geralmente, em uma concentração de surfactantes poliméricos, de elevada massa molecular e grande número repetições em sequência, suspensas em água. (RONCERO, 2000). Com relação a sua composição química, podem ser originados

de quatro tipos de conjuntos moleculares: lignosulfonatos, polinaftalenos sulfonados, polimelaminas sulfonadas e policarboxilatos. (AİTCIN, 2000).

Os aditivos superplastificantes agem nas partículas de cimento, promovendo um afastamento entre elas por repulsão eletrostática. Segundo Aİtcin (2000), na presença de água, as partículas de cimento tendem a sofrer uma floculação que ocasiona o aprisionamento de água no interior dos flocos, impedindo que esta contribua com a trabalhabilidade da mistura. Desta forma, as moléculas do aditivo são adsorvidas pelas partículas de cimento, carregando-as negativamente, o que ocasiona uma repulsão eletrostática e reduz a floculação. Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos, considerados mais apropriados para o CAA, possuem ainda o efeito de repulsão estérica, produzido pela presença de longas ramificações de cadeias poliméricas sobre as partículas de cimento, que impedem sua aglomeração. (AİTCIN; FLATT, 2015).

Uma das dificuldades no uso destes aditivos está relacionada ao tempo de ação, que geralmente mantém a máxima trabalhabilidade por um período de 30 a 60 minutos. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Além das condições ambientais e do procedimento de mistura, as características do cimento é uma das principais variáveis que influenciam no tempo de ação do aditivo. De acordo com Gołaszewski e Szwabowski (2004), quanto mais fino o cimento, menor a eficiência do aditivo, devido à redução da concentração do aditivo sobre a superfície das partículas de cimento. Segundo o ACI 212.3 (ACI, 2016), quanto maior a quantidade do aluminato C_3A , mais rápida é a perda de consistência na presença de superplastificantes.

Outro aspecto relevante sobre a compatibilidade entre o aditivo químico e o cimento está relacionado ao ponto de saturação, que representa a dosagem de aditivo a partir do qual o aumento no teor não proporciona mais ganhos consideráveis de fluidez. Isso ocorre devido à saturação das moléculas de aditivo sobre a superfície das partículas de cimento e depende da afinidade do polímero com o cimento. (AİTCIN; FLATT, 2015).

Além de aumentar o custo do material, o uso de teores excessivos de aditivos pode agravar problemas de incompatibilidade entre os materiais, como alterações no tempo de pega e incorporação de teores excessivos de ar. (MONTE, 2008). Sendo assim, foram desenvolvidos estudos para determinar o ponto de saturação a partir do tempo de escoamento de pastas de cimento pelo cone Marsh ou pelo cone de mini-abatimento. Apesar de não haver um consenso quanto aos parâmetros de

determinação do resultado final, alguns métodos de dosagem utilizam esta verificação no seu procedimento de dosagem, conforme Gomes e Barros (2009). Verifica-se, no entanto, que o ponto de saturação encontrado nestes procedimentos é normalmente igual ou superior a 1,0%, ou seja, maior do que o normalmente praticado na dosagem de CAA, cujos valores ficam em torno de 0,8%.

Os aditivos modificadores ou promotores de viscosidade têm o objetivo de melhorar a coesão da mistura, garantindo a resistência à segregação e contribuindo para a sua homogeneidade. Consistem em polímeros à base de celulose, acrílico ou glicol, sendo os principais bipolímeros do tipo polissacarídeos. (MELO, 2005). De acordo com Nunes (2001), estes aditivos podem atuar na superfície das partículas finas, pela redução de sua dispersão, ou dispersos em água, pela formação de uma rede de suspensão dos agregados, evitando a sua segregação. Apesar de o seu emprego no CAA não ser obrigatório, pode se tornar uma alternativa viável para situações que não seja possível empregar materiais finos, pela indisponibilidade do material ou por questões econômicas.

2.2 RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO E AS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO

Por apresentarem propriedades físico-químicas variadas, os constituintes do concreto, quando misturados, resultam em misturas com comportamentos diferentes, que podem vir a atender, ou não, as necessidades de resistência mecânica e durabilidade. (ABCP, 1984). A incorporação de fibras melhora o desempenho mecânico do concreto, cujo potencial depende das características dos materiais e da sua combinação, de modo que a transferência de esforços entre o elemento de reforço e a matriz seja realizada adequadamente. (KHAYAT; ROUSSEL, 2000).

Evidencia-se, no entanto, que o desenvolvimento das propriedades não concerne apenas exigências do concreto no estado endurecido, de modo a torná-lo adequado ao ambiente e aos esforços a que vai ficar submetido, mas também as suas propriedades no estado fresco. (ABCP, 1984). Devido à elevada relação entre as propriedades nos estados fresco e endurecido, não é possível produzir concretos de alta qualidade no estado endurecido sem apresentar propriedades satisfatórias no estado fresco. (CASTRO, 2007).

2.2.1 Propriedades no Estado Fresco

A definição do comportamento do concreto no estado fresco é complexa, sendo genericamente caracterizada como uma massa deformável que, macroscopicamente, flui como um líquido. De acordo com Ferraris (1999), o concreto pode ser considerado uma concentração de partículas sólidas em um líquido viscoso, representados pelos agregados e pela pasta de cimento, respectivamente. Para De Larrard (1999), é um material entre um fluido e um empacotamento úmido de partículas. O autor ressalta ainda que, ao contrário dos fluidos, misturas granulares apresentam mudança de volume quando cisalhados e podem apresentar perda de homogeneidade.

O comportamento do concreto no estado fresco tem sido descrito em termos de trabalhabilidade, consistência e capacidade de escoamento, que não possuem precisão científica e estão mais relacionados ao ponto de vista pessoal dos diversos profissionais envolvidos no setor de produção do concreto. Castro (2007) esclarece que o termo trabalhabilidade, por exemplo, não se refere a uma propriedade intrínseca do material, mas sim a um conjunto de fatores que resumem as qualidades necessárias da mistura, incluindo a situação de aplicação. De modo a torná-lo mais científico, o estudo do concreto fresco deve se apoiar nas propriedades reológicas do material, que consiste em relacionar as forças necessárias para provocar deformações no mesmo. (ABCP, 1984).

A reologia é o ramo da ciência que estuda a deformação da matéria e desde a década de 1940 vem sendo utilizada na tentativa de aplicar conceitos fundamentais ao estudo das propriedades do concreto fresco e ao estabelecimento de suas propriedades. (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). De acordo com De Larrard (1999), a avaliação do concreto por meio da reologia aplica-se somente aos materiais de consistência fluida, que não apresentem sinais de segregação e que mantenham seu volume constante durante o processo de cisalhamento. Seu uso ainda é limitado devido à dificuldade de se encontrar os equipamentos necessários para medir as propriedades dos materiais e a complexidade na interpretação dos resultados. (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

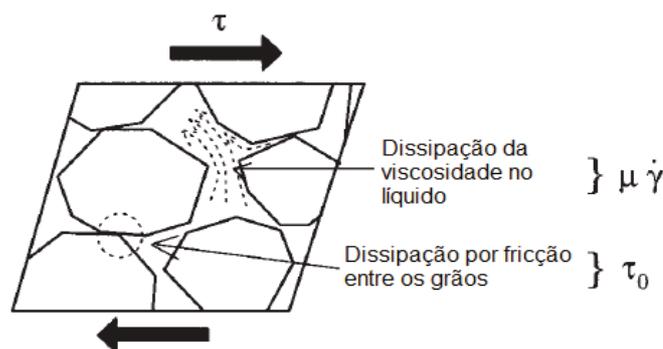
2.2.1.1 Comportamento Reológico no Estado Fresco

Com base nos resultados obtidos em diversos estudos sobre o comportamento reológico do concreto nos últimos anos, é consenso no meio técnico considerar que este se comporte como um fluido plástico ou binghamiano. Na tentativa de relacionar a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, para assumir uma viscosidade constante ao longo de todo o processo de deformação do material, é possível observar que a tensão necessária ao cisalhamento do material é determinada em função da tensão de escoamento (T_0) e da viscosidade plástica (μ) com base na taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), conforme apresentado na Equação 1. (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011; ROUSSEL, 2012).

$$T = T_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

De acordo com Castro, Liborio e Pandolfelli (2011), a tensão de escoamento corresponde à tensão que precisa ser aplicada no material para que o escoamento inicie, enquanto que a viscosidade plástica representa a taxa de deformação do material com o tempo. A mistura continuará a escoar enquanto a tensão de cisalhamento for maior que a tensão de escoamento, considerando a viscosidade plástica do material. (GOŁASZEWSKI; SZWABOWSKI, 2004). A tensão de escoamento é uma característica de materiais granulares secos e resulta do atrito intergranular durante o cisalhamento do concreto, enquanto a viscosidade plástica tende a relacionar o concreto fresco com outros materiais viscosos, como o escoamento da água nos poros do esqueleto granular, conforme apresentado na Figura 4. (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; DE LARRARD, 1999).

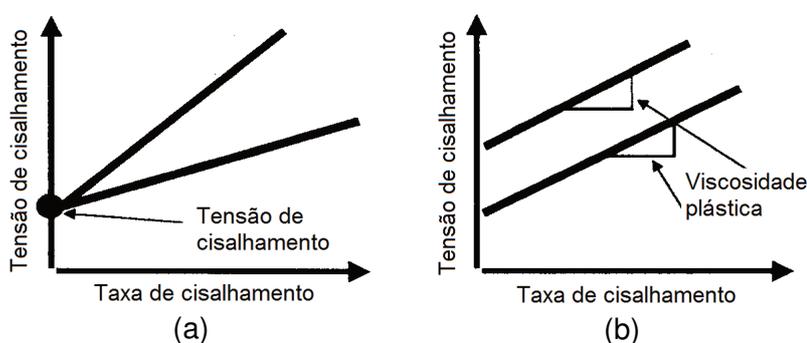
Figura 4 – Resistência ao cisalhamento do concreto



Fonte: De Larrard (1999, p. 85).

De modo a demonstrar a importância destas duas propriedades no comportamento reológico do concreto, Ferraris (1999) apresenta o comportamento reológico de duas misturas, uma com parâmetros reológicos idênticos e a outra diferentes, resultando em materiais com comportamentos completamente distintos. A Figura 5 (a) apresenta duas misturas com a mesma tensão de escoamento, porém com viscosidades diferentes, enquanto que a Figura 5 (b) apresenta duas misturas com a mesma viscosidade plástica, mas com tensões de escoamento diferentes.

Figura 5 – Propriedades reológicas de concretos com (a) diferentes viscosidades e (b) diferentes tensões de escoamento



Fonte: Ferraris (1999, p. 465).

Segundo Yen et al. (1999), os concretos de alto desempenho possuem baixa tensão de escoamento e alta viscosidade plástica, em comparação ao concreto convencional, porém Castro, Liborio e Pandolfelli (2011) ressaltam que se faz necessário um aumento da viscosidade plástica para evitar a segregação da mistura. Diversos fatores influenciam nestas alterações, o que demanda pesquisas mais aprofundadas na área.

2.2.1.2 Avaliação das Propriedades no Estado Fresco

A avaliação das propriedades do concreto convencional no estado fresco ocorre pela realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, que permite uma avaliação superficial das características de trabalhabilidade e adensabilidade do material. De acordo com Ferraris (1999), esse ensaio permite verificar se a tensão de escoamento do material corresponde à variação desejada, porém não fornece nenhuma ideia sobre a sua viscosidade. Sendo assim, concretos com abatimentos semelhantes podem apresentar diferentes valores de viscosidade, o que pode conduzir a uma má interpretação dos resultados.

Segundo Castro (2007), para CAD existe a necessidade de quantificar as propriedades reológicas em propriedades físicas fundamentais, como a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. A avaliação destas propriedades é realizada com equipamentos denominados reômetros, que operam com princípios de reometria rotacional e permitem estudar o comportamento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica em função de outras variáveis. Para Emborg (1999), os reômetros fornecem resultados mais precisos do que os métodos de ensaio empíricos por não apresentarem tanta influência da experiência do operador. No entanto, Nunes (2001) salienta as dificuldades na utilização prática desses equipamentos, principalmente relacionadas com o seu elevado custo e com a complexidade na interpretação dos resultados, o que tem limitado a sua utilização em pesquisas.

Sendo assim, para avaliação das propriedades do CAA no estado fresco, foram desenvolvidos diversos métodos de ensaio empíricos que permitem avaliar diferentes propriedades. Os requisitos para o CAA fresco dependem do tipo de aplicação, das condições de confinamento, da geometria do elemento, do processo de lançamento e do acabamento final requerido. Sendo assim, o CAA deve apresentar bom comportamento para quatro características fundamentais: fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação. (DACZKO, 2012).

São apresentados, na Tabela 3, os ensaios de caracterização abordados pela norma brasileira de CAA, NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), para avaliação de suas propriedades. Existem outros ensaios abordados em normas internacionais que possuem o mesmo fundamento dos apresentados pela norma brasileira.

Tabela 3 – Ensaios para avaliação das propriedades do CAA no estado fresco

Propriedade	Ensaio	Norma regulamentadora
Fluidez	Espalhamento	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
	Índice de Estabilidade Visual	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
Viscosidade plástica	T500 (sob fluxo livre)	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
	Funil V (sob fluxo confinado)	NBR 15823-5 (ABNT, 2017c)
Habilidade passante	Anel J (sob fluxo livre)	NBR 15823-3 (ABNT, 2017d)
	Caixa L (sob fluxo confinado)	NBR 15823-4 (ABNT, 2017e)
	Caixa U (sob fluxo confinado)	NBR 15823-4 (ABNT, 2017e)
Resistência à segregação	Coluna de segregação (estática)	NBR 15823-6 (ABNT, 2017f)
	Método da peneira (estática)	NBR 15823-6 (ABNT, 2017f)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que a maior parte desses ensaios apresenta limitações em sua execução pela incorporação de fibras, principalmente naqueles relacionados à verificação da habilidade passante do concreto. Em seu trabalho, Silva (2016) constatou o travamento das fibras durante a realização dos ensaios com o anel J e com a caixa L, impossibilitando a medição do resultado final. Buscando solucionar estas limitações, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) sugerem que os obstáculos do anel J sejam reduzidos de 16 para 8 barras e da caixa L de 3 para 1 barra.

Devido à estabilidade da mistura reforçada com fibras, Quinino (2015) ressalta a necessidade de uma energia de movimento para verificar a consistência desse tipo de mistura, que não ocorre no ensaio de abatimento pelo tronco de cone. Assim, o autor sugere a realização de ensaios que levem em consideração uma ação dinâmica, como o ensaio de Vebe ou ensaio pelo espalhamento na mesa de Graff. No entanto, estes ensaios não são aplicáveis a concretos com características autoadensáveis, uma vez que o espalhamento do material é obtido com seu peso próprio, não sendo possível aplicar uma ação dinâmica e, portanto, mensurar resultados a partir disso.

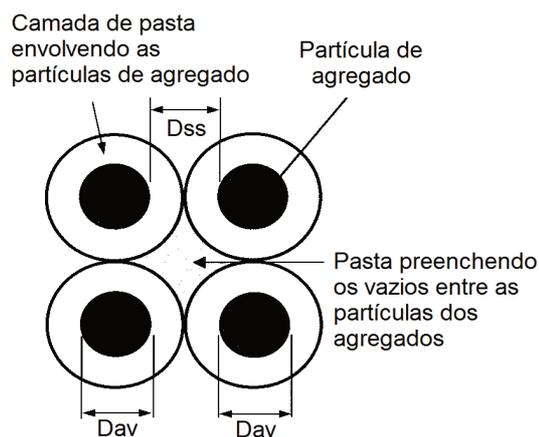
É possível perceber que a avaliação das propriedades do material no estado fresco dependerá, fundamentalmente, da aplicação pretendida, principalmente no que se refere à configuração de armaduras da estrutura. Deste modo, será possível determinar a quantidade de barras mais adequada para verificação da habilidade passante. De modo geral, pode-se afirmar que existe um consenso entre os autores que o ensaio de espalhamento do CAA pode ser empregado satisfatoriamente na avaliação do espalhamento do CAA-RF.

2.2.1.3 Fatores de Influência nas Propriedades do Estado Fresco

No estado fresco, o concreto pode ser considerado como uma suspensão concentrada, cujo comportamento reológico depende das características e frações dos materiais sólidos e líquidos, além de fatores externos. Dentre os fatores externos, destacam-se condições ambientais, tempo e procedimento de mistura, que contemplam a sequência e a intensidade de mistura, sendo influenciado por diversos mecanismos, principalmente pela ação dos aditivos químicos. (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). Os autores destacam que a influência de cada fator depende das particularidades de cada suspensão e da taxa de cisalhamento aplicada.

Com relação às propriedades intrínsecas dos materiais, Wu e An (2014) citam as propriedades físicas dos agregados e as características reológicas da pasta de cimento, assim como a proporção entre cada um na composição da mistura. Nesse sentido, Bui, Akkaya e Shah (2002) adotam a espessura do filme de pasta sobre os agregados como parâmetro de dosagem a avaliação do efeito combinado entre o conteúdo e as propriedades físicas dos agregados. Os autores destacam que para um determinado esqueleto granular e para uma determinada pasta de cimento, as propriedades reológicas do concreto vão depender da espessura do filme de pasta. A Figura 6 ilustra esse conceito, onde as partículas de agregado possuem diâmetro médio (D_{av}) e o aumento na espessura da camada de argamassa provoca um aumento da distância entre os agregados (D_{ss}).

Figura 6 – Diagrama esquemático da espessura do filme de argamassa



Fonte: Traduzido Bui, Akkaya e Shah (2002, p. 550).

- **Empacotamento de partículas**

O conhecimento das características físicas das partículas sólidas é muito importante para promover o empacotamento do esqueleto granular, que apresenta grande influência sobre as propriedades reológicas do concreto produzido. (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). Segundo De Larrard (1999), o objetivo do empacotamento é minimizar a porosidade e permitir o uso da menor quantidade possível de aglomerante. O resultado obtido dependerá do tamanho e da forma dos grãos, assim como do método de empacotamento adotado, enaltecendo o fato de que o empacotamento não é uma propriedade dos materiais. (TUTIKIAN, 2007).

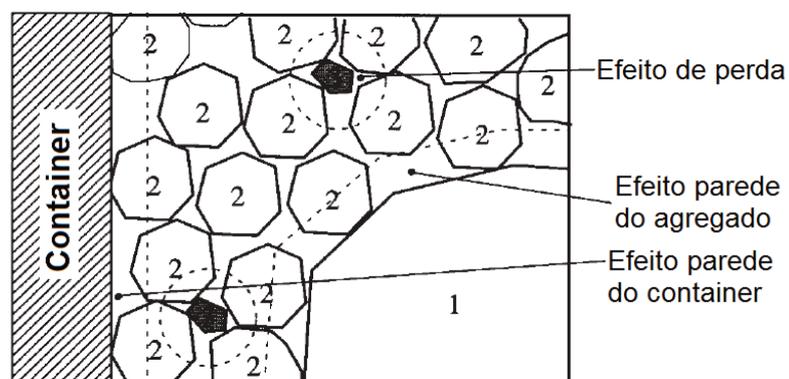
Os primeiros métodos de empacotamento consistiam na otimização das curvas granulométricas com o objetivo de encontrar a maior massa unitária possível

para o conjunto de materiais por tentativa e erro. Uma das maiores contribuições na área foi a de De Larrard (1999), pelo desenvolvimento do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), que pode ser utilizado para dosagem de diversos tipos de concreto, incluindo CAA e CRF. De acordo com Silva (2004), o modelo apresenta vantagens relacionadas ao emprego de princípios científicos, porém é considerado complexo e apresenta dificuldades para sua implementação prática, principalmente por implementar métodos computacionais.

No MEC, a mistura granular seca é formulada em razão do menor índice de vazios, considerando as etapas de lançamento e adensamento do concreto. O modelo introduz conceitos importantes como “compacidade virtual”, definida como a maior compacidade possível, ajustado com coeficientes relacionados ao processo de produção. Os grãos componentes da mistura são classificados em classes de domínio, que permitem verificar a iteração de misturas binárias e a perturbação devido aos efeitos de afastamento e de parede. Recomenda-se a utilização de misturas com uma distribuição granulométrica contínua dos componentes sólidos, onde os grãos menores ocupam parte dos vazios produzidos pelo empacotamento dos grãos maiores. (FORMAGINI, 2005).

As principais interações que podem ocorrer em uma mistura de agregados composta por partículas de 3 classes são apresentadas resumidamente por De Larrard (1999) na Figura 7. É possível observar que as partículas de classe 3 exercem um efeito de perda nas partículas de classe 2, enquanto que estas exercem um efeito parede sobre as partículas de classe 1 e sobre as paredes do recipiente. Estes efeitos poderiam ser minimizados pela seleção adequada dos agregados e a sua composição granulométrica. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Figura 7 – Resumo das possíveis perturbações no esqueleto granular



Fonte: De Larrard (1999, p. 41).

- **Reologia da pasta de cimento**

De acordo com Wu e An (2014), a trabalhabilidade do concreto é determinada pelas características reológicas da pasta de cimento, pois estas impactam nas condições de movimentação dos agregados para uma determinada espessura de pasta. Tem-se verificado que, na última década, diversos métodos de dosagem foram desenvolvidos considerando as propriedades reológicas da pasta como principal parâmetro, baseados no Modelo Reológico da Pasta (MRP).

A dosagem do CAA utilizando o MRP foi originalmente desenvolvido por Saak, Jennings e Shah (2001), que teve como base o modelo teórico da resistência à segregação de uma partícula esférica sólida suspensa em uma pasta cimentícia fluida. Os autores verificaram que a pasta deve apresentar uma resistência ao escoamento e uma viscosidade plástica mínima em função da diferença de densidade entre as partículas sólidas e a pasta. Estes conceitos foram expandidos por Bui, Akkaya e Shah (2002) pela inclusão do efeito do volume de agregado, distribuição granulométrica e relação agregado fino/agregado graúdo. A partir dos resultados de ensaios experimentais foi possível estabelecer limites para uma zona satisfatória de aplicação entre as propriedades reológicas da pasta e a sua quantidade na composição da mistura.

Segundo Castro, Liborio e Pandofelli (2011), o comportamento reológico das pastas de cimento fresco é similar ao dos concretos, porém, podem apresentar variações decorrentes de diversos fatores como a composição da pasta, o histórico de cisalhamento, condições de ensaio, entre outros. No entanto, os mesmos autores afirmam que, por se tratar de um sistema complexo, ainda não é possível prever o comportamento do concreto apenas pelas características das pastas, sendo que as variações no esqueleto sólido apresentam influência no comportamento do material.

- **Presença de fibras**

Conforme já mencionado, a utilização de fibras pode prejudicar a trabalhabilidade e aumentar a energia necessária para o lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Isso ocorre devido à interação das fibras com elas mesmas e com os agregados graúdos, que aumenta a resistência interna ao fluxo, mas que pode ser solucionada com o aumento do teor de argamassa e da relação areia-agregado graúdo. (ACI, 2009).

Silva (2016) avaliou a influência da incorporação de três tipos de fibras metálicas em uma mistura de CAA, sendo cada tipo aplicado em teores de 0,25%, 0,50% e 1,00%. O espalhamento de 855 mm da amostra referência foi reduzida a aproximadamente 750 mm pela incorporação de qualquer tipo de fibra em teor de 1,00%, enquanto que a resistência à compressão de 63 MPa foi reduzida, de modo variável, independente do tipo e da quantidade de fibras incorporadas. Todas as propriedades no estado fresco foram afetadas pela inclusão de fibras, aumentando exponencialmente de acordo com o teor incorporado.

A perda de trabalhabilidade aumenta proporcionalmente ao teor de fibras incorporado, independentemente do tipo de fibra empregada. De modo geral, fibras metálicas geram maior perda de trabalhabilidade do que fibras poliméricas, devido a maior rigidez, assim como as fibras com algum tipo de deformação, como as ancoradas e as corrugadas. (BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011). De acordo com De Larrard (1999), o comprimento das fibras é o fator que mais influencia na trabalhabilidade, governado pela relação com o agregado graúdo, que caracteriza a sua compatibilidade dimensional. Neste sentido, Mehta e Monteiro (2014) recomendam o teor máximo de fibras de aço de 2% e um fator de forma máximo de 100. Verifica-se, no entanto, que estas recomendações são genéricas e que o real impacto das fibras nas propriedades reológicas da mistura não pode ser previsto sem a realização de estudos comparativos.

Fatores relacionados ao procedimento de mistura também podem apresentar influência sobre o desempenho da mistura, dentre os quais pode-se destacar a ordem de colocação das fibras, tempo de mistura e a incorporação de ar na mistura. Frazão et al. (2015) não verificaram alterações no conteúdo de ar no do CAA no estado fresco pela incorporação de fibras metálicas em 2,5% da massa total. O mesmo foi verificado em relação à permeabilidade ao ar, conduzindo os autores à conclusão que o elevado uso de materiais finos e agregados de boa qualidade permite a adição de fibras ao CAA sem aumentar a incorporação de ar na mistura. Akcay e Ali (2012) investigaram a orientação e distribuição de fibras metálicas em CAA por análise de imagens e verificaram que as fibras se dispersaram homogeneamente sem aglomerações, sendo que o aumento no teor de fibras conduziu a uma orientação mais vertical em relação à direção de carregamento à flexão, resultando em melhoria nas propriedades mecânicas do concreto.

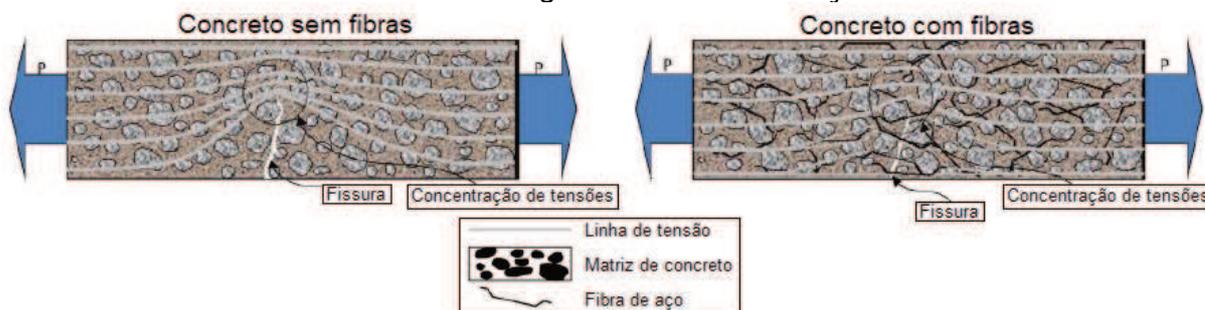
Neste contexto, Khayat e Rouseel (2000) analisaram a influência da incorporação de fibras de aço com comprimento de 38 mm em uma matriz de CAA em um teor de 0,5%. Os autores verificaram a necessidade de ajustes com aditivos químicos redutores de água, da redução do diâmetro máximo do agregado graúdo para 10 mm, da manutenção da proporção de areia/pasta entre 0,6 e 0,8 e do teor de agregado graúdo ser mantido em 30%. Recomendações similares foram propostas por Grünewald (2004). Buscando minimizar o impacto da adição de fibras rígidas na mistura, Martinie, Rossi e Roussel (2010) constataram que o aumento da quantidade de agregado miúdo e redução do agregado graúdo pode compensar a perda de trabalhabilidade. Guimarães (2010) destaca a possibilidade de utilização do fator de forma para verificar o tipo de fibra mais apropriado para diferentes matrizes cimentícias.

Com o objetivo de minimizar a perda de trabalhabilidade, algumas técnicas de proporcionamento tem sido estudadas e, em sua maioria, consideram a área superficial dos componentes como parâmetro de dosagem. Pode-se destacar os estudos de Ferrara, Park e Shah (2007), que incorporaram conceitos relacionados ao MEC e MRP para dosagem de CAA-RF metálicas, e os estudos de Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014), que trabalharam com o conceito de espessura da camada de argamassa sobre os componentes sólidos. Esses estudos serão detalhados no item 2.3.2 Desenvolvimento Metodológico da Dosagem de Concretos.

2.2.2 Propriedades no Estado Endurecido

No concreto simples, uma fissura irá proporcionar uma barreira à propagação das linhas de tensão de tração, implicando na sua concentração nas extremidades da fissura, o que pode ocasionar a ruptura abrupta do material. Existe um comprimento de fissura que caracteriza o comportamento frágil, demonstrando que o material não possui resistência residual à tração. O uso de fibras com propriedades adequadas elimina a fragilidade deste comportamento e permite reduzir a velocidade de propagação das fissuras e apresentar capacidade resistente após a fissuração. (FIGUEIREDO, 2011b). O esquema comparativo da Figura 8 permite verificar que as fibras atuam como uma ponte de transferência de tensões ao longo da fissura.

Figura 8 – Desenvolvimento das tensões de tração em uma viga de concreto convencional e em uma viga de concreto reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000, p. 14).

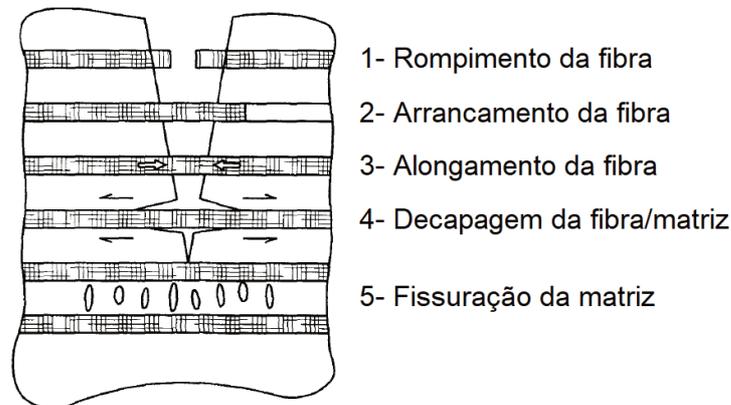
Como pode ser observado, a eficiência do processo de reforço dependerá, dentre outros fatores relacionados às propriedades dos materiais e à interação entre eles, da quantidade de fibras presentes para realizar a ligação entre os dois lados da fissura. Deste modo, é possível afirmar que a quantidade de fibras incorporadas e a sua distribuição apresentam elevada influência sobre a capacidade de reforço do elemento. De acordo com Figueiredo (2011), a distribuição aleatória de fibras melhora as propriedades ao longo de todo o material e por isso são de maior interesse para estruturas contínuas, como pavimentos rígidos, onde as tensões de tração variam na peça. O autor ressalta ainda a necessidade de avaliar a viabilidade econômica na incorporação, uma vez que elementos com tensões de tração localizadas demandam a utilização de barras de aço convencionais, pois permitem controlar de forma mais precisa as tensões de tração concentradas.

2.2.2.1 Mecanismo de Reforço das Fibras

A eficiência do processo de reforço de concretos com fibras depende, principalmente, da aderência entre a fibra e a matriz, ou seja, da relação entre as propriedades dos dois materiais em sua interface. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Se a aderência for baixa, as fibras não conseguirão transferir a carga ao longo da fissura e, portanto, não irão apresentar resistência após a fissuração. Por outro lado, se a aderência for muito elevada, as fibras podem vir a romper sem dissipação de energia, caracterizando um comportamento frágil. (FIGUEIREDO, 2011b). A Figura 9 apresenta os mecanismos de falha durante a atuação das fibras no controle da abertura de fissura. Do primeiro ao último caso estão representados a falha por

ruptura da fibra, o seu escorregamento, alongamento por tensionamento ao longo da fibra e falha na interface da mesma com a matriz. (ZOLLO, 1997).

Figura 9 – Mecanismos de absorção de energia pela interação fibra-matriz



Fonte: Zollo (1997, p. 115).

O mecanismo de reforço pode ser representado por um esquema onde as tensões são transferidas por uma parcela de atrito e outra parcela elástica, conforme o modelo proposto por Bentur e Mindess (2007). Nesse modelo, o arrancamento da fibra durante o carregamento acarreta em um aumento na transferência de tensões por atrito, o que dependerá, principalmente, do comprimento da fibra utilizada. Mehta e Monteiro (2014) ressaltam a influência da área superficial na resistência de aderência das fibras, que aumenta com o número de fibras e com suas características geométricas, como comprimento, diâmetro e ancoragens. Os autores destacam a influência do fator de forma na intensidade da tensão de pico sobre a resistência de aderência da fibra.

A partir do instante de ruptura da matriz, o compósito terá a sua resistência dependente da quantidade de fibras incorporadas, que poderá ser menor, igual ou superior à resistência da matriz. Considera-se que o teor de fibras necessário para manter a mesma capacidade resistente a partir da ruptura da matriz é o teor crítico. Compósitos com uma quantidade de fibras menor do que o teor crítico apresentará uma ruptura lenta, enquanto que em teores mais elevados o compósito apresentará um enrijecimento, aceitando maiores níveis de carregamento. (FIGUEIREDO, 2011b).

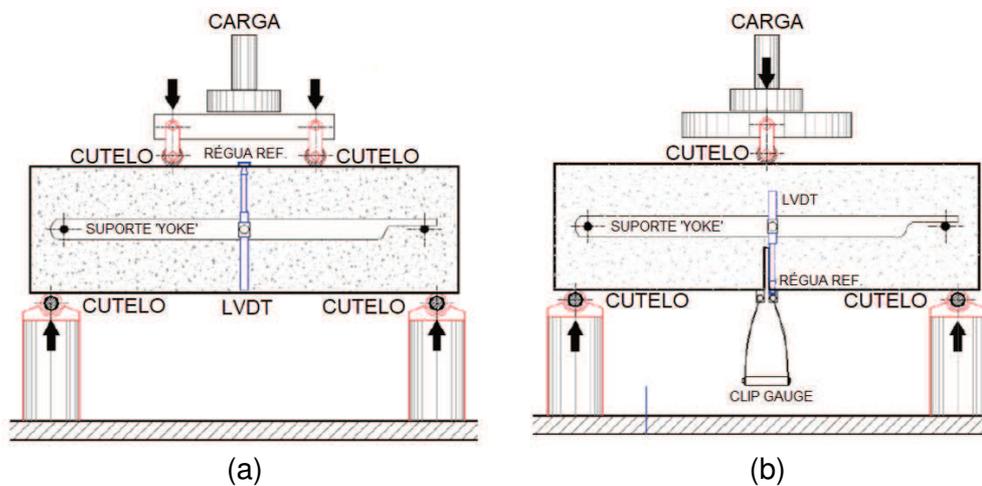
2.2.2.2 Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido

De acordo com Monte e Barboza (2017), apesar de fundamental para a qualidade e segurança das obras de engenharia, o controle tecnológico é um dos principais fatores limitadores do uso de CRF em aplicações estruturais, uma vez que envolve a realização de ensaios com equipamentos mais caros e complexos. O controle tecnológico do concreto convencional consiste basicamente na verificação de sua resistência à compressão para determinados lotes de produção. No entanto, essa propriedade não é capaz de avaliar a contribuição das fibras de aço para o fim que se destina: melhorar a capacidade resistente do concreto após a fissuração da matriz cimentícia.

A avaliação da capacidade de reforço de compósitos reforçados com fibras é realizada pelo carregamento de corpos de prova prismáticos à flexão, a partir do qual se determina o diagrama tensão-deformação, que é utilizado para determinação de parâmetros comparativos e de dimensionamento. No Brasil, o método de ensaio mais empregado é o prescrito pela Japanese Society of Civil Engineers¹ (JSCE) SF4 (JSCE, 1984), que é empregado para determinação do fator de tenacidade, obtido a partir da área sob a curva carga-deslocamento de corpos de prova prismáticos carregados em quatro pontos e representa a energia de fratura necessária para nuclear e propagar fissuras. Na Europa, há uma tendência de utilização do método prescrito pela EN 14651 (EN, 2007), que consiste na aplicação de carregamento em três pontos de um prisma com um entalhe, por apresentar melhores resultados em termos de reprodutibilidade. A Figura 10 apresenta um esquema representativo dos dois métodos de ensaio, onde é possível observar que o segundo induz a ocorrência da fissura no trecho de momento máximo, a partir do entalhe, o que garante mais estabilidade do material pós-fissuração.

¹ Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis

Figura 10 – Esquema do ensaio de flexão pelas normas (a) JSCE SF4 (JSCE, 1984) e (b) EN 14651 (EN, 2007)



Fonte: Quinino (2015).

Comparando os dois métodos de ensaio, Quinino (2015) verificou uma forte correspondência entre os valores obtidos em cada um deles, sendo possível estabelecer comparações, apesar da natureza diferenciada. Monte e Barboza (2017) ressaltam que ainda existe uma busca pelo desenvolvimento de métodos mais simples, destacando o método de duplo puncionamento, conhecido como método Barcelona, mas que necessita comprovar uma correlação com os métodos padrões. Outras propriedades mecânicas, como resistência à compressão e módulo de elasticidade, são determinadas de acordo com os métodos e normas empregadas para o concreto convencional. (FIGUEIREDO, 2011b).

2.2.2.3 Fatores de Influência nas Propriedades do Estado Endurecido

Sabe-se que as fibras tendem a proporcionar um impacto negativo na trabalhabilidade do CAA, sendo a magnitude deste impacto relacionado ao tipo de fibra, características geométricas, fração volumétrica e dispersão na mistura de concreto. (ACI, 2009). De modo geral, estas características são igualmente importantes para as propriedades mecânicas do material, cuja melhoria está relacionada à capacidade do material de suportar o carregamento após a fissuração da matriz de concreto, verificado em termos de resistência à tração na flexão e de tenacidade. No entanto, as fibras podem alterar outras propriedades do material, tanto positivamente quanto negativamente, como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a durabilidade. (YEHIA et al., 2016).

Paja e Ponikiewski (2013) desenvolveram um estudo objetivando comparar o comportamento à flexão entre CAA e concretos convencionais reforçados com fibras metálicas, com e sem ancoragem nas extremidades, em teores de 0,50%, 1,0% e 1,5%. Apesar de apresentarem um comportamento similar para os mesmos tipos e teores de fibras, verificou-se que as misturas de CAA alcançaram a abertura máxima de fissura para menores valores de deflexão em comparação às misturas de concreto convencional. Apesar disso, os autores verificaram que a equação utilizada para determinação da relação entre a abertura da fissura e a deflexão vertical pela EN 14651 (EN, 2007) para concretos convencionais atende ao coeficiente de variação de CAA.

Buscando avaliar as propriedades mecânicas de CAA com resistência à compressão de 40 MPa e 60 MPa, Khaloo et al. (2014) constataram que a adição de fibras de aço com 20,6 mm de comprimento e fator de forma 20 em teores de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% conduziu à perda de resistência à compressão, apesar de aumentar a sua resistência à tração na flexão, módulo de estabilidade e tenacidade. Por outro lado, Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015) verificaram que a incorporação de fibras de aço com 60 mm de comprimento, em teores de 0,50%, 0,75% e 1,00%, conduziu a um aumento da resistência à compressão, tração e flexão. Além disso, os autores verificaram que a incorporação de fibras resultou na redução na absorção de água do material, assim como na resistividade elétrica.

Um estudo similar foi desenvolvido por Akcay e Ali (2012) para investigar a influência do comprimento e da resistência à tração de fibras metálicas incorporadas em uma mistura de CAA com resistência à compressão de 115,3 MPa, em teores de 0,75% e 1,5%. Os autores verificaram que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade não sofreram alterações significativas, enquanto que a resistência à tração e à flexão tiveram ganhos significativos. Constatou-se que concretos com fibras longas e de maior resistência apresentaram maior tenacidade e ductilidade em relação às fibras de resistência convencional. Além disso, os autores verificaram através de análises por imagem que o aumento no volume de fibras ocasionou uma orientação vertical em relação ao plano de carregamento, resultando na melhoria das propriedades mecânicas do concreto. Resultados similares foram encontrados por Frazão et al. (2015), Yehia et al. (2016) e Tabatabaeian et al. (2017).

Avaliando os resultados obtidos em diferentes estudos, Yehia et al. (2016) estabeleceram algumas considerações sobre o impacto da incorporação de fibras nas propriedades mecânicas de CAA:

- a resistência da matriz é predominante para a resistência à compressão do compósito. Sendo assim, a incorporação de fibras geralmente não apresenta ganho, porém sua dosagem elevada pode resultar na redução dessa propriedade devido à concentração de fibras em algumas seções do elemento ou a sua orientação em relação ao plano de fissuração;
- os elementos de CAA-RF podem apresentar menor deformação nos picos de tensão do que o CAA e, no geral, conduzirão a um aumento no módulo de elasticidade com melhoria do comportamento dúctil do CAA;
- fibras metálicas tendem a aumentar a resistência à flexão do elemento de concreto. Contudo, deve-se notar que a dosagem excessiva pode resultar no aumento de vazios que podem, adversamente, afetar o concreto e reduzir a capacidade resistente à tração.

2.3 PARÂMETROS DE DOSAGEM

A dosagem corresponde a uma etapa do processo de produção do concreto, onde é definida a combinação entre os materiais empregados na mistura, através dos processos de escolha e quantificação dos componentes, de modo a atender as especificações técnicas e econômicas do material. O principal objetivo do procedimento é a obtenção de uma combinação que atenda aos requisitos previamente definidos, como a trabalhabilidade no estado fresco e a resistência mecânica no estado endurecido. Considera-se que o material que atende a estas especificações possuirá uma boa durabilidade frente a condições gerais de aplicação. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O mercado dispõe de uma elevada gama de materiais desenvolvidos para atender demandas específicas de aplicação. A definição das principais propriedades avaliadas na etapa de dosagem dependerá do tipo de concreto que esteja sendo avaliado. Tratando-se do CRF, isoladamente, suas propriedades de resistência mecânica e, em especial, o fator de tenacidade, podem ser consideradas de elevada relevância para que o material atinja o desempenho desejado durante a sua aplicação. Para o CAA, por outro lado, as propriedades no estado fresco podem ser

consideradas as principais. Uma vez que a etapa de adensamento é eliminada, a trabalhabilidade e a estabilidade da mistura se tornam essenciais para que a estrutura seja executada sem falhas que possam comprometer a resistência e a durabilidade da estrutura. No uso do CAA-RF, ambos os critérios se tornam obrigatórios para o desenvolvimento do traço ideal para aplicação. (FERRARA; PARK; SHAH, 2007).

De acordo com Tutikian e Helene (2011), as propriedades do concreto endurecido devem ser especificadas pelo projetista estrutural e as propriedades do concreto fresco serão determinadas com base nos equipamentos e técnicas de execução, assim como pelas características geométricas da estrutura. Os mesmos autores ressaltam que na etapa de dosagem do concreto, por questões econômicas e ambientais, deve-se buscar a mistura mais econômica possível, levando-se em consideração os materiais disponíveis na região de execução do traço.

Mehta e Monteiro (2014) destacam que, apesar de existirem princípios técnico-científicos consolidados no meio técnico que auxiliam o desenvolvimento da dosagem, o processo é considerado complexo por não ser possível encontrar relações matemáticas entre as diversas variáveis existentes. Além disso, os autores ressaltam que algumas características do material podem ser afetadas de maneira oposta pela alteração de outra determinada propriedade, havendo a necessidade de buscar o equilíbrio entre requisitos conflitantes. Ainda assim, considerando-se a elevada influência da variação dos componentes do concreto em suas propriedades no estado fresco e endurecido, existe uma busca constante e extremamente necessária pelo desenvolvimento de métodos de dosagem cada vez mais eficientes.

Alguns métodos para dosagem, buscando um processo de obtenção do traço ideal de CAA-RF, podem ser encontrados na literatura. Os procedimentos e teorias desenvolvidos têm contribuído para melhorar o entendimento do comportamento do concreto e alcançado as propriedades requeridas mais adequadamente. (GOMES; BARROS, 2009). No entanto, as variáveis que influenciam na definição do traço de concreto devem ser examinadas para obtenção das características requeridas, tanto no estado fresco quanto no endurecido. (KHAYAT; DACZKO, 2002).

2.3.1 Tipos de Dosagem

Segundo Recena (2007), os procedimentos de dosagem podem ser classificados simplificadaamente como métodos experimentais e métodos empíricos. A dosagem empírica não possui um embasamento científico e é fundamentada na experiência dos envolvidos, que, aos poucos, foi sendo substituída pelos métodos racionais, também conhecidos como experimentais, por serem baseados em procedimentos práticos com embasamento científico. (BOGGIO, 2000).

Os métodos empíricos são baseados em valores obtidos em tabelas ou curvas de aproximações feitas a partir da experiência acumulada ao longo dos anos. Por serem práticos, necessitam de correções aos diferentes materiais e processos de produção e conduzem a misturas mais conservadoras, com maior consumo de cimento, em favor da segurança e de custo mais elevado. São considerados práticos e de fácil aplicação, sendo mais indicados para obras de pequeno porte, com menor volume de material, ou para auxiliar na orçamentação de obras. (RECENA, 2007).

Por outro lado, os métodos experimentais partem do entendimento de leis e conhecimentos científicos, estruturados de forma a estabelecer uma sequência de atividades que possibilitam relacionar os resultados obtidos por meio de ensaios de avaliação. Esse tipo de estudo de dosagem se baseia em medidas que assegurem as propriedades requeridas no estado endurecido com uma margem de erro pré-estabelecida, assegurem a trabalhabilidade necessária para a sua implementação e fixem medidas que permitam a maior economia no processo produtivo. (BOGGIO, 2000). Recena (2007) destaca que esse tipo de método tem validade limitada aos materiais empregados no estudo e a substituição de algum dos materiais pode gerar alterações nos resultados.

A dosagem de CAD deve ser realizada através de procedimentos racionais ou experimentais, uma vez que a experiência do mercado em sua aplicação ainda é limitada e não garante resultados confiáveis para ser dosado empiricamente. Por mais que os CRF possam ser dosados pela incorporação de fibras à matriz cimentícia em diferentes teores, de modo a encontrar aquele que melhor satisfaça as propriedades no estado fresco e endurecido, ainda não existem procedimentos normatizados ou reconhecidos por instituições brasileiras. Para o CAA, no entanto, diferentes tipos de métodos podem ser encontrados, desde os empíricos até os baseados em modelos fatoriais estatísticos. (SHI et al., 2015).

2.3.2 Desenvolvimento Metodológico da Dosagem de Concretos

Embora o uso de ligantes hidráulicos para composição de concretos ocorra desde o início do século XIX, antes mesmo da descoberta do cimento Portland, considera-se que o estudo racional de proporcionamento dos materiais iniciou em 1896 por René Ferét, na França. Apresentando uma correlação entre a resistência à compressão e o volume de água e de vazios do concreto, estes estudos foram aprimorados posteriormente por Duff Abrams, que demonstrou, em 1918, a existência de uma relação inversa entre as propriedades do concreto endurecido e a relação água/cimento da mistura, considerada uma das maiores contribuições na área. Outros conceitos importantes foram desenvolvidos, relacionados com características dos agregados e consumo de cimento, assim como a importância da quantidade de água como fator determinante da consistência do concreto fresco, conforme apresentado por Inge Lyse, em 1932. A partir destes princípios foram desenvolvidos diversos procedimentos para dosagem de concretos. (HELENE; TERZIAN, 1992).

2.3.2.1 Dosagem de Concretos Convencionais

Alguns métodos de dosagem para concretos convencionais se tornaram conhecidos por terem sido adotados ou desenvolvidos por instituições da área. No Brasil, os métodos mais conhecidos são o da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP), o do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), o do Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul (ITERS) e o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). O método da ABCP é muito similar ao do American Concrete Institute² (ACI), enquanto que os outros foram desenvolvidos por pesquisadores brasileiros.

Um estudo comparativo abordando estes métodos foi realizado por Boggio (2000), objetivando entender o seu funcionamento e verificar as respostas fornecidas por eles a partir de dosagens com o uso dos mesmos materiais. Foi verificado que todos os procedimentos de dosagem são aptos a fornecer misturas com trabalhabilidade adequada e resistência características entre 20 MPa e 45 MPa, embora existam diferenças entre os consumos de cimento. O autor se baseou em

² Instituto Americano do Concreto

aspectos subjetivos para comparação, sugerindo que a escolha do método de dosagem, com mesma potencialidade de resposta, seja aquela mais adaptada à realidade e/ou necessidades da aplicação.

Considera-se que o método do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) apresenta maior simplicidade, versatilidade e capacidade de atender a demanda do mercado em sua aplicação. Isso se deve, principalmente, por trabalhar com famílias de concretos que permitem estabelecer correlações de comportamento através das quais é possível obter a composição da mistura com as propriedades desejadas. Além disso, o método se torna mais econômico e permite avaliar o custo da mistura em relação ao seu desempenho.

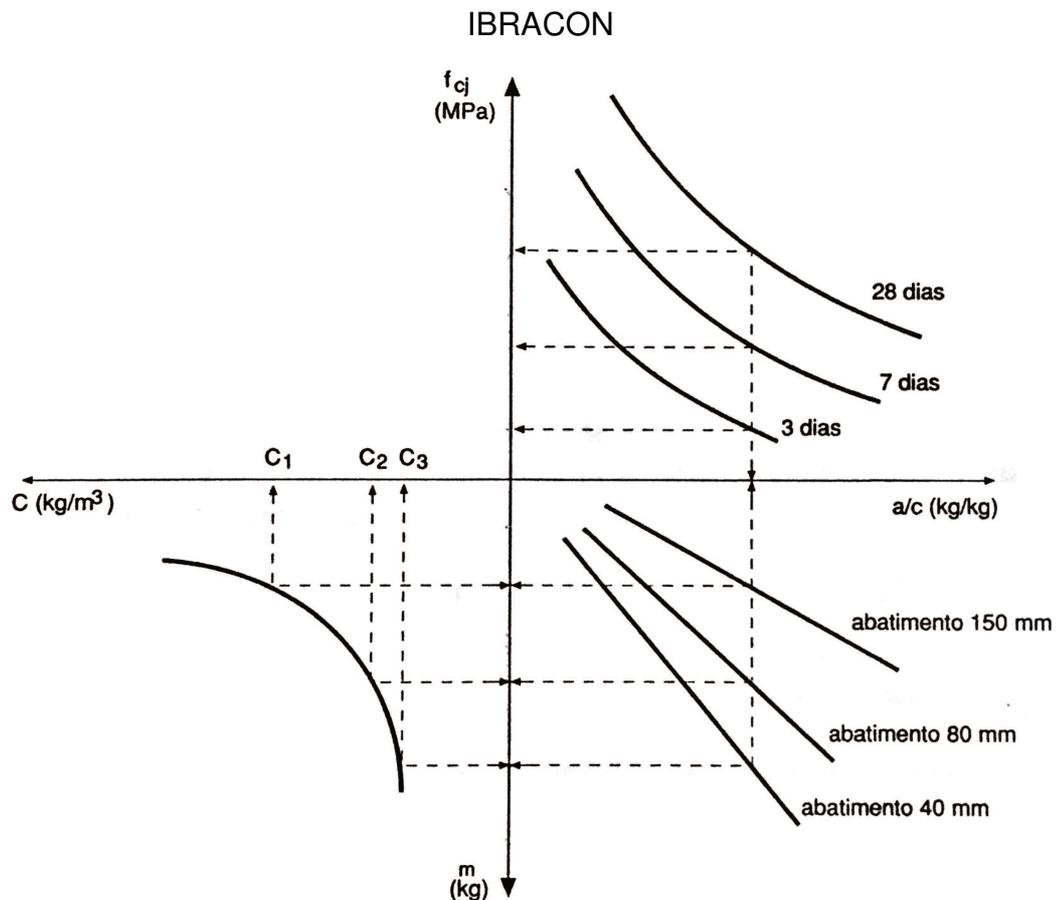
- **Método IBRACON**

Esse método baseia-se no método proposto inicialmente proposto por Eládio Petrucci em 1965, que posteriormente foi modificado com contribuições de pesquisadores do IPT da Escola Politécnica na Universidade de São Paulo: Prizskulnik, Kirilos, Terzian, Tango e Helene. Parte do princípio de que a relação água/cimento é o parâmetro mais importante do concreto e, a partir de sua definição, assim como da definição de certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas. Além disso, o concreto passa a ser mais econômico com o aumento da dimensão máxima do agregado graúdo e com a redução do abatimento do tronco de cone. A partir disso, desenvolve-se um estudo experimental que resulta em um diagrama de dosagem composto por três quadrantes onde são apresentadas as leis de comportamento para três ou mais famílias de concreto. (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O estudo experimental parte da determinação do teor ideal de argamassa para uma mistura com consumo de cimento intermediário, para a qual a relação água/cimento é ajustada de modo a manter o abatimento de tronco de cone desejado. Baseado nas informações obtidas nessa mistura, são estabelecidas mais duas misturas, com maior e menor consumo de cimento, denominados traços rico e pobre, respectivamente. Essas misturas são calculadas com o mesmo teor de argamassa do traço intermediário e com uma relação água/cimento que possua a mesma relação água/materiais secos do traço intermediário. Helene e Terzian (1992) publicaram um manual detalhando este procedimento de dosagem.

A partir do rompimento de corpos de prova é possível criar o diagrama de dosagem apresentado na Figura 11, que relaciona a composição da mistura com suas propriedades mecânicas. A partir destas leis de comportamento, é possível determinar a composição da mistura para diferentes valores de resistência à compressão, ou seja, possibilitando a determinação da composição mais econômica para a finalidade desejada.

Figura 11 – Diagrama de dosagem para concretos convencionais pelo método



Fonte: Tutikian e Helene (2011)

2.3.2.2 Dosagem de Concretos Autoadensáveis

A dosagem do CAA objetiva o atendimento às propriedades necessárias para que o concreto possa fluir com facilidade pelas formas, sem a ocorrência de segregação, independentemente da complexidade das armaduras. (GOMES; BARROS, 2009). Diversos trabalhos foram apresentados nos últimos anos com o objetivo de tornar o CAA mais robusto, permitindo o ajuste dos materiais em faixas granulométricas otimizadas ou separando a otimização da composição da pasta e a

gradação do esqueleto granular de modo a atender aos requisitos de fluidez, de durabilidade e resistência. (EFNARC, 2005). No entanto, não existe um método padrão para dosagem de misturas de CAA e diversas empresas e entidades têm desenvolvido seus próprios métodos de dosagem. (IBRACON, 2015).

O primeiro método de dosagem para CAA foi proposto por Okamura e Ouchi (2003) e era baseado em outras experiências. Nesse método a quantidade de agregado graúdo é fixada em 50% do volume de sólidos e o volume de agregado miúdo ajustado em 40% do volume de argamassa, sendo a relação água/cimento e o teor de aditivo ajustados de acordo com as necessidades requeridas. Posteriormente, De Larrard (1999) aplicou seu modelo do empacotamento compressivo ao CAA e diversos outros métodos buscando ajustar as propriedades reológicas da pasta foram desenvolvidos, podendo-se mencionar Saak, Jennings e Shah (2001) e Bui, Akkaya e Shah (2002). Modelos estatísticos fatoriais também têm sido aplicados à dosagem do CAA, através do qual são derivadas tabelas de dimensionamento, correlacionando dados de dosagem com as propriedades do material. (KHAYAT; GHEZAL; HADRICHE, 2000).

No Brasil também se verificou o desenvolvimento de métodos específicos para a dosagem do CAA, como o de Repette e Melo, que abordam o estudo reológico da pasta de cimento para ajuste das adições minerais e da argamassa para ajuste do agregado miúdo, sendo o aditivo utilizado para o ajuste do agregado graúdo. (REPETTE, 2011). Pode-se mencionar também o método de Tutikian (2004), que é totalmente experimental e trabalha com famílias de concreto para elaboração do diagrama de dosagem, similar ao método IBRACON. O método de Tutikian (2007) trabalha com a busca do empacotamento máximo possível dos agregados nas etapas preliminares. Por fim, o método proposto por Alencar e Helene, que também é uma contribuição ao método IBRACON, trabalha com o conceito de correção da coesão pela substituição de adições por cimento para manter a estabilidade da mistura. (ALENCAR, 2008).

- **Método de Saak, Jennings e Shah (2001) e Bui, Akkaya e Shah (2002)**

O método desenvolvido por Saak, Jennings e Shah (2001) consiste em um modelo teórico de controle da segregação para CAA. O modelo assume que para uma determinada distribuição granulométrica e fração volumétrica de agregados, a reologia e a densidade da pasta de cimento governam a fluidez e a resistência à

segregação do concreto. Sendo assim, para evitar a segregação em condições estáticas e dinâmicas, devem ser estabelecidos valores mínimos de tensão de escoamento e viscosidade, obtidos a partir da diferença de densidade da pasta de cimento e das partículas de agregado. Esses limites são derivados a partir do estudo da resistência à segregação de uma partícula esférica sólida suspensa em uma pasta de cimento. Assim, os autores sugerem que existe uma variação limite para as propriedades reológicas, denominada “zona de autofluxo reológico”, dentro da qual a possibilidade de segregação é minimizada e, ao mesmo tempo, é mantida a elevada trabalhabilidade da mistura.

Posteriormente, Bui, Akkaya e Shah (2002) expandiram esse conceito para incluir o efeito da interação do agregado, considerando o volume, a distribuição granulométrica e a relação proporcional entre agregado miúdo e graúdo. O método consiste em um estudo experimental das propriedades reológicas de pastas de cimento com diferentes relações água/cimento e teores de aditivo superplastificante, e a sua aplicação em diferentes quantidades em misturas de CAA. As propriedades da pasta são avaliadas quanto ao espalhamento e a viscosidade plástica aparente, enquanto que as propriedades do CAA são avaliadas quantitativamente quanto ao espalhamento, resistência à segregação, habilidade passante e análise visual. A partir dos resultados de ensaios experimentais é possível estabelecer uma zona satisfatória de aplicação, obtida pela relação entre as propriedades reológicas da pasta de cimento e pela quantidade de pasta na composição da mistura de CAA, que representa o espaçamento entre os agregados.

A Figura 12 apresenta essa relação, através da qual é possível observar que quanto menor o espaçamento entre os agregados, ou seja, quanto maior a quantidade de pasta de cimento, maior deve ser o espalhamento da pasta de cimento para que a mistura se enquadre dentro dos parâmetros desejados. Caso a pasta de cimento não atenda a estas propriedades, a mistura se enquadra em uma zona de baixa deformabilidade. Por outro lado, misturas com maior espaçamento entre os agregados demandam pastas com menor espalhamento de modo a garantir que a mesma se enquadre em uma zona de segregação. Isso permite otimizar a relação água/cimento e o teor de aditivo superplastificante de acordo com a aplicação desejada para a mistura dosada por esse método.

Figura 12 – Limites da zona de aplicação satisfatória para a relação entre as propriedades reológicas da pasta e o espaçamento entre os agregados



Fonte: Bui, Akkaya e Shah (2002, p. 556).

• Métodos de Tutikian e Dal Molin

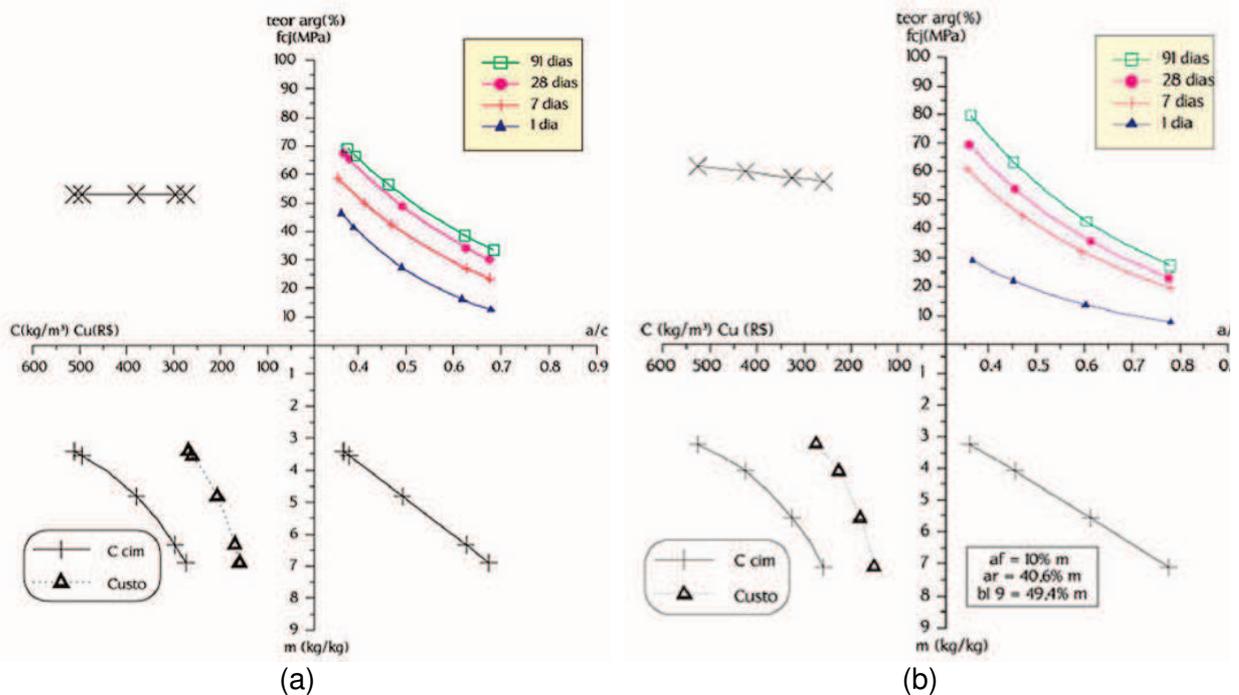
Os métodos propostos por Tutikian (2004) e Tutikian (2007), publicados também por Tutikian e Dal Molin (2015), caracterizam-se como métodos experimentais, que possuem etapas a serem seguidas pelo usuário, resultando em diagramas de dosagem, similares ao do método IBRACON. A principal diferença entre os dois métodos é que o primeiro trabalha com um teor de argamassa fixo para todas as famílias de concreto, enquanto que o outro mantém fixa a proporção entre os agregados e varia o teor de argamassa entre as famílias.

O primeiro método inicia com a determinação de, no mínimo, três famílias de concreto convencional, com o mesmo teor de argamassa e a mesma relação água/materiais secos, de acordo com o método IBRACON. A partir da mistura experimental de cada família, adiciona-se aditivo superplastificante até atingir o espalhamento desejado, com consequente segregação da mistura. Paralelamente, adicionam-se materiais finos, em teores de substituição do agregado miúdo, de modo a reduzir a segregação e manter a mesma trabalhabilidade. O teor de aditivo é mantido fixo para todas as famílias de concreto. A partir da caracterização mecânica de cada uma, é possível traçar o diagrama de dosagem, que é o resultado final do método.

O segundo método inicia com o empacotamento dos agregados que serão utilizados na mistura, de modo a se obter a relação entre agregados miúdos e grãos com menor volume de vazios. A partir disso determina-se

experimentalmente o teor de aditivo superplastificante e a relação água cimento mais adequadas para atingir a trabalhabilidade desejada com o traço intermediário. São estabelecidos os traços rico e pobre pela variação do consumo de cimento, porém mantendo-se fixa a relação entre os agregados e, conseqüentemente, variando-se o teor de argamassa. O teor de aditivo é mantido fixo para todas as famílias de concreto e a relação água/cimento é variada de modo a manter o mesmo espalhamento em todas as misturas. Do mesmo modo, a partir da caracterização mecânica de cada família, é possível traçar o diagrama de dosagem. A Figura 13 apresenta um comparativo dos diagramas de dosagem obtidos pelos dois métodos.

Figura 13 – Diagramas de dosagem de concretos dosados (a) considerando o teor de argamassa fixo e (b) considerando a proporção entre os agregados fixa



Fonte: Tutikian e Dal Molin (2015).

2.3.2.3 Dosagem de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras

A partir do consenso de que o maior empacotamento das partículas é uma das principais técnicas utilizadas para garantir a estabilidade reológica de misturas com elevada fluidez, os estudos relacionados à dosagem do CAA-RF têm buscado a inclusão das fibras no esqueleto sólido da mistura. Além disso, esses métodos consideram que esse esqueleto é suspenso em um líquido viscoso, que pode ser tanto a pasta de cimento quanto a argamassa, dependendo da escala de

observação, que deve ser otimizado quanto às suas propriedades reológicas para obtenção do comportamento desejado. Evidencia-se, desse modo, que no desenvolvimento de métodos para dosagem de CAA-RF tomou-se como referência os métodos consolidados para o CAA. (FERRARA, 2014).

Inicialmente, De Larrard (1999) propôs o conceito de “volume de perturbação” para o seu modelo do empacotamento compressivo, de modo a incluir a modificação do empacotamento do esqueleto sólido pela inclusão de fibras. Grünewald (2004) relacionou o conteúdo e a distribuição granulométrica dos agregados com a habilidade passante do material, definindo um “fator máximo de fibra”, que representa a relação do comprimento da fibra com o diâmetro máximo do agregado. Ferrara, Park e Shah (2007) introduziram a definição do “diâmetro equivalente de empacotamento”, que relaciona as dimensões das fibras com às de uma esfera fictícia que tem um diâmetro que resulta em um material de partículas homogêneas passantes na mesma peneira, utilizando o MRP desenvolvido para CAA por Bui, Geiker e Shah (2003) como procedimento de dosagem. Em seu método, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) abordam a argamassa como parâmetro de dosagem, variando seu volume na obtenção de misturas com parâmetros similares de trabalhabilidade. Verifica-se, no entanto, que no Brasil ainda não existe uma frente de pesquisa voltada à dosagem desse tipo de concreto, sendo geralmente realizado de modo empírico.

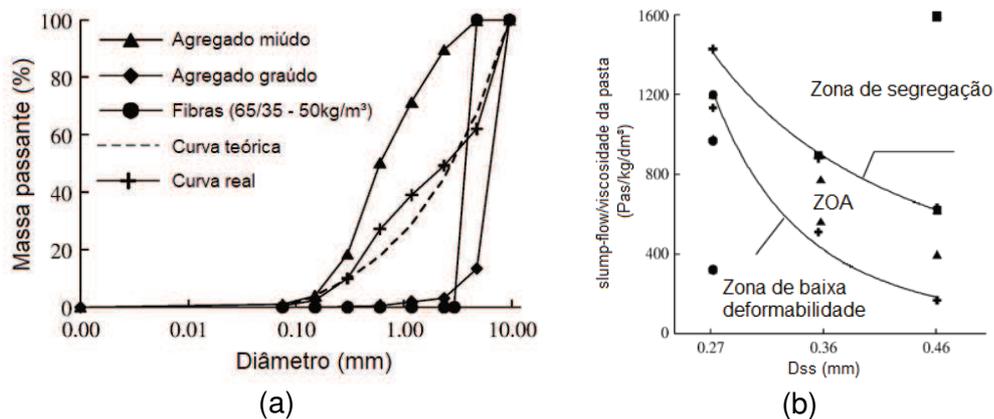
- **Método de Ferrara, Park e Shah (2007)**

O MRP desenvolvido por Saak, Jennings e Shah (2001) e Bui, Akkaya e Shah (2002) para dosagem de CAA foi utilizado por Ferrara, Park e Shah (2007) para incorporação de fibras metálicas em misturas de CAA. Esse método consiste na inclusão de fibras na distribuição granulométrica do esqueleto sólido da mistura. Para isso, as fibras são consideradas esferas fictícias com diâmetro equivalente ($d_{eq, fibra}$) calculado em função da área superficial de acordo com a Equação 2, considerando a massa específica dos agregados ($\gamma_{agregado}$) e das fibras (γ_{fibra}).

$$d_{eq, fibra} = \frac{3L_f}{1 + 2(L_f/d_f)} \frac{\gamma_{fibra}}{\gamma_{agregado}} \quad (2)$$

As fibras são incorporadas na composição granulométrica do esqueleto sólido, composto pelos agregados miúdos e graúdos, tendo um diâmetro que resulta em um material de partículas homogêneas passantes na mesma peneira, conforme apresentado na Figura 14 (a). Seguindo o procedimento utilizado para dosagem de CAA, procede-se com estudos experimentais para determinação das propriedades reológicas da pasta de cimento e das propriedades das CAA-RF com diferentes composições de pasta e espaçamento entre os agregados. A partir destes resultados, foram estabelecidos os critérios para determinação de uma zona satisfatória de aplicação que permite otimizar a composição da mistura, conforme apresentado na Figura 14 (b).

Figura 14 – (a) incorporação de fibras na composição granulométrica do esqueleto sólido e (b) definição da zona satisfatória de aplicação em função a partir do MRP



Fonte: Ferrara, Park e Shah (2007, p. 962 e 967).

- **Método de Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014)**

O método consiste em um modelo teórico para inclusão de fibras em uma mistura de CAA a partir da relação da composição da mistura com as características dos materiais empregados, de modo a evitar a perda de trabalhabilidade.

Os autores consideram o concreto uma mistura de argamassa e componentes sólidos, em que a argamassa é composta por cimento, areia e água, enquanto que os componentes sólidos representam os agregados graúdos e as fibras, quando aplicadas. Nesse sentido, o volume total de argamassa de uma mistura (V_{at}) consiste na soma do volume de argamassa necessário para preencher o volume de vazios presente na mistura de componentes sólidos (V_{ap}) e do volume de argamassa que envolve os componentes sólidos para dar a trabalhabilidade desejada (V_{ar}). A

partir disso, os autores introduziram o conceito de espessura da camada de argamassa que recobre os componentes sólidos da mistura (e_{ar}), que consiste na relação entre o V_{ar} sobre a área superficial dos componentes sólidos.

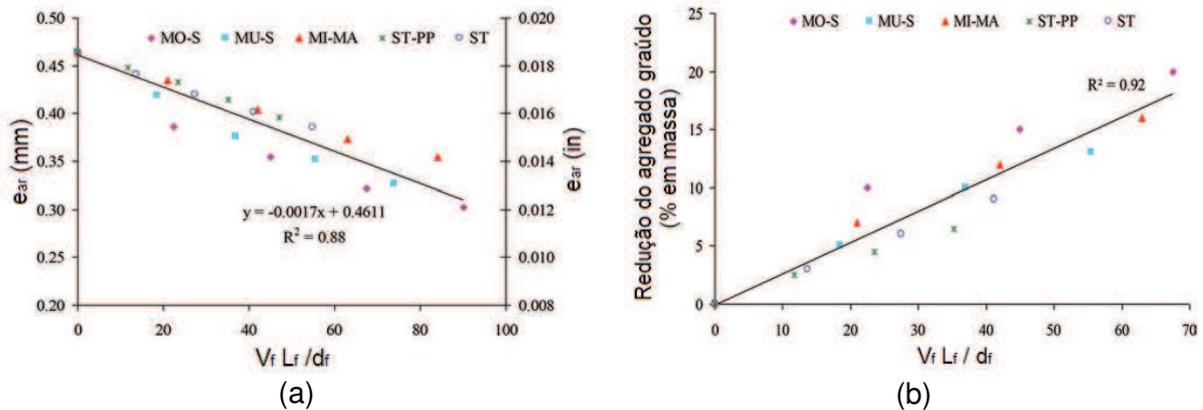
A área superficial é calculada partir das características geométricas de cada componente em relação a uma unidade de massa. A partir do cálculo da área superficial de uma única fibra e da determinação da quantidade de fibras por unidade de massa, é possível calcular a área superficial de fibras por unidade de massa. Utilizando o mesmo conceito, a área superficial dos agregados graúdos pode ser determinada a partir do cálculo da área superficial de cada partícula da composição granulométrica da mistura, adotando-se como diâmetro da partícula a média da abertura entre duas peneiras consecutivas. O resultado final é obtido com base na distribuição granulométrica dos agregados e na relação entre o número de partículas por unidade de massa.

Sendo assim, o procedimento de dosagem consiste em determinar a composição da mistura de CAA-RF de modo a manter a mesma e_{ar} da mistura de CAA. Para isso, deve-se determinar a e_{ar} da mistura de CAA, obtido a partir do e_{ar} e do volume de vazios dos agregados graúdos, que é determinado pelo ensaio de massa unitária, realizado de acordo com os procedimentos da norma ASTM C29 (ASTM, 2012), equivalente ao procedimento da NM 45 (ABNT, 2006). Através do mesmo ensaio, deve-se determinar o volume de vazios da mistura de agregados graúdos com fibras, considerando-se o teor de incorporação desejado. O V_{ap} é determinado de modo a equivaler com o volume de vazios, enquanto que V_{ar} é determinado de modo a manter a mesma espessura da camada de argamassa sobre todos os componentes sólidos, considerando os agregados e as fibras. Sendo assim, com o aumento no teor de incorporação de um determinado tipo de fibra, há uma redução no conteúdo de agregados graúdos, que é compensado com um aumento no volume de areia, mantendo-se fixo o consumo de cimento e a relação água/cimento.

Apresenta-se na Figura 15 (a) a variação da e_{ar} para misturas de CAA com diferentes tipos de fibras poliméricas e metálicas, em teores de incorporação de 0,25%, 0,50% e 0,75%. Através do método proposto foi realizada uma redução no conteúdo de agregados graúdos de modo a manter a e_{ar} constante, conforme apresentado na Figura 15 (b). Assim, a quantidade de agregado reduzida depende

das características da fibra, tais como densidade, teor, comprimento e diâmetro, e das propriedades do agregado, como densidade e distribuição granulométrica.

Figura 15 – Relação entre as propriedades das fibras com (a) e_{ar} pela simples incorporação de fibras e (b) redução no conteúdo de agregados



Fonte: Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014, p. 146).

2.3.3 Considerações sobre os Métodos de Dosagem Apresentados

Ao longo do desenvolvimento tecnológico do concreto, diversos métodos de dosagem foram criados, buscando formas que permitissem aos profissionais determinar a composição de misturas com as propriedades requeridas, de acordo com as práticas adotadas pelo mercado. Como pode ser evidenciado, não apenas os procedimentos envolvidos no processo de dosagem diferem significativamente entre si, como também o resultado final obtido. Apesar de a maioria levar em consideração as características dos materiais empregados, podem ser obtidas misturas com variações em seus componentes, ou ainda em suas propriedades. Além disso, alguns métodos têm como resultado final a composição exata da mistura, enquanto outros resultam em equações que permitem determinar a composição a partir das propriedades desejadas.

O método de dosagem IBRACON para concretos convencionais se enquadra neste contexto e se popularizou no Brasil por permitir determinar a composição da mistura, a partir do diagrama de dosagem, para determinadas propriedades nos estados fresco e endurecido. O método relaciona leis fundamentais de comportamento do concreto, a partir das quais é possível determinar uma composição com determinação resistência à compressão para um mesmo abatimento pelo tronco de cone. Além disso, por ser um método experimental e de

fácil execução, permite que o profissional determine o comportamento ideal do material na prática, garantindo que a composição atenda às suas necessidades.

Por estas vantagens, o método IBRACON foi adotado como base para o desenvolvimento de métodos de dosagem para o CAA no Brasil. O método de Tutikian (2004) consiste em um procedimento experimental que utiliza os mesmos princípios do método original, porém depende da experiência do profissional responsável pela dosagem para que a mistura atinja suas características de autoadensabilidade. Sendo assim, Tutikian (2007) adaptou o método anterior para incluir o empacotamento dos agregados, buscando otimizar a composição da mistura e facilitar o processo de dosagem. Tutikian e Pacheco (2012) desenvolveram um estudo buscando comparar os resultados obtidos na dosagem de CAA com diferentes os métodos de dosagem de Tutikian (2007), Melo (2005) e Su, Hsu e Chai (2001). Os autores verificaram que o método de Tutikian (2007) foi o que apresentou menor custo e maior resistência à compressão, enquanto que o método de Melo (2005) foi o que atingiu maior compacidade e módulo de elasticidade.

Os principais métodos desenvolvidos para CAA-RF baseiam-se no estudo do comportamento reológico da pasta de cimento, cujas propriedades ainda são difíceis de relacionar com o concreto. Apesar de apresentar uma boa relação entre as propriedades reológicas e a inclusão de fibras, o método desenvolvido por Ferrara, Park e Shah (2007) não relaciona a composição da mistura com suas propriedade mecânicas, que podem ser significativamente afetadas. Por outro lado, o método apresentado por Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014), apesar de apresentar uma relação com as propriedades no estado endurecido, não obtiveram resultados satisfatórios no comportamento reológico do concreto e dependem do profissional para realização de ajustes. Sendo assim, verifica-se a necessidade de continuidade dos estudos nessa área, visando contribuir com o desenvolvimento metodológico da dosagem dos CAA-RF.

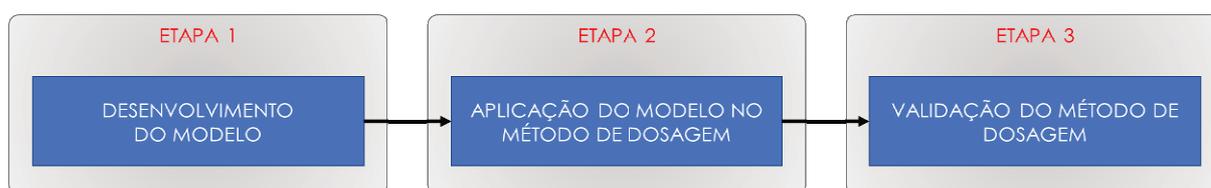
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados ao planejamento experimental da pesquisa, assim como materiais e métodos de ensaio empregados.

3.1 PLANO DE PESQUISA

A pesquisa realizada neste trabalho consistiu no desenvolvimento de um método para dosagem de CAA-RF, elaborado com base em estudos apresentados por outros autores. Para alcance dos objetivos propostos, foram utilizados modelos teóricos e ensaios em laboratório, cujos métodos foram norteados por normas técnicas nacionais e internacionais, somadas a novas propostas de avaliação, quando necessárias. Desta forma, o planejamento experimental foi realizado nas três etapas apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Etapas que compõem o programa experimental deste estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa consistiu no desenvolvimento de um modelo teórico para a incorporação de fibras em uma mistura de CAA, realizada através da caracterização de sua composição. Na segunda etapa, aplicou-se o modelo desenvolvido no método de dosagem, definindo-se os passos e procedimentos realizados, resultando em um diagrama de dosagem para CAA-RF. Por fim, a terceira etapa consistiu na validação do método proposto por meio de sua aplicação com diferentes tipos de fibras metálicas, verificando a influência que suas características geométricas exerceram sobre as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

3.1.1 Etapa 1: Desenvolvimento do Modelo

Neste modelo buscou-se considerar as propriedades do material nos estados fresco e endurecido para que atendam às exigências de aplicabilidade ao menor custo possível. A ideia principal consistiu em incluir as fibras na mistura pela redução

dos agregados graúdos, em função da área superficial dos componentes, compensando com um aumento no volume de argamassa. Buscou-se como resultado final um diagrama de dosagem que permite a variação do teor de fibras para obtenção das propriedades mecânicas requeridas, sem prejudicar suas propriedades no estado fresco. Sendo assim, o modelo de método de dosagem está baseado nos seguintes princípios fundamentais:

- a) o concreto no estado fresco pode ser considerado uma mistura de partículas sólidas suspensas em um líquido viscoso, que pode ser a pasta de cimento ou a argamassa, dependendo da escala de observação;
- b) para determinada mistura de partículas sólidas existe um volume de argamassa necessário para preencher os vazios entre os componentes e outro necessário para garantir as propriedades reológicas desejadas;
- c) a incorporação de fibras prejudica a trabalhabilidade da mistura pelo aumento da área superficial de materiais secos e pelo travamento entre os materiais;
- d) a incorporação de fibras, em teores adequados, melhora as propriedades mecânicas, em especial, a sua tenacidade;
- e) a perda de trabalhabilidade pela inclusão de fibras pode ser reduzida ajustando-se os outros componentes da mistura;
- f) as fibras possuem custo elevado e a sua quantidade deve ser otimizada de acordo com as propriedades mecânicas requeridas.

Fundamentado nestes princípios, estabeleceu-se um modelo para inclusão de fibras em uma mistura de CAA pré-definida. Neste modelo, a partir do estudo da composição da mistura, determinou-se a espessura da camada de argamassa sobre os agregados graúdos, utilizada como parâmetro para inclusão das fibras.

3.1.1.1 Composição da Mistura de CAA

A partir da caracterização dos agregados graúdos é possível determinar a sua massa específica (M_{esp}) e a sua massa unitária (M_{unit}), utilizadas no cálculo do volume de vazios (V_v), conforme a Equação 3.

$$V_v (\%) = \frac{M_{esp} - M_{unit}}{M_{esp}} * 100 \quad (3)$$

O V_v representa o volume de argamassa de preenchimento dos vazios entre os agregados (V_{ap}). O volume de argamassa de recobrimento dos agregados (V_{ar}) representa o volume necessário para dar a trabalhabilidade desejada ao material. Para uma mistura conhecida, esse valor pode ser obtido pela diferença entre o volume de argamassa total (V_{at}) e o V_{ap} , conforme a Equação 4.

$$V_{ar} = V_{at} - V_{ap} \quad (4)$$

A área superficial dos agregados graúdos (A_b) pode ser calculada de forma aproximada considerando-se cada partícula como uma esfera, cujo diâmetro e massa são calculados pela média da abertura da malha entre duas peneiras consecutivas e pela contagem do número de partículas correspondentes àquela massa de material, respectivamente. A partir disso é possível estabelecer relações entre a área superficial de cada partícula e um determinado valor de massa dos materiais, utilizado, por fim, na determinação do valor final pela porcentagem correspondente na composição granulométrica, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Exemplo do procedimento de cálculo da área superficial aproximada

Abertura peneira (mm)	Diâmetro médio (m)	Massa retida (kg)	Quantidade (unid.)	Área superficial		
				(m ² /unid.)	(m ² /kg)	(m ² /m ³)
12,5	-	-	-	-	-	-
9,5	0,011	0,0249	19	0,00038	0,29006	837,54
6,3	0,008	0,0179	29	0,00020	0,31442	
4,8	0,006	0,0116	37	0,00010	0,29950	
2,4	0,004	0,0049	38	0,00004	0,30936	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, determina-se a espessura da camada de argamassa de recobrimento dos agregados graúdos (e_{ar}) pela relação entre o V_{ar} e a A_b , conforme apresentado na Equação 5.

$$e_{ar} = \frac{V_{ar}}{A_b} \quad (5)$$

3.1.1.2 Inclusão das Fibras

A inclusão das fibras na mistura é realizada com base no método apresentado por Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014), que reduz o volume de agregado graúdo da mistura em função da área superficial dos componentes, de modo a manter uma e_{ar} constante. Em seu trabalho, os autores mantêm constante o consumo de cimento e de água na mistura para todos os teores de fibras testados, compensando a redução do volume de agregados graúdos com um aumento no volume de areia. Como pode ser constatado nos resultados obtidos pelos autores, o aumento do consumo de areia ocasionou a perda de trabalhabilidade no material, principalmente devido a elevada área superficial deste componente.

Neste trabalho, propõe-se a compensação da redução do volume de agregado graúdo com o aumento proporcional de todos os componentes da argamassa, acarretando em um aumento no volume de pasta para evitar a redução da trabalhabilidade e das propriedades mecânicas.

Para isso, deve-se inicialmente realizar a determinação do V_v com base no método de ensaio para determinação da massa unitária para a mistura de agregados com o teor de fibras desejado. Este V_v representa o V_{ap} , a partir do qual será estabelecido o V_{ar} , necessário para manter a mesma e_{ar} sobre os agregados graúdos e as fibras. Para tanto, deve-se determinar a área superficial de fibras (A_f) utilizadas, com base em suas características geométricas.

Para cada teor de fibra, após a caracterização da mistura de agregados graúdos e fibras, deve-se determinar o V_{ar} para misturas com o mesmo valor de e_{ar} , conforme a Equação 6. Este valor será utilizado na determinação dos outros componentes do traço, ocasionando a redução dos agregados graúdos.

$$e_{ar} = \frac{V_{ar}}{A_b + A_f} \quad (6)$$

3.1.2 Etapa 2: Aplicação do Modelo no Método de Dosagem

A partir do modelo desenvolvido na etapa 1 foi estabelecido o procedimento de dosagem apresentado na Figura 17, que é dividido em três partes: estudo preliminar, estudo de otimização e estudo de caracterização.

Figura 17 – Organograma do modelo de método de dosagem proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Estudo preliminar**

O estudo preliminar consiste na determinação das propriedades do conjunto de materiais que compõem a mistura referência. Com base na definição dos requisitos necessários para aplicação, deve-se realizar a seleção e caracterização dos materiais de acordo com a disponibilidade local e características que facilitem a aplicação, conforme descrito no item 2.1. A partir destes materiais, com exceção das

fibras, deve-se realizar a dosagem de uma mistura de CAA convencional. A mistura obtida é caracterizada quanto à sua composição, cujos parâmetros serão utilizados para incorporação das fibras.

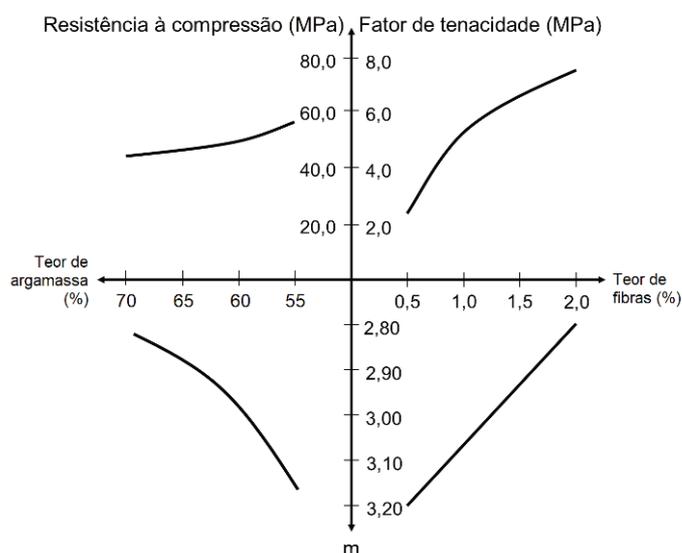
- **Estudo de otimização**

No estudo de otimização realiza-se a inclusão das fibras na mistura, em substituição ao agregado graúdo, considerando-se a área superficial dos componentes em, no mínimo, três teores. Estes teores devem ser selecionados de acordo com a experiência do profissional e dados apresentados na bibliografia para os requisitos de aplicação. Os traços obtidos devem ser misturados experimentalmente para verificação das propriedades no estado fresco e moldagem de corpos de prova para verificação de suas propriedades no estado endurecido.

- **Estudo de caracterização**

O estudo de caracterização consiste em otimizar a dosagem de fibras pela aplicação de um método que defina o consumo mínimo de fibras necessário para atender ao desempenho requerido, garantindo a viabilidade econômica. Sendo assim, propõe-se neste trabalho uma adaptação do diagrama de dosagem do método IBRACON para sua aplicação ao CAA-RF. A Figura 18 ilustra um exemplo hipotético do diagrama de dosagem que tem como princípio fundamental a variação do teor de fibras para obtenção de diferentes valores de fator de tenacidade.

Figura 18 – Diagrama de dosagem para os componentes da mistura



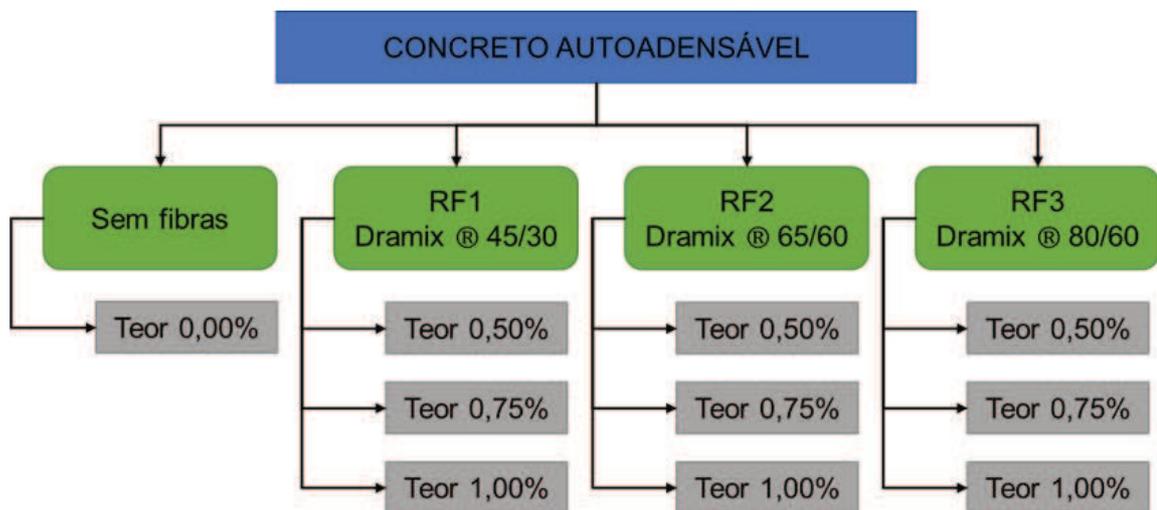
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinação do traço desejado, o diagrama deve ser utilizado a partir do eixo do fator de tenacidade em sentido horário, determinando-se o teor de fibras, a quantidade total de agregados e consumo de cimento. A partir das relações propostas é possível calcular a quantidade unitária de cada material que irá compor o traço com as propriedades mecânicas desejadas, mantendo a mesma trabalhabilidade. Recomenda-se que o traço definido seja executado novamente para confirmar se atende às propriedades especificadas no estado fresco e endurecido.

3.1.3 Etapa 3: Validação do Método de Dosagem

Para verificação do modelo de método de dosagem proposto nesta dissertação, assim como para caracterização dos concretos produzidos, realizou-se a sua aplicação empregando-se os materiais e métodos de avaliação descritos nos itens a seguir. De modo a avaliar a eficiência do método quando aplicado aos diferentes tipos de fibra, realizou-se a dosagem de CAA reforçados com fibras de aço com diferentes características geométricas, em três teores de incorporação, conforme representado na Figura 19.

Figura 19 – Esquema das variáveis avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3.1 Variáveis da Pesquisa

O programa experimental deste estudo apresenta variáveis de resposta obtidos a partir da definição dos fatores de controle com nível fixo e variável, além de fatores não controlados.

Os fatores de controle de nível variável são:

- a) tipo de fibra: Dramix ® 45/30, Dramix ® 65/60 e Dramix ® 80/60;
- b) teor de incorporação: 0,00%, 0,50%, 0,75% e 1,00% do volume total.

Os fatores de controle de nível fixo são:

- a) tipo de cimento: cimento CPV-ARI;
- b) tipo de aditivo químico: aditivo superplastificante à base de policarboxilato;
- c) tipo de agregado graúdo: brita basáltica com diâmetro máximo de 12,5 mm;
- d) dois tipos de agregados miúdos: areia fina e areia média.

Os fatores não controlados são:

- a) condições ambientais no dia da moldagem;
- b) condições ambientais no dia dos ensaios.

As variáveis de resposta são:

- a) espalhamento;
- b) tempo de escoamento no ensaio de espalhamento;
- c) tempo de escoamento no funil V;
- d) índice de estabilidade visual;
- e) índice de dispersão das fibras;
- f) resistência à compressão axial;
- g) módulo de elasticidade;
- h) resistência à tração na flexão;
- i) fator de tenacidade.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir são apresentados os materiais empregados na aplicação do método de dosagem proposto, bem como, sua caracterização e propriedades. Cabe salientar que a escolha destes levou em consideração a sua disponibilidade e aplicabilidade regional, principalmente em relação às fibras.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) produzido pela Cimentos Itambé. O material foi caracterizado quanto a sua composição química, na forma de óxidos estáveis, pelo ensaio de fluorescência de raios X e quanto a sua composição granulométrica pelo método da granulometria a laser, utilizando álcool isopropílico como fluido e o equipamento da marca Microtrac, modelo S3500. Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMAT) da Unisinos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 – Composição química do cimento

Composto	Quantidade (%)
CaO	53,546
SiO ₂	16,173
MgO	2,978
Al ₂ O ₃	2,954
Fe ₂ O ₃	2,655
SO ₃	2,611
K ₂ O	0,701
TiO ₂	0,274
SrO	0,226
P ₂ O ₅	0,119

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Composição granulométrica do cimento

Característica	Diâmetro (µm)
< 10%	7,87
< 50%	15,02
< 95%	30,74
Médio	15,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Agregado Miúdo

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, ambos naturais e de origem quartzosa, porém com diferentes composições granulométricas, denominados areia fina e areia média. A areia fina compõe os finos da mistura, que tem como função garantir a sua estabilidade e evitar a ocorrência de segregação.

A areia média origina-se de uma extração do rio Jacuí, na cidade de Bento Gonçalves, enquanto que a areia fina se origina da cidade de Montenegro, ambos no Rio Grande do Sul. Para caracterização física dos materiais, foram realizados os ensaios de massa específica, absorção de água, massa unitária e composição granulométrica, de acordo com as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009a), NBR NM 30 (ABNT, 2001), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 – Caracterização física dos agregados miúdos

Caracterização	Areia fina	Areia média
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,61
Massa específica - Agregado seco (g/cm ³)	2,58	2,56
Massa específica – Saturado/superfície seca (g/cm ³)	2,59	2,58
Absorção de água (%)	0,6	0,8
Massa unitária (g/cm ³)	1,4	1,4
Módulo de finura	1,10	1,76
Diâmetro máximo (mm)	0,6	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Composição granulométrica dos agregados miúdos

Abertura da peneira (mm)	Areia fina		Areia média	
	Retido (%)	Acumulado (%)	Retido (%)	Acumulado (%)
4,8	0	0	0	0
2,4	0	0	0	0
1,2	0	0	1	1
0,6	0	0	7	8
0,3	16	16	63	71
0,15	78	94	25	96
Fundo (<0,15)	6	100	4	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados são britados de origem basáltica e provenientes da cidade de Bento Gonçalves. Para a caracterização física dos

agregados graúdos foram realizados os ensaios de massa específica, absorção de água, massa unitária e composição granulométrica, de acordo com as prescrições das normas NBR NM 53 (ABNT, 2009b), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Caracterização física do agregado graúdo

Caracterização	Agregado graúdo
Massa específica (g/cm ³)	2,47
Massa específica - Agregado seco (g/cm ³)	2,70
Massa específica – Saturado/superfície seca (g/cm ³)	2,56
Absorção de água (%)	3,50
Massa unitária (g/cm ³)	1,30
Módulo de finura	5,99
Diâmetro máximo (mm)	9,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	Agregado graúdo	
	Retido (%)	Acumulado (%)
9,5	5	5
6,3	74	79
4,8	20	99
2,4	1	100
1,2	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo (<0,15)	0	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Fibras

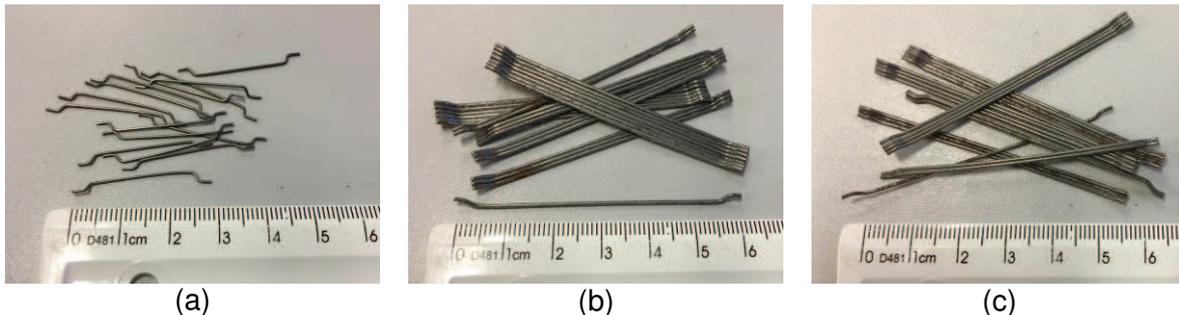
Foram utilizados três tipos de fibras metálicas, com diferentes características geométricas, produzidas a partir de fios de aço trefilados, tendo como matéria-prima o fio máquina da ArcelorMittal, com resistência à tração mínima de 1100 N/mm². As fibras são fornecidas em pentes coladas entre si com cola hidrossolúvel dentro de sacos de 20 kg. As características geométricas das fibras são apresentadas na Tabela 11, sendo identificadas como RF1, RF2 e RF3, enquanto que a Figura 20 apresenta o registro fotográfico de cada uma delas. Estas fibras foram escolhidas de modo a avaliar a influência do comprimento e do fator de forma deste componente.

Tabela 11 – Características geométricas das fibras

Fibra	Nome comercial	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Fator de forma	Massa unitária (fibras/kg)
RF1	DRAMIX® RL 45/30 BN	30	0,62	48	13.000
RF2	DRAMIX® RC 65/60 BN	60	0,90	67	3.200
RF3	DRAMIX® RC 80/60 BN	60	0,75	80	4.600

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Registro fotográfico das fibras (a) RF1, (b) RF2 e (c) RF3



Fonte: Registrado pelo autor.

3.2.5 Aditivo Químico

O aditivo superplastificante utilizado neste estudo foi o Tec-Flow 8000 da GCP Applied Technologies, à base de policarboxilatos, que atende ao tipo Tipo SP II/N/A/R da NBR 11768 (ABNT, 2011). O aditivo apresenta aspecto líquido e cor alaranjada e sua massa específica varia entre $1,080 \text{ g/cm}^3$ e $1,120 \text{ g/cm}^3$. O fabricante recomenda que a sua dosagem, em relação à massa de cimento, seja de 0,3% a 2,0%.

3.3 PROCEDIMENTOS DE MISTURA, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

A mistura experimental dos traços definidos foi realizada em uma betoneira de eixo vertical com capacidade de 150 L, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos. De modo a tornar comparativo os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco, padronizou-se o protocolo de mistura definido a seguir:

- 1) inicialmente, 100% do agregado graúdo foi misturado com 30% da água, por aproximadamente um minuto;

- 2) posteriormente, 100% do cimento foi adicionado com mais 30% da água e misturados por mais um minuto;
- 3) a areia fina, a areia média e o restante da água foram adicionados na betoneira em sequência e misturados por mais um minuto;
- 4) o aditivo superplastificante foi adicionado de modo contínuo durante 30 segundos e o concreto foi misturado por mais 30 segundos;
- 5) por fim, quando aplicável, as fibras metálicas foram adicionadas em pequenas porções em um tempo equivalente a um minuto. Após a inclusão de 100% das fibras, os materiais foram misturados por mais três minutos, de modo a se obter uma mistura homogênea.

Ao término da mistura, que teve duração aproximada de 8 minutos, procedeu-se a realização dos ensaios no estado fresco e, posteriormente, a moldagem dos corpos de prova utilizados na determinação das propriedades mecânicas dos traços estudados. Devido à quantidade de material necessária para estes ensaios, foram realizadas duas betonadas de cada mistura, seguindo a ordem de ensaios apresentada na Tabela 12, executadas sequencialmente. A Tabela 13 apresenta as condições ambientais na data de mistura de cada traço estudado, assim como o tempo total de cada betonada, desde a colocação do primeiro material na betoneira até o término da moldagem dos corpos de prova.

Tabela 12 – Sequência de realização dos ensaios no estado fresco

Betonada 1	Betonada 2
Espalhamento	Espalhamento
t500	t500
Índice de estabilidade visual	Índice de estabilidade visual
Funil V	Funil V
	Índice de dispersão das fibras

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Condições ambientais nos dias de mistura

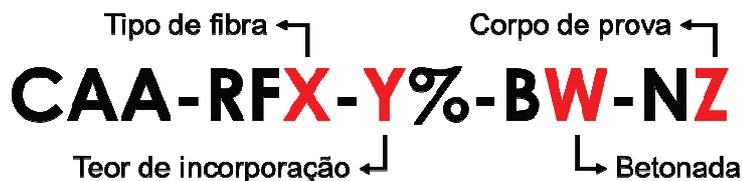
Traço	Betonada	Data	Temperatura	Umidade relativa	Tempo total
CAA	B1	03/10/2017	20,1°C	78,0%	23 min
	B2	03/10/2017	20,3°C	74,0%	23 min
CAA-RF1 0,50%	B1	06/12/2017	28,2°C	76,0%	19 min
	B2	06/12/2017	28,3°C	75,0%	18 min
CAA-RF1 0,75%	B1	19/12/2017	25,8°C	90,0%	22 min
	B2	19/12/2017	26,7°C	87,0%	24 min
CAA-RF1 1,00%	B1	04/01/2018	25,0°C	65,0%	37 min
	B2	04/01/2018	25,9°C	72,0%	30 min
CAA-RF2 0,50%	B1	11/01/2018	29,5°C	65,0%	30 min
	B2	11/01/2018	30,1°C	61,0%	30 min
CAA-RF2 0,75%	B1	17/01/2018	28,7°C	68,0%	30 min
	B2	17/01/2018	29,2°C	74,0%	30 min
CAA-RF2 1,00%	B1	25/01/2018	23,8°C	80,0%	25 min
	B2	25/01/2018	24,6°C	79,0%	31 min
CAA-RF3 0,50%	B1	25/01/2018	24,4°C	78,0%	32 min
	B2	25/01/2018	25,0°C	74,0%	27 min
CAA-RF3 0,75%	B1	01/02/2018	21,8°C	67,0%	34 min
	B2	01/02/2018	22,5°C	72,0%	28 min
CAA-RF3 1,00%	B1	06/02/2018	27,9°C	55,0%	27 min
	B2	06/02/2018	28,1°C	59,0%	30 min

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada betonada, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm e dois corpos de prova prismáticos com seção transversal de 15x15 cm e comprimento de 50 cm. Foram utilizadas fôrmas metálicas com aplicação de desmoldante em suas faces para facilitar o procedimento de desforma. A moldagem foi realizada sem qualquer tipo de adensamento, sendo executada em duas camadas para os corpos de prova cilíndricos e pela aplicação em três pontos nos corpos de prova prismáticos.

A Figura 21 apresenta o sistema adotado para nomenclatura dos corpos de prova neste trabalho, através do qual é possível identificar o tipo e teor de fibras empregados, assim como a betonada e o número do corpo de prova. A mistura de CAA sem incorporação de fibras foi identificada como “CAA-REF”. Todos os corpos de prova foram armazenados por 24 horas, quando foram removidos de suas fôrmas e condicionados em uma sala de cura úmida com temperatura controlada até os 28 dias de idade, conforme previsto pela NBR 5738 (ABNT, 2015), quando foram realizados os ensaios previstos.

Figura 21 – Sistema adotado para nomenclatura dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO

Para avaliação das misturas produzidas foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido, conforme os procedimentos descritos a seguir.

3.4.1 Ensaios no Estado Fresco

Os ensaios no estado fresco compreenderam a determinação do espalhamento e do tempo de escoamento, além dos índices de estabilidade visual e de dispersão das fibras, pelo ensaio de espalhamento e da viscosidade plástica pelo ensaio com o funil V.

3.4.1.1 Espalhamento e Tempo de Escoamento da Mistura de Concreto

O ensaio de espalhamento é normatizado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017b) e consiste na determinação do espalhamento e do tempo de escoamento de uma mistura de concreto após a moldagem e desmoldagem do cone de Abrams. O espalhamento foi obtido pela média de duas medições perpendiculares do diâmetro do círculo formado pelo concreto após o término do seu escoamento. O tempo de escoamento consistiu na mensuração do tempo que o círculo formado pela mistura atingiu a marcação circular de diâmetro 500 mm na placa base, a partir do início da desmoldagem do cone de Abrams.

3.4.1.2 Índice de Estabilidade Visual (IEV) e Índice de Dispersão das Fibras (IDF)

Por meio do espalhamento descrito no item anterior foi possível caracterizar a consistência da mistura e verificar a ocorrência de segregação ou exsudação, evidenciadas pela formação de uma pilha central de agregado graúdo ou por uma

auréola de argamassa nas extremidades, respectivamente. Para determinação do IEV de cada mistura, que varia de 0 a 3, foram adotados os critérios estabelecidos pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017), conforme os parâmetros apresentados na Tabela 14.

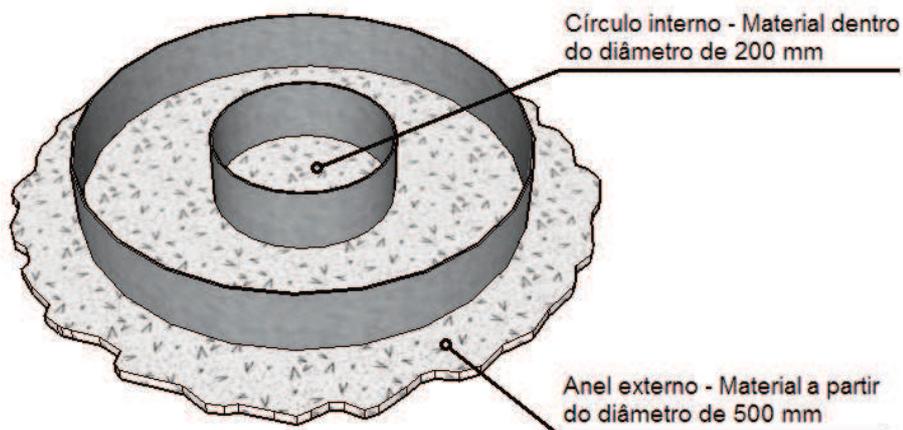
Tabela 14 – Classificação do Índice de Estabilidade Visual

IEV	Critério
0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação observada pelo brilho na superfície da massa de concreto
2 (Instável)	Uma pequena auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro da massa de concreto
3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro da massa de concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades

Fonte: NBR 13823-2 (ABNT, 2017).

Devido ao seu caráter subjetivo e à possibilidade de erros pela falta de experiência na aplicação deste método ao CAA-RF, decidiu-se realizar a determinação do IDF. Proposto por Ferrara, Park e Shah (2007), este índice permite avaliar a dispersão de fibras ao longo do círculo formado pelo espalhamento do concreto. O método consiste em relacionar a massa de fibras encontradas no anel formado após a marcação de 500 mm do espalhamento com a massa de fibras encontradas no círculo interno, de diâmetro 200 mm, conforme exemplificado na Figura 22.

Figura 22 – Exemplificação do esquema de verificação do índice de segregação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para tanto, foram confeccionados anéis com uma chapa metálica utilizados para separar o material de cada parte, conforme apresentado na Figura 23. O material coletado em cada parte foi pesado e posteriormente lavado em uma peneira. Com o auxílio de um componente magnético, as fibras metálicas foram separadas e a sua massa foi determinada. Por fim, a massa de fibras coletadas na parte externa (M_{FE}) e na parte interna (M_{FI}) foi relacionada com a massa de concreto coletada na parte externa (M_{CE}) e na parte interna (M_{CI}) por meio da Equação 7.

$$IDF = \frac{M_{FE}}{M_{CE}} - \frac{M_{FI}}{M_{CI}} \quad (7)$$

Figura 23 – Execução do ensaio de determinação do IDF



Fonte: Registrada pelo autor.

3.4.1.3 Viscosidade Plástica pelo Funil-V

O ensaio foi realizado conforme o procedimento prescrito pela Parte 5 da NBR 15823 (ABNT, 2017c), que consiste na verificação do tempo que uma amostra de concreto leva para escoar através do funil V. Neste ensaio, o funil com altura de 60 cm, largura de 51,5 cm e espessura de 7,5 cm, é preenchido com uma amostra de concreto. Após 30 segundos do final do preenchimento, a comporta inferior é aberta, permitindo que o concreto escoe pelo orifício. O tempo de escoamento é mensurado com um cronômetro e representa a viscosidade plástica da mistura.

3.4.2 Ensaio no Estado Endurecido

Os ensaios no estado endurecido compreendem a determinação da resistência à compressão axial, do módulo de elasticidade, do fator de tenacidade e da resistência à flexão equivalente.

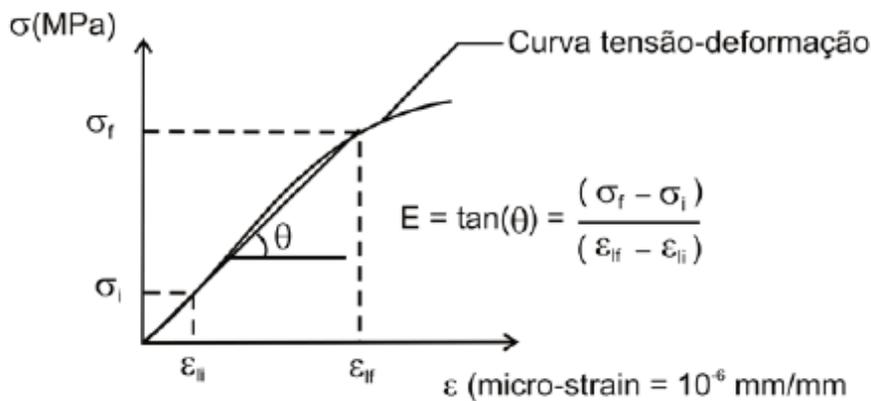
3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007a) no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Unisinos – itt Performance, utilizando-se uma prensa servo-hidráulica da marca Emic, modelo EMIC AC6.08, com capacidade de carga de 2000 kN. Para este ensaio foram moldados dois corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm para cada traço avaliado, os quais tiveram as superfícies que entraram em contato com os pratos da prensa hidráulica retificadas. Os corpos de prova tiveram as suas dimensões verificadas com um paquímetro para a determinação da tensão de ruptura, resultante de uma taxa de carregamento de 0,45 MPa/s, conforme parâmetros normativos.

3.4.2.2 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado com base nos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial, conforme o procedimento descrito pela NBR 8522 (ABNT, 2017g). O procedimento consistiu na determinação do coeficiente angular da reta que une os pontos referentes a 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura, no diagrama tensão-deformação, obtido a partir da aplicação de carga em dois corpos de prova cilíndricos com as mesmas dimensões e processo de retificação empregados nos corpos de prova utilizados para determinação da resistência à compressão axial. A Figura 24 apresenta um esquema exemplificado do procedimento de cálculo do módulo de elasticidade do concreto.

Figura 24 – Esquema do cálculo do módulo de elasticidade



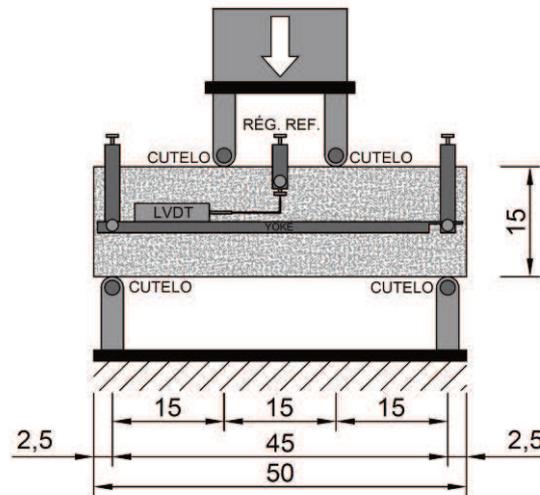
Fonte: ABNT (2017g, p. 2).

Cada corpo de prova foi carregado com 30% da tensão de ruptura pelo período de 60 segundos e, posteriormente, descarregado até próximo de zero, sem perder o contato entre o corpo de prova e os pratos da prensa. Posteriormente, o corpo de prova foi carregado até 0,5 MPa pelo período de 60 segundos, depois carregado até 30% da tensão de ruptura pelo período de 60 segundos e descarregado até aproximadamente zero, como anteriormente. Todo o procedimento foi repetido duas vezes, sendo registrado na segunda repetição os valores de tensão e deformação nos patamares de pausa, em no máximo 30 segundos, depois de passados os 60 segundos de pausa. Após isto, o corpo de prova foi levado à ruptura, cujo resultado não pode diferir mais do que 20% do obtido no ensaio de resistência à compressão axial para validação do resultado, conforme parâmetros normativos.

3.4.2.3 Resistência à Tração na Flexão e Fator de Tenacidade

A resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade foram determinados pelo carregamento de uma amostra prismática em quatro pontos, seguindo as prescrições da JSCE SF4 (JSCE, 1984). Os corpos de prova prismáticos com seção transversal de 15x15 cm e comprimento de 50 cm foram apoiados sobre dois cutelos posicionados a 2,5 cm de cada face, resultando em um vão teórico de 45 cm, e carregados em dois pontos na parte superior, distantes 15 cm entre si e de cada apoio, conforme o esquema da Figura 26 (a). No centro do vão teórico, próximo ao plano da linha neutra, os corpos de prova foram instrumentados com um deflectômetro para medição dos deslocamentos.

Figura 25 – Esquema exemplificando o procedimento de ensaio de flexão



Fonte: Elaborada pelo autor.

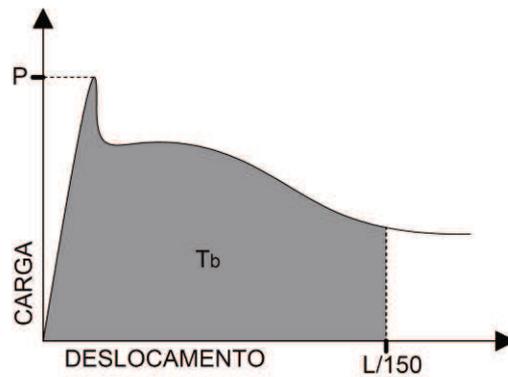
O carregamento do corpo de prova foi realizado por deslocamento prescrito, sendo a velocidade de aplicação de carga determinada em função do vão teórico (L_v). O resultado da divisão do L_v por 1500 representa a carga que deve ser aplicada por minuto. Neste caso, com um vão teórico de 45 cm, a velocidade de aplicação de carga foi 0,3 mm/min. A resistência à tração do material (σ_v) foi determinada a partir da relação entre o L_v e a carga de ruptura (P), considerando a largura (b_v) e a altura (h_v) do corpo de prova, de acordo com a Equação 8.

$$\sigma_b = \frac{P \cdot L_v}{b_v \cdot h_v^2} \quad (8)$$

De acordo com parâmetros normativos, o fator de tenacidade (FT) é determinado de acordo com a Equação 9, que leva consideração a área sob a curva tensão-deslocamento (T_b) até um deslocamento prescrito (δT_b), conforme exemplificado na Figura 26. A área foi obtida pelo método dos trapézios com base nos resultados de medições obtidos. O δT_b é resultado da divisão do L_v por 150 e, neste caso, 3 mm.

$$FT = \frac{T_b}{\delta T_b} \cdot \frac{L_v}{b_v \cdot h_v^2} \quad (9)$$

Figura 26 – Determinação da área sob a curva tensão-deslocamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS

Os resultados obtidos na realização dos ensaios em laboratório foram tratados e analisados estatisticamente por meio de uma Análise de Variância (ANOVA), de modo a verificar quais fatores exercem efeito significativo sobre as variáveis de resposta. O processo de análise consiste na comparação das médias entre as amostras e a verificação de hipóteses, nula e alternativa, para determinação da região crítica. Os cálculos associados à análise de variância são apresentados em uma tabela, onde o valor resultante do teste é comparado com uma tabela de valores - F de *Snedecor* - que indica o valor máximo para a hipótese ser verdadeira, a um determinado nível de confiança e de acordo com os graus de liberdade. O *software* utilizado para realização das análises foi o *Statistica*, da *StatSoft*, com um nível α de confiança de 95% entre os efeitos dos fatores de controle sobre as propriedades dos concretos produzidos nos estados fresco e endurecido. Os fatores de controle envolvidos nas análises foram o tipo de fibra e o seu teor incorporado às misturas.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo contempla a apresentação e a análise dos resultados obtidos na definição da composição das misturas dosadas com o método proposto neste trabalho, assim como nos ensaios realizados nos estados fresco e endurecido para concepção dos diagramas de dosagem.

4.1 DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

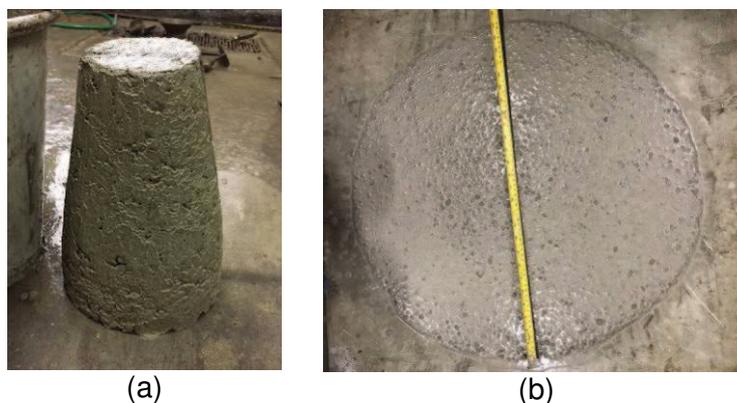
A definição da composição das misturas seguiu o modelo de dosagem proposto nesta dissertação, a partir da dosagem e da caracterização de uma mistura de CAA. Nos itens a seguir foram apresentados os resultados obtidos em cada uma destas etapas e a caracterização final das misturas.

4.1.1 Dosagem da Mistura de CAA

A partir dos materiais caracterizados no capítulo anterior, procedeu-se a dosagem de uma mistura de CAA com base no método de dosagem de Tutikian (2004). A dosagem foi realizada apenas com um traço intermediário, considerando-se a massa total de agregados (m) quatro vezes maior que a do cimento, buscando valores intermediário de resistência à compressão. A partir disso, procedeu-se com a determinação do teor de argamassa seco (α) ideal, determinado experimentalmente pelo aumento da quantidade de cimento e areia até a obtenção do acabamento desejado. Posteriormente, foi realizada a adição de aditivo superplastificante para obtenção do espalhamento desejado, adicionando-se areia fina em substituição ao total de agregado miúdo para controlar a ocorrência de segregação da mistura.

O teor de argamassa definido para os materiais empregados foi de 56%, conforme apresentado na Figura 27 (a). A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,45. O teor de substituição de areia por areia fina foi de 40% e o teor de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento foi de 0,60%. Sendo assim, o traço unitário final da mistura de CAA foi de 1: 0,72: 1,08: 2,20: 0,45 (cimento: areia fina: areia média: brita: água). A Figura 27 (b) apresenta o aspecto final da mistura após o ensaio de espalhamento, enquanto que a Tabela 15 apresenta as propriedades da mistura em ensaios realizados nos estados fresco e endurecido.

Figura 27 – Dosagem da mistura de CAA: (a) amostra utilizada na determinação do teor ideal de argamassa; e (b) espalhamento final da mistura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Propriedades da mistura de CAA

Propriedade	Resultado		
	B1	B2	Média
Espalhamento (mm)	750	760	755
t_{500} (s)	0,81	0,93	0,87
IEV	0	0	0
Funil V (s)	3,22	3,35	3,29
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	2.250	2.250	2.250
Resistência à compressão (MPa)	45,0	48,8	46,9
Módulo de elasticidade (GPa)	29,2	29,3	29,3
Resistência à tração na flexão (MPa)	5,34	5,05	5,20

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que o material atende às classes SF2, VS1, IEV3 e VF1 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) no estado fresco e tem potencial de atender a classe C40 no estado endurecido, consideradas adequadas para a maioria das aplicações correntes. Sendo assim, adotou-se este traço de CAA como base para a dosagem das misturas de CAA-RF.

4.1.2 Caracterização da Mistura de CAA

A caracterização da mistura de CAA tem como objetivo principal determinar a espessura da argamassa de recobrimento (e_{ar}) sobre os agregados graúdos. Sendo assim, realizou-se a determinação do volume que cada componente ocupa na mistura com base em sua massa específica, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Traço em massa e em volume da mistura de CAA

Traço	Componente				
	Cimento	Areia fina	Areia média	Brita	Água
Massa (kg/m ³)	439,37	316,34	474,52	966,61	197,72
Volume (m ³ /m ³)	0,142	0,121	0,182	0,358	0,198

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se que o volume total de argamassa é obtido pela soma dos volumes de cimento, areia fina, areia média e água, o volume de argamassa total (V_{at}) do traço é de 0,642 m³/m³. A parcela deste volume que é responsável por preencher os vazios entre os agregados graúdos é determinada com base no volume de vazios dos agregados (V_v), que leva em consideração a massa específica e a massa unitária do agregado graúdo. Para os agregados empregados neste estudo o V_v obtido foi de 50,8%, sendo o volume de argamassa de preenchimento (V_{ap}) 0,508 m³/m³. A outra parcela da diferença entre o V_{at} e o V_{ap} representa o volume de argamassa de recobrimento (V_{ar}) e, portanto, 0,134 m³/m³.

A próxima etapa consistiu na determinação da área superficial aproximada dos agregados graúdos (A_b), realizada de acordo com a Tabela 17, considerando os dados obtidos no ensaio de distribuição granulométrica e a contagem dos componentes por unidade de massa.

Tabela 17 – Cálculo da área superficial aproximada dos agregados graúdos

Abertura peneira (mm)	Diâmetro médio (m)	Massa retida (kg)	Quantidade (unid.)	Área superficial		
				(m ² /unid.)	(m ² /kg)	(m ² /m ³)
12,5	-	-	-	-	-	-
9,5	0,011	0,0249	19	0,00038	0,29006	837,54
6,3	0,008	0,0179	29	0,00020	0,31442	
4,8	0,006	0,0116	37	0,00010	0,29950	
2,4	0,004	0,0049	38	0,00004	0,30936	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo da A_b resultou em 837,54 m²/m³, valor similar ao encontrado por Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) na determinação desta propriedade com agregados de composição granulométrica similar. A e_{ar} é obtida pela relação entre o V_{ar} e a A_b , e, para este traço, foi de 0,447 mm.

4.1.3 Inclusão das Fibras

A inclusão das fibras da mistura de CAA pelo método proposto teve como objetivo principal manter a mesma e_{ar} sobre os agregados graúdos e sobre as fibras. Sendo assim, deve-se, primeiramente, determinar o volume de vazios das misturas de agregados graúdos com os diferentes tipos e teores de fibras empregados. A partir da mistura experimental destes dois componentes foi possível determinar a massa específica equivalente da mistura, assim como a sua massa unitária, ambas utilizadas na determinação do V_v , conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Determinação do volume de vazios das misturas

Traço	Massa específica					Massa unitária			Volume de vazios (%)
	Brita		Fibra		Mistura	Massa	Volume	Massa	
	Teor (%)	M_{esp} (kg/m ³)	Teor (%)	M_{esp} (kg/m ³)	M_{esp} (kg/m ³)	mistura (kg)	recipiente (dm ³)	Unitária (kg/m ³)	
CAA-REF	100,00%	2700	0,00%	7850	2700,00	13546,7	10200	1328,1	50,8
RF1-0,50	97,13%	2700	2,87%	7850	2847,83	14026,7	10200	1375,2	51,7
RF1-0,75	95,76%	2700	4,24%	7850	2918,61	13920,0	10200	1364,7	53,2
RF1-1,00	94,42%	2700	5,58%	7850	2987,41	13750,0	10200	1348,0	54,9
RF2-0,50	97,13%	2700	2,87%	7850	2847,83	13580,0	10200	1331,4	53,2
RF2-0,75	95,76%	2700	4,24%	7850	2918,61	13350,0	10200	1308,8	55,2
RF2-1,00	94,42%	2700	5,58%	7850	2987,41	12993,3	10200	1273,9	57,4
RF3-0,50	97,13%	2700	2,87%	7850	2847,83	12793,3	10200	1254,2	56,0
RF3-0,75	95,76%	2700	4,24%	7850	2918,61	12393,3	10200	1215,0	58,4
RF3-1,00	94,42%	2700	5,58%	7850	2987,41	12146,7	10200	1190,8	60,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que a incorporação de fibras ocasionou um aumento na massa específica equivalente das misturas, decorrente da elevada massa específica do aço (7850 kg/m³). No ensaio de massa unitária, constata-se que as misturas com fibras RF2 e RF3 apresentaram massa menor do que do que a mistura com fibras RF1, porém, independentemente do tipo de fibra, o aumento no teor de fibras ocasionou a redução da massa unitária. De modo geral, todas as misturas com fibras tiveram um aumento no volume de vazios, que aumentou com o teor de fibras incorporado e com as suas características geométricas, onde fibras mais compridas e com maior fator de forma impactam em um maior volume de vazios. Isso está relacionado à perturbação no empacotamento dos grãos ocasionada pela presença de fibras na mistura, conduzindo a um maior volume de vazios.

A próxima etapa constituiu na determinação da área superficial das fibras (A_f), realizada com base em suas características geométricas e na relação entre a quantidade de fibras e a sua massa, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Cálculo da área superficial aproximada das fibras

Tipo de fibra	Peso unitário (*) (unidade/kg)	Área superficial		
		(m ² / unidade)	(m ² /kg)	(m ² /m ³)
RF1	13576,86	0,000064	0,862538	6770,92
RF2	3225,25	0,000175	0,565497	4439,15
RF3	4742,66	0,000142	0,674668	5296,15

(*) Média aritmética de três medições

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que os valores encontrados para a quantidade de fibras por unidade de massa diferem dos valores informados no catálogo do fabricante, apesar de apresentarem uma proporção similar entre eles. Sendo assim, os valores apresentados na Tabela 19 se referem à média de três medições realizadas em laboratório, as quais foram adotadas neste trabalho. O resultado final do cálculo da A_f para as fibras RF1, RF2 e RF3 foi 6770,92 m²/m³, 4439,15 m²/m³ e 5296,15 m²/m³, respectivamente.

Com base nestes resultados e nos de caracterização da mistura de CAA, procedeu-se com o cálculo dos traços das misturas reforçadas com os diferentes tipos de fibras. A Tabela 20 apresenta o procedimento de cálculo, que começa a partir do traço unitário da mistura de CAA, que é traduzida para composição em massa por metro cúbico e, posteriormente, para o volume que cada componente ocupa em um metro cúbico. Estes valores, com a área superficial equivalente ao conteúdo de agregados graúdos na mistura, são utilizados na determinação da e_{ar} , que é adotado na compatibilização de todas as misturas.

Posteriormente, a área superficial de fibras foi determinada para cada mistura com base nos valores obtidos no cálculo apresentado na Tabela 19, considerando o seu teor de incorporação. O V_{ap} foi fixado com base nos valores obtidos no cálculo apresentado na Tabela 18. Sendo o V_f e o V_{ap} fixos, o volume de brita da mistura foi ajustado de modo que e_{ar} fosse igual ao da mistura de CAA, obtido pela alteração no V_{at} e, por consequência no V_{ar} . Os outros componentes da mistura – cimento, areia média, areia fina e água – foram determinados de modo que a composição da argamassa fosse a mesma da mistura de CAA. Deste modo, a relação a/c foi a

mesma para todas as misturas, porém a relação entre a massa de água e de materiais secos aumentou com o aumento do volume de fibras. A partir da definição da composição volumétrica, foi determinada a composição em massa, a partir da qual foi possível determinar o traço unitário das misturas.

Tabela 20 – Cálculo dos traços para os diferentes tipos e teores de fibras

Traço	CAA REF	RF1 0,50%	RF1 0,75%	RF1 1,00%	RF2 0,50%	RF2 0,75%	RF2 1,00%	RF3 0,50%	RF3 0,75%	RF3 1,00%	
Unitário	AG	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
	CIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	AF	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	
	AM	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	
	BR	2,20	2,02	1,86	1,71	1,95	1,79	1,62	1,77	1,59	1,45
	FIB	0,00	0,09	0,13	0,17	0,09	0,13	0,16	0,08	0,12	0,16
	m	4,00	3,82	3,66	3,51	3,75	3,59	3,42	3,57	3,39	3,25
	α	56,0%	58,1%	60,1%	62,1%	58,9%	61,0%	63,3%	61,3%	63,8%	65,9%
Massa (kg/m ³)	AG	197,7	202,7	207,6	212,8	205,0	210,2	216,0	211,5	218,0	223,1
	CIM	439,4	450,5	461,4	472,9	455,5	467,1	480,1	470,1	484,5	495,8
	AF	316,3	324,3	332,2	340,5	328,0	336,3	345,7	338,5	348,9	356,9
	AM	474,5	486,5	498,3	510,7	492,0	504,5	518,5	507,7	523,3	535,4
	BR	966,6	909,4	859,4	807,3	889,4	837,0	779,0	831,9	768,2	717,1
	FIB	0,00	39,25	58,88	78,50	39,25	58,88	78,50	39,25	58,88	78,50
	Volume (m ³ /m ³)	AG	0,198	0,203	0,208	0,213	0,205	0,210	0,216	0,212	0,218
CIM		0,142	0,145	0,149	0,153	0,147	0,151	0,155	0,152	0,156	0,160
AF		0,121	0,124	0,127	0,130	0,125	0,128	0,132	0,129	0,133	0,136
AM		0,182	0,186	0,191	0,196	0,188	0,193	0,199	0,195	0,200	0,205
BR		0,358	0,337	0,318	0,299	0,329	0,310	0,289	0,308	0,285	0,266
FIB		0,000	0,005	0,008	0,010	0,005	0,008	0,010	0,005	0,008	0,010
V _t		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
V _{at}		0,642	0,658	0,674	0,691	0,666	0,683	0,702	0,687	0,708	0,724
V _{ar}	0,134	0,141	0,142	0,142	0,133	0,131	0,128	0,127	0,124	0,123	
V _{ap}	0,508	0,517	0,532	0,549	0,532	0,552	0,574	0,560	0,584	0,601	
Comp.	A _b	299,84	282,09	266,59	250,43	275,89	259,64	241,63	258,05	238,28	222,45
	A _f	0,00	33,85	50,78	67,71	22,20	33,29	44,39	26,48	39,72	52,96
	e _{ar}	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

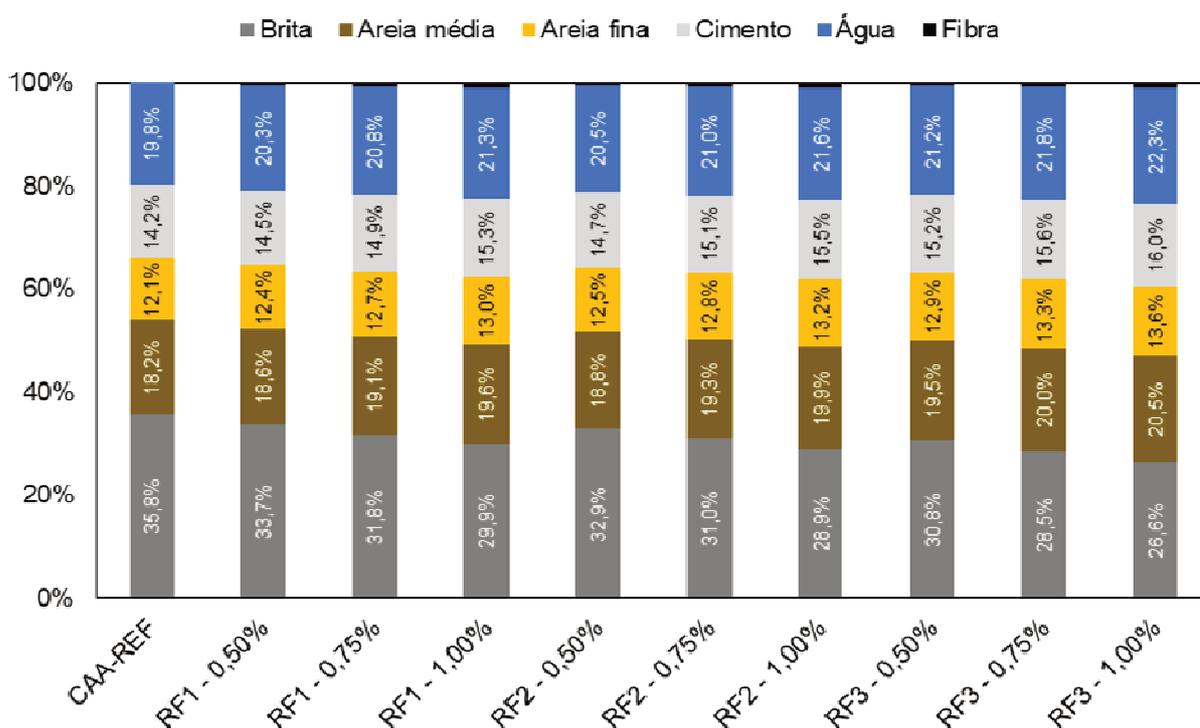
Onde: AG = água; CIM = cimento; AF = areia fina; AM = areia média; BR = brita; FIB = fibra; m = total de agregados; α = teor de argamassa seco; V_t = volume total; V_{at} = volume de argamassa total; V_{ar} = volume de argamassa de recobrimento; V_{ap} = volume de argamassa de recobrimento; A_b = área superficial de brita; A_f = área superficial de fibras; e_{ar} = espessura da argamassa de recobrimento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado nos resultados obtidos, a aplicação do método de dosagem resultou na redução no volume de brita e no aumento do volume de cimento, areia fina e areia média para todas as misturas em relação à mistura de

CAA. Deste modo, é possível perceber que a inclusão de fibras pelo método proposto ocasionou um aumento no α , que variou de 2,1% a 9,9% em função do tipo e do teor de fibras empregado. Além disso, verificou-se que o consumo de cimento aumentou de 439,4 kg/m³ para 495,8 kg/m², da mistura de CAA para a mistura com fibras de maior fator de forma em maior teor de incorporação. Para análise comparativa, a Figura 28 mostra a relação volumétrica entre as composições.

Figura 28 – Relação volumétrica entre a composição das misturas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que teor de água na composição volumétrica da mistura aumentou de 0,5% a 2,5% para incorporação de fibras em teores de 0,5% a 1,0%, enquanto que o teor de pasta variou de 0,86% a 4,36% e o teor de areia variou de 0,76% a 3,88%. Na aplicação de um método similar para fibras metálicas com comprimento de 30 mm e fator de forma 55 em teor de 0,25%, 0,50% e 0,75%, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) obtiveram uma redução no conteúdo de agregado graúdo de 792 kg/m³ para 762 kg/m³, 745 kg/m³ e 721 kg/m³, com um aumento no conteúdo de agregado miúdo de 781 kg/m³ para 798 kg/m³, 813 kg/m³ e 830 kg/m³, mantendo o conteúdo de cimento e água fixos.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco: espalhamento, tempo de escoamento (t_{500}), índice de estabilidade visual (IEV), índice de dispersão das fibras (IDF) e viscosidade plástica pelo funil V. Com exceção do IDF, todas as propriedades foram avaliadas para as duas betonadas de cada traço. Sendo assim, para análise comparativa dos resultados, adotou-se o valor médio das duas misturas realizadas e a análise de variância (ANOVA) de modo a verificar quais fatores exercem efeito significativo sobre as variáveis de resposta.

4.2.1 Espalhamento e Tempo de Escoamento (t_{500})

Os resultados de espalhamento e de tempo de escoamento (t_{500}) para as duas betonadas de cada traço são apresentados na Tabela 21, assim como a média e o desvio padrão destes dados.

Tabela 21 – Resultados de espalhamento e tempo de escoamento (t_{500})

Traço	Espalhamento (mm)			t_{500} (s)		
	B1	B2	$\mu \pm \sigma$	B1	B2	$\mu \pm \sigma$
CAA-REF	750,0	760,0	755,0 \pm 7,1	0,8	0,9	0,85 \pm 0,08
CAA-RF1-0,50%	800,0	785,0	792,5 \pm 10,6	0,5	0,5	0,50 \pm 0,02
CAA-RF1-0,75%	800,0	810,0	805,0 \pm 7,1	0,4	0,5	0,45 \pm 0,05
CAA-RF1-1,00%	815,0	800,0	807,5 \pm 10,6	0,9	1,0	0,95 \pm 0,02
CAA-RF2-0,50%	815,0	795,0	805,0 \pm 14,1	0,4	0,4	0,40 \pm 0,02
CAA-RF2-0,75%	825,0	825,0	825,0 \pm 0,0	0,3	0,5	0,40 \pm 0,11
CAA-RF2-1,00%	885,0	780,0	832,5 \pm 74,2	0,4	0,4	0,40 \pm 0,04
CAA-RF3-0,50%	845,0	825,0	835,0 \pm 14,1	0,3	0,4	0,35 \pm 0,04
CAA-RF3-0,75%	830,0	815,0	822,5 \pm 10,6	0,6	0,4	0,50 \pm 0,11
CAA-RF3-1,00%	840,0	800,0	820,0 \pm 28,3	0,5	0,7	0,60 \pm 0,16

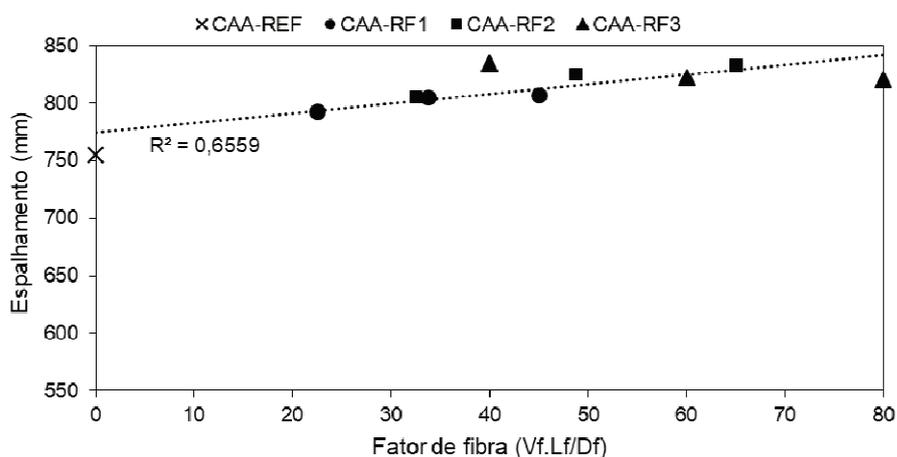
Onde: μ = média; σ = desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos ensaios entre as duas betonadas de cada traço não apresentam muita variabilidade. Analisando-se o espalhamento, os traços que apresentaram maior desvio em relação à média foram o CAA-RF2-1,00% e o CAA-RF3-1,00%, seguido dos traços CAA-RF2-0,50% e CAA-RF3-0,50%. Para o tempo de escoamento, os traços que apresentaram maior variabilidade nos resultados foram os dos traços CAA-RF2-0,75%, CAA-RF3-0,75% e CAA-RF3-1,00%.

Buscando comparar os resultados de espalhamento entre os traços analisados, utilizou-se como parâmetro o fator de fibra, que representa o produto entre o fator de forma e o teor de fibras incorporado na mistura. Assim, os valores de espalhamento foram relacionados com o fator de fibra, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Análise comparativa dos resultados de espalhamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que todas as misturas com adição de fibra apresentaram maiores valores de espalhamento em relação à mistura CAA-REF. Apesar da baixa correlação encontrada entre os dados de todas as fibras, com R^2 de 0,656, as misturas RF1 e RF2 apresentaram comportamento similar, porém com maior correlação, com R^2 de 0,871 e 0,936, respectivamente. A mistura RF3 também apresentou melhor correlação, com R^2 de 0,871, porém em sentido descendente. De modo geral, foi possível observar que todas as misturas atenderam aos critérios da classe SF3 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Como pode ser observado nos dados apresentados na literatura, a incorporação de fibras metálicas tende a ocasionar uma redução do espalhamento, cuja magnitude é dependente das características das fibras e da composição da mistura. (FRAZÃO et al., 2015; KHALOO et al., 2014; TABATABAEIAN et al., 2017). Na aplicação de seu método, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) constataram a redução do espalhamento de 710 mm para 530 mm da mistura de CAA para a incorporação de 0,75% de fibras. Justifica-se a elevada perda de trabalhabilidade dos autores pelo fato de terem fixado o consumo de cimento e água, compensando a redução no volume de agregados graúdos com um aumento no consumo de areia,

que possui elevada superficial e aumenta a coesão da mistura. Cabe ressaltar que os autores realizaram ajustes no conteúdo de aditivos químicos, com a redução do aditivo modificador de viscosidade e aumento do aditivo superplastificante, o que dificulta a comparação dos resultados.

Para verificar a significância do efeito do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) no espalhamento das misturas (variável dependente), procedeu-se a realização da ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – ANOVA para o espalhamento

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	5994336	1	5994336	45430,76	0,000000
Fibra	976	2	488	3,70	0,123115
Teor	135	2	67	0,51	0,634644
Erro	528	4	132		

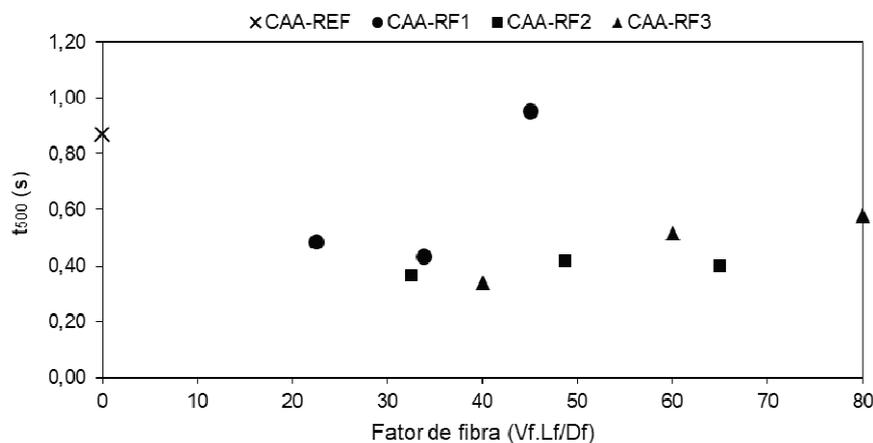
Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise foi considerado um nível de significância de 5% ($p < 0,05$), implicando em um nível de 95% de confiança. Para a análise realizada, verifica-se nenhuma das variáveis estudadas apresenta influência significativa sobre o espalhamento das misturas dosadas pelo método proposto.

A Figura 30 apresenta uma análise comparativa dos resultados de t_{500} , relacionado os resultados obtidos entre os traços analisados e o fator de fibra.

Figura 30 – Análise comparativa dos resultados de t_{500}



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que a maior parte das misturas com adição de fibra apresentaram menor tempo de escoamento em relação à mistura CAA-REF, com exceção da mistura CAA-RF1. Não foi possível encontrar relação entre os dados de todas as misturas com uma linha de tendência, apesar de todas as misturas RF3 terem apresentado R^2 igual a 0,935 e comportamento ascendente. De modo geral, é possível observar que todas as misturas atendem aos critérios da classe VS1 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Os resultados apresentados por outras pesquisas realizadas com a simples adição de fibras na mistura, como as de Paja e Ponikiewski (2013) e Akcay e Ali (2012), constataram que as misturas reforçadas com fibras apresentaram um maior t_{500} para maiores teores de incorporação. Na aplicação de seu método, Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) também constataram o aumento do t_{500} . No entanto, os resultados encontrados nessa pesquisa foram divergentes, o que pode estar relacionado ao aumento no volume de argamassa e de pasta na mistura, facilitando o escoamento da mistura.

A Tabela 23 apresenta os resultados da ANOVA realizada para verificar a influência do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) no t_{500} das misturas (variável dependente).

Tabela 23 – ANOVA para o t_{500}

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	2,245003	1	2,245003	93,32036	0,000642
Fibra	0,081356	2	0,040678	1,69090	0,293627
Teor	0,100739	2	0,050369	2,09376	0,238680
Erro	0,096228	4	0,024057		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao mesmo nível de significância aplicado na análise do espalhamento é possível observar que nem o tipo de fibra e nem o teor de fibras apresentaram influência significativa sobre o t_{500} das misturas dosadas pelo método proposto.

4.2.2 Índice de Estabilidade Visual (IEV) e Índice de Dispersão das Fibras (IDF)

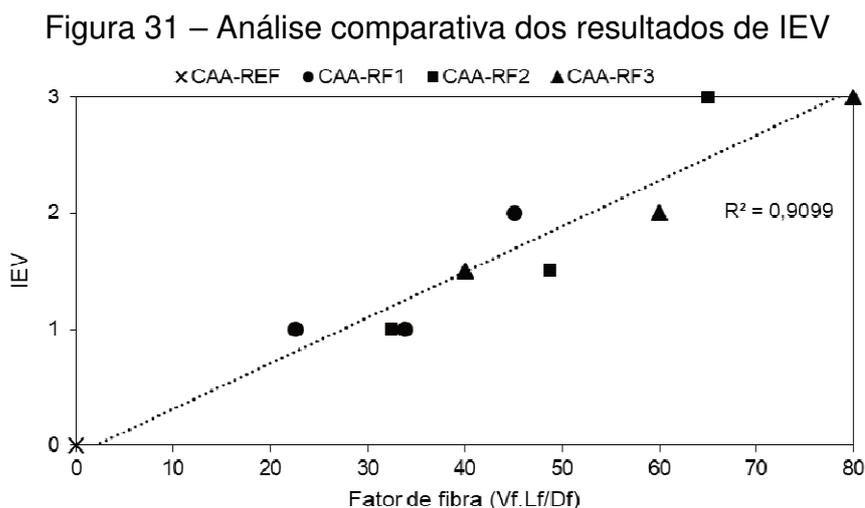
A Tabela 24 apresenta uma foto do espalhamento e o IEV atribuído às duas betonadas de cada traço.

Tabela 24 – Resultados obtidos na determinação do IEV

		IEV			
B1	B2	B1	B2	B1	B2
CAA-REF		CAA-RF1-0,50%			
					
IEV = 0	IEV = 0	IEV = 1	IEV = 1		
CAA-RF1-0,75%		CAA-RF1-1,00%			
					
IEV = 1	IEV = 1	IEV = 2	IEV = 2		
CAA-RF2-0,50%		CAA-RF2-0,75%			
					
IEV = 1	IEV = 1	IEV = 2	IEV = 1		
CAA-RF2-1,00%		CAA-RF3-0,50%			
					
IEV = 3	IEV = 3	IEV = 1	IEV = 2		
CAA-RF3-0,75%		CAA-RF3-1,00%			
					
IEV = 2	IEV = 2	IEV = 3	IEV = 3		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que para a maior parte das misturas as duas betonadas de cada traço apresentaram um comportamento muito similar, com exceção das misturas CAA-RF2-0,75% e CAA-RF3-0,50%, em que uma das betonadas apresentou uma classe inferior devido à ocorrência de segregação das fibras no centro da mistura espalhada. De modo a analisar os resultados comparativamente, a Figura 31 apresenta a relação entre a média dos resultados de IEV e o seu fator de fibra.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as misturas com fibras apresentaram IEV de classe inferior à mistura de CAA-REF, sendo observada a redução das classes dos materiais com o aumento do comprimento e do fator de forma das fibras, assim como do teor incorporado. Isso foi enfatizado pela alta correlação encontrada na linha de tendência que relaciona todas as misturas, verificada também para a correlação entre as misturas reforçadas com cada tipo de fibra. Resultados similares foram obtidos por Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014) na aplicação do seu método.

Cabe salientar que a segregação das fibras descaracteriza o comportamento autoadensável das misturas e que, neste estudo, aproximadamente 50% das misturas não atenderam a esta condição. Ressaltam-se ainda as dificuldades encontradas na mistura dos últimos traços, evidenciando a limitação do método proposto para aplicação em misturas com fibras de maior comprimento e em teores mais elevados. Isso pode estar relacionado à incompatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados graúdos empregados ou ainda a uma limitação da produção de misturas de CAA com fibras de comprimento na ordem de 60 mm, incorporadas em teores de aproximadamente 1,00%.

De modo a verificar a influência do tipo e do teor de incorporação das fibras (variáveis independentes) no IEV (variável dependente), realizou-se uma ANOVA, conforme os resultados da Tabela 25.

Tabela 25 – ANOVA para o IEV

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	28,44444	1	28,44444	409,6000	0,000035
Fibra	1,05556	2	0,52778	7,6000	0,043403
Teor	3,72222	2	1,86111	26,8000	0,004823
Erro	0,27778	4	0,06944		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados encontrados é possível afirmar, com 95% de confiança, que tanto o tipo de fibra quanto o teor incorporado exercem influência significativa no IEV atribuído à mistura dosada com o método proposto nesta dissertação. De modo a verificar a influência da estabilidade da mistura na distribuição das fibras, realizou-se a determinação do IDF, cujos resultados são apresentados na Tabela 26.

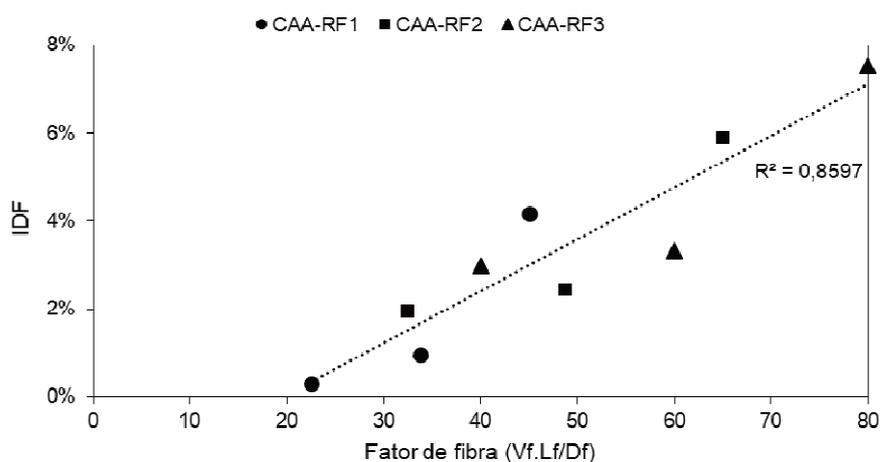
Tabela 26 – Resultados obtidos na determinação do IDF

Traço	Interno		Externo		IDF
	Total	Fibras	Total	Fibras	
CAA-RF1-0,50%	1302,3	15,0	4809,8	41,1	0,297%
CAA-RF1-0,75%	1286,1	34,5	4894,8	84,9	0,948%
CAA-RF1-1,00%	1669,0	108,9	4471,8	105,7	4,161%
CAA-RF2-0,50%	1312,8	33,2	4928,8	28,4	1,953%
CAA-RF2-0,75%	1143,6	34,1	4887,1	26,5	2,440%
CAA-RF2-1,00%	2223,6	145,8	3856,8	25,8	5,888%
CAA-RF3-0,50%	1404,5	48,4	4882,7	22,4	2,987%
CAA-RF3-0,75%	1278,2	55,2	4189,4	42,3	3,309%
CAA-RF3-1,00%	2328,6	196,8	3767,6	34,7	7,530%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O IDF foi determinado apenas para a segunda betonada de cada traço das misturas reforçadas com fibras. É possível observar que existe uma tendência ao aumento do IDF com o aumento do comprimento das fibras e do seu fator de forma, assim como do teor incorporado. Estando estes valores relacionados ao IEV, apresenta-se na Figura 32 a relação entre o IDF e o fator de forma das fibras.

Figura 32 – Análise comparativa dos resultados de IDF



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi constatada uma elevada correlação entre os resultados obtidos em todas as misturas, assim como para a correlação entre os teores de cada tipo de fibra. Para verificar a significância do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) no IDF (variável dependente), realizou-se uma ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – ANOVA para o IDF

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	0,009678	1	0,009678	1305,681	0,000004
Fibra	0,001191	2	0,000596	80,367	0,000590
Teor	0,003032	2	0,001516	204,538	0,000094
Erro	0,000030	4	0,000007		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados;
F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Similarmente aos resultados encontrados para o IEV, é possível afirmar, com 95% de confiança, que tanto o tipo de fibra quanto o teor incorporado exerceram influência significativa no IDF das misturas dosadas com o método proposto nesta dissertação.

4.2.3 Viscosidade Plástica pelo Funil V

Os resultados do tempo de escoamento pelo Funil V para as duas betonadas de cada traço são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados de viscosidade plástica pelo Funil V

Traço	Funil V (s)		
	B1	B2	$\mu \pm \sigma$
CAA-REF	3,2	3,4	$3,29 \pm 0,09$
CAA-RF1-0,50%	2,5	2,2	$2,36 \pm 0,20$
CAA-RF1-0,75%	3,0	3,0	$2,99 \pm 0,02$
CAA-RF1-1,00%	2,6	4,0	$3,29 \pm 0,95$
CAA-RF2-0,50%	2,3	3,8	$3,04 \pm 1,11$
CAA-RF2-0,75%	2,7	22,6	$12,66 \pm 14,06$
CAA-RF2-1,00%	4,1	31,8	$17,93 \pm 19,55$
CAA-RF3-0,50%	2,8	9,2	$5,98 \pm 4,56$
CAA-RF3-0,75%	-	-	-
CAA-RF3-1,00%	-	-	-

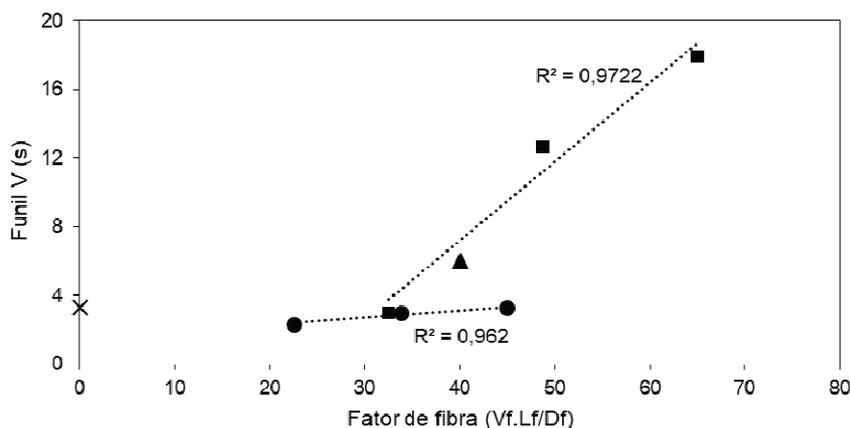
Onde: μ = média; σ = desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As misturas CAA-RF3-0,75% e CAA-RF3-1,00%, que apresentavam fibras de maior comprimento e fator de forma em teores mais elevados, não escoaram pelo funil V, não sendo possível medir seu tempo de escoamento. Verifica-se uma elevada variabilidade nos resultados encontrados, principalmente para as misturas com fibras mais longas e com maiores teores de incorporação, onde uma betonada apresentou um tempo de escoamento muito maior que a outra. Isso pode estar relacionado ao arranjo das fibras dentro do funil, que pode orientar as fibras de forma a dificultar a sua passagem por espaços confinados, resultando em uma maior variabilidade dos resultados. Cabe ressaltar que este ensaio visa avaliar a mistura sob fluxo confinado, cuja aplicação é limitada para o CAA-RF.

De modo a analisar comparativamente, apresenta-se na Figura 33 a relação entre a média do tempo de escoamento no funil das misturas e o seu fator de fibra.

Figura 33 – Análise comparativa dos resultados do Funil V



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que a maior parte das misturas apresentaram um tempo de escoamento similar ao da mistura CAA-REF, com exceção das misturas mencionadas anteriormente, que tiveram resultados muito diferentes entre as betonadas. Apesar da linha de tendência que relaciona os resultados de todas as misturas apresentar um comportamento ascendente com uma baixa correlação, as misturas RF1 e RF2 apresentaram comportamento similar, com R^2 de 0,962 e 0,972, respectivamente. Como a mistura RF3 possui apenas um resultado, não foi possível verificar este comportamento, indicando ainda que a aplicação do método com estas fibras não foi adequada para as condições avaliadas no ensaio. De modo geral, foi possível observar que todas as misturas, com exceção da CAA-RF3-0,75% e CAA-RF3-1,00%, atenderam aos critérios da classe VF1 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Como algumas misturas não escoaram pelo funil, impossibilitando a mensuração de resultados, não foi possível realizar a ANOVA desta propriedade. Verifica-se, no entanto, que o fato de apenas um tipo de fibra não ter escoado pelo funil leva a crer que o tipo de fibra apresenta influência significativa sobre esta propriedade.

4.3 ENSAIOS DO ESTADO ENDURECIDO

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado endurecido: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e fator de tenacidade. Para análise comparativa dos resultados, adotou-se o valor médio das duas betonadas de cada traço. Utilizou-se, ainda, a ANOVA para verificar quais fatores exercem efeito significativo sobre as variáveis de resposta. Cabe ressaltar que a composição das misturas possui variação em todos os seus componentes, principalmente no consumo de cimento, não sendo possível atrelar os resultados obtidos apenas aos diferentes tipos e teores de fibras analisadas.

4.3.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para os quatro corpos de prova de cada traço avaliado, sendo dois de cada betonada, realizados aos 28 dias de idade, são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados de resistência à compressão axial

Traço	Resistência à compressão axial (MPa)				$\mu \pm \sigma$
	B1-N1	B1-N2	B2-N1	B2-N2	
CAA-REF	45,0	43,7	48,8	47,7	46,3 \pm 2,4
CAA-RF1-0,50%	47,0	51,6	49,9	51,6	50,0 \pm 2,2
CAA-RF1-0,75%	41,7	40,7	42,0	40,1	41,1 \pm 0,9
CAA-RF1-1,00%	48,6	50,0	50,1	51,0	49,9 \pm 1,0
CAA-RF2-0,50%	63,8	65,1	61,0	65,4	63,8 \pm 2,0
CAA-RF2-0,75%	66,4	65,9	70,7	66,7	67,4 \pm 2,2
CAA-RF2-1,00%	73,6	72,4	78,1	69,2	73,3 \pm 3,7
CAA-RF3-0,50%	61,8	58,0	69,7	58,5	62,0 \pm 5,4
CAA-RF3-0,75%	62,3	79,2	76,1	84,5	75,6 \pm 9,5
CAA-RF3-1,00%	68,1	64,6	74,0	67,3	68,5 \pm 3,9

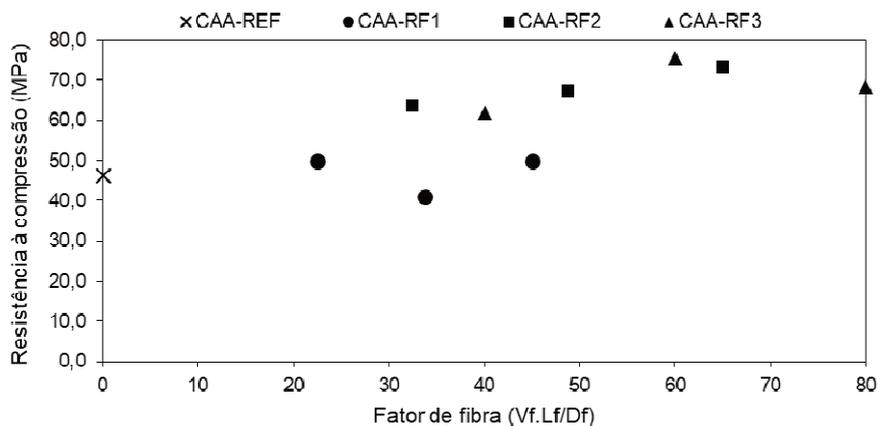
Onde: μ = média; σ = desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado, o resultado dos ensaios entre os diferentes corpos de prova de cada traço apresentou alta variabilidade, chegando a mais de 10 MPa em alguns casos. Os traços que apresentaram maior desvio em relação à média foram o CAA-RF3-0,50% e o CAA-RF3-0,75%, seguido dos traços CAA-RF2-1,00% e CAA-RF3-1,00%. Isso pode estar atrelado ao confinamento das fibras no interior dos moldes cilíndricos, ocasionando a orientação das fibras em diferentes planos de fissuração. Sendo assim, pode-se dizer que a utilização de corpos de prova cilíndricos, com dimensões 10x20 cm, são inadequadas para avaliação de concretos reforçados com fibras de comprimento de 6,0 cm.

De modo a analisar comparativamente os resultados obtidos, apresenta-se na Figura 34 a relação entre o valor de resistência à compressão axial das misturas de cada traço e o seu fator de fibra.

Figura 34 – Análise comparativa dos resultados de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que, no geral, houve um aumento da resistência à compressão para as amostras com incorporação de fibras, com exceção das misturas RF1, que apresentaram valores similares aos da mistura CAA-REF. Isso se opõe ao que foi encontrado por Silva (2016) e Tabatabaeian et al. (2017), além de outros estudos que constataram a redução desta propriedade com o aumento no teor de fibras. O aumento na resistência à compressão para misturas reforçadas com fibras de comprimento na ordem de 60 mm provavelmente está relacionado com a distribuição de fibras dentro dos corpos de prova cilíndricos, que também contribuíram para uma maior variabilidade nos resultados, uma vez que a resistência da matriz é predominante no ensaio deste tipo de material.

A Tabela 30 apresenta os resultados da ANOVA realizada para verificar a influência do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) na resistência à compressão (variável dependente).

Tabela 30 – ANOVA para a resistência à compressão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	38286,17	1	38286,17	732,8331	0,000011
Fibra	1334,45	2	667,22	12,7713	0,018333
Teor	45,41	2	22,71	0,4346	0,674843
Erro	208,98	4	52,24		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados;
F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise realizada foi considerado um nível de significância de 5% ($p < 0,05$), implicando em um nível de 95% de confiança. Verificou-se, com 95% de confiança, que apenas o tipo de fibra apresentou influência significativa sobre a resistência à compressão das misturas dosadas pelo método proposto.

4.3.2 Módulo de Elasticidade

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os quatro corpos de prova de cada traço avaliado, sendo dois de cada betonada, realizados aos 28 dias de idade, são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados de módulo de elasticidade

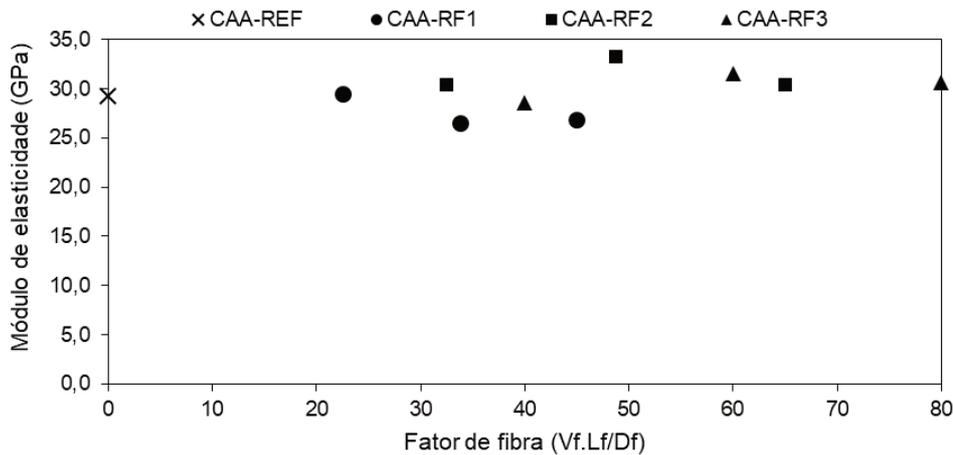
Traço	Módulo de elasticidade (GPa)				$\mu \pm \sigma$
	B1-N3	B1-N4	B2-N3	B2-N4	
CAA-REF	29,4	29,0	28,6	29,9	29,2 \pm 0,6
CAA-RF1-0,50%	29,1	29,6	30,5	28,9	29,5 \pm 0,7
CAA-RF1-0,75%	28,1	28,0	26,3	23,9	26,6 \pm 2,0
CAA-RF1-1,00%	26,1	26,7	27,4	27,4	26,9 \pm 0,6
CAA-RF2-0,50%	30,0	31,5	29,5	30,6	30,4 \pm 0,9
CAA-RF2-0,75%	32,4	33,0	33,3	34,5	33,3 \pm 0,9
CAA-RF2-1,00%	29,4	30,3	31,1	30,6	30,4 \pm 0,7
CAA-RF3-0,50%	24,4	25,4	33,5	30,9	28,6 \pm 4,4
CAA-RF3-0,75%	30,7	31,9	32,1	31,6	31,6 \pm 0,6
CAA-RF3-1,00%	29,5	30,1	32,0	30,8	30,6 \pm 1,1

Onde: μ = média; σ = desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que os resultados dos ensaios entre as duas betonadas de cada traço não apresentaram muita variabilidade. Os traços que apresentaram maior desvio em relação à média foram o CAA-RF1-0,75% e o CAA-RF3-0,50%, porém sem diferenças significativas. Para análise comparativa dos resultados, a Figura 35 apresenta a relação entre o resultado médio de cada traço e o seu fator de fibra.

Figura 35 – Análise comparativa dos resultados de módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Não foi possível encontrar uma correlação satisfatória entre os resultados obtidos, tanto para o geral quanto para cada tipo de fibra. Pode-se considerar que o módulo de elasticidade da mistura CAA-REF é baixo, uma vez que o estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos de classe C45 seja na ordem de 38 GPa. Isso pode estar atrelado ao elevado teor de argamassa das misturas, sendo esta redução ainda maior para misturas com fibras.

De modo a verificar a influência do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) no módulo de elasticidade (variável dependente), realizou-se uma ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – ANOVA para o módulo de elasticidade

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	7969,758	1	7969,758	2416,191	0,000001
Fibra	21,577	2	10,788	3,271	0,143984
Teor	2,460	2	1,230	0,373	0,710409
Erro	13,194	4	3,298		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao mesmo nível de significância aplicado nas outras análises foi possível observar que nem o tipo de fibra e nem o teor de fibras apresentaram influência significativa sobre o módulo de elasticidade das misturas dosadas por este método.

4.3.3 Resistência à Tração na Flexão e Fator de Tenacidade

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade para os dois corpos de prova de cada traço avaliado, realizado aos 28 dias de idade, são apresentados na Tabela 33. Cabe salientar que a os resultados de resistência à tração se referem ao instante de fissuração da matriz cimentícia.

Tabela 33 – Resultados do ensaio de flexão

Traço	Resistência à tração (MPa)			Fator de tenacidade (MPa)		
	B1-N5	B2-N5	$\mu \pm \sigma$	B1-N5	B2-N5	$\mu \pm \sigma$
CAA-REF	5,34	5,05	5,20 \pm 0,21	0,00	0,00	0,00 \pm 0,00
CAA-RF1-0,50%	4,84	5,17	5,01 \pm 0,24	1,20	1,54	1,37 \pm 0,24
CAA-RF1-0,75%	5,32	5,06	5,19 \pm 0,18	2,11	2,44	2,28 \pm 0,23
CAA-RF1-1,00%	5,66	6,11	5,89 \pm 0,32	3,07	4,32	3,70 \pm 0,89
CAA-RF2-0,50%	5,57	6,18	5,88 \pm 0,44	3,38	5,03	4,21 \pm 1,16
CAA-RF2-0,75%	6,43	5,84	6,14 \pm 0,42	6,34	7,18	6,76 \pm 0,59
CAA-RF2-1,00%	7,06	7,18	7,12 \pm 0,09	7,47	9,56	8,51 \pm 1,48
CAA-RF3-0,50%	5,49	6,26	5,88 \pm 0,54	5,37	6,06	5,71 \pm 0,49
CAA-RF3-0,75%	6,70	7,84	7,27 \pm 0,81	7,48	8,72	8,10 \pm 0,88
CAA-RF3-1,00%	6,64	6,40	6,52 \pm 0,17	9,17	5,35	7,26 \pm 2,70

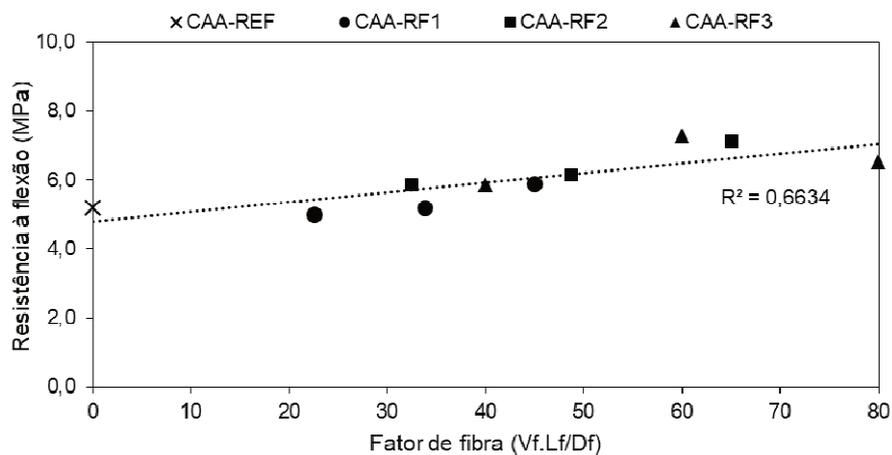
Onde: μ = média; σ = desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que os resultados dos ensaios entre as duas betonadas de cada traço não apresentaram muita variabilidade, principalmente para o ensaio de resistência à tração na flexão. Para o fator de tenacidade, verificou-se uma maior variabilidade nos resultados, sendo que os traços que apresentaram maior desvio em relação à média foram o CAA-RF2-1,00% e o CAA-RF3-1,00%, ou seja, com maior teor de incorporação das fibras com 60 mm de comprimento. Justifica-se a maior variabilidade destes dados por sua elevada relação com a distribuição de fibras na seção fissurada, que podem contribuir para o maior suporte de carga.

A Figura 36 apresenta uma análise comparativa dos resultados de resistência à tração na flexão entre os traços estudados em relação ao seu fator de fibra.

Figura 36 – Análise comparativa dos resultados de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que os resultados de resistência à tração na flexão obtidos para as misturas com incorporação de fibras foram similares aos da mistura CAA-REF, conforme evidenciado nos estudos de Tabatabaeian et al. (2017) e Akcay e Ali (2012). Além disso, a linha de tendência apresenta um comportamento ascendente, indicando um aumento da resistência à tração na flexão com o aumento no fator de fibra. Apesar de ter sido encontrada uma baixa correlação entre os dados de todas as fibras, as misturas RF1 e RF2 apresentaram comportamento similar, com R^2 de 0,900 e 0,898, respectivamente, diferentemente da mistura RF3, com R^2 de 0,214, o que pode estar atrelado à variabilidade obtida pela segregação destas fibras.

Apresenta-se na Tabela 34 os resultados da ANOVA realizada para verificar a influência do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) na resistência à tração na flexão (variável dependente).

Tabela 34 – ANOVA para a resistência à tração na flexão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	334,7114	1	334,7114	1419,556	0,000003
Fibra	2,4918	2	1,2459	5,284	0,075390
Teor	1,3271	2	0,6636	2,814	0,172586
Erro	0,9431	4	0,2358		

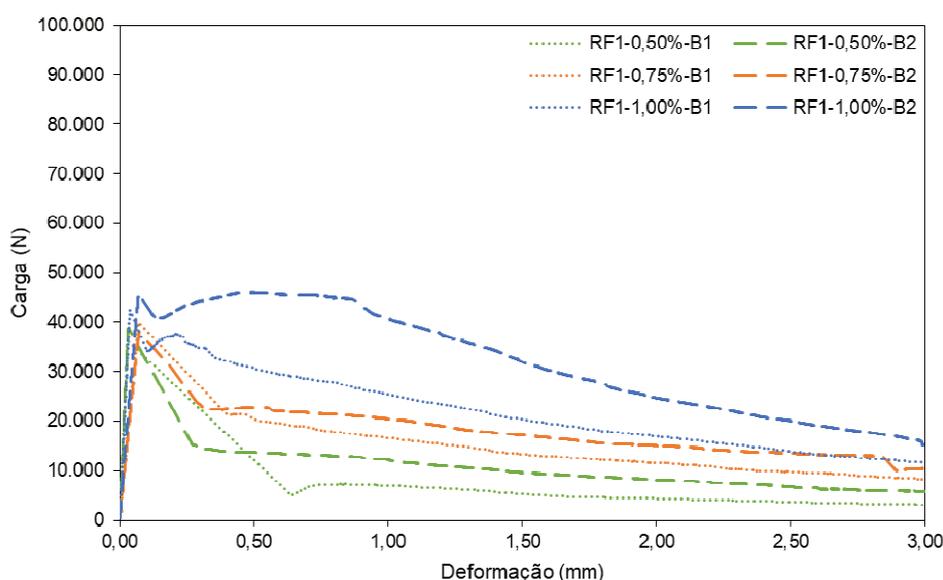
Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados;
F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com 95% de confiança é possível verificar que nenhuma das variáveis estudadas apresentaram influência significativa sobre a resistência à tração na flexão das amostras.

Com base nos resultados obtidos na medição dos deslocamentos no centro dos corpos de prova, foi possível traçar os diagramas carga-deformação. A Figura 37 apresenta o diagrama carga-deformação das misturas RF1.

Figura 37 – Diagrama carga-deformação das misturas RF1



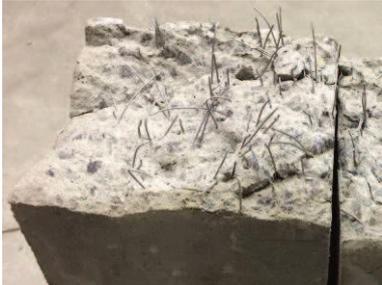
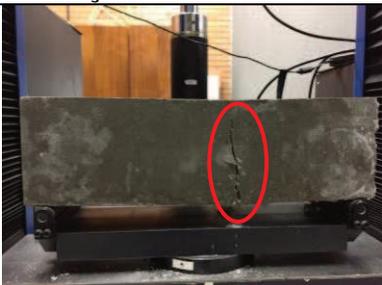
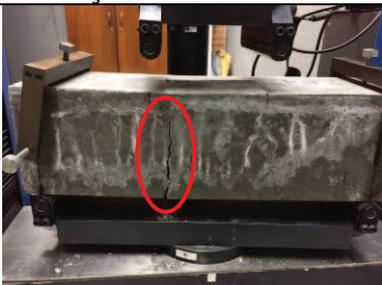
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que as misturas RF1 apresentaram maior perda de carga após a fissuração da matriz cimentícia, sendo a intensidade desta queda dependente do teor de fibras incorporadas. Matrizes reforçadas com 0,50% e 0,75% destas fibras apresentaram maior intensidade de queda após a fissuração da matriz, com a queda constante da capacidade de carregamento ao longo da deformação do corpo de prova devido a maior quantidade de reforço nos planos de ruptura. As matrizes reforçadas com 1,00% destas fibras apresentaram menor queda da capacidade de

carregamento após a fissuração da matriz e ainda conseguiram aumentar esta capacidade nos instantes iniciais de deformação, com a queda mais acentuada da capacidade de deformação ao longo do carregamento.

A Tabela 35 apresenta imagens do comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF1, através das quais é possível analisar o desenvolvimento de fissuras decorrentes dos esforços submetidos e da distribuição das fibras na seção fissurada do corpo de prova.

Tabela 35 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF1

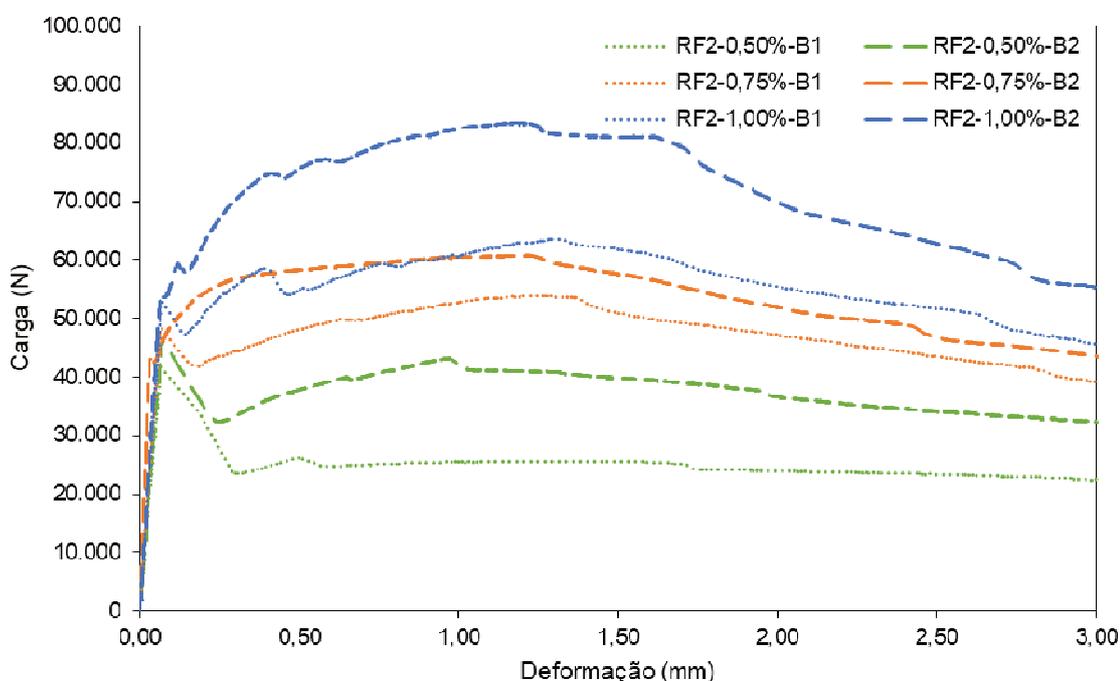
CAA-RF1-0,50%	CAA-RF1-0,75%	CAA-RF1-1,00%
		
Vista frontal – B1	Vista frontal – B1	Vista frontal – B1
		
Seção fissurada – B1	Seção fissurada – B1	Seção fissurada – B1
		
Vista frontal – B2	Vista frontal – B2	Vista frontal – B2
		
Seção fissurada – B2	Seção fissurada – B2	Seção fissurada – B2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que em todos os corpos de prova a fissuração ocorreu dentro do terço médio do vão do corpo de prova, em concordância com as prescrições da JSCE SF4 (JSCE, 1984) para validação do ensaio. Foi possível constatar que o aumento no teor de fibras promoveu uma maior distribuição das tensões ao longo da matriz, remetendo à ramificação de inúmeras fissuras, enquanto que baixos teores ocasionaram uma fissura discreta. A distribuição das fibras ao longo da seção transversal permite evidenciar a ocorrência de sua segregação, conforme constatado para as duas betonadas do traço CAA-RF1-0,75%.

O diagrama carga-deformação das misturas RF2 é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Diagrama carga-deformação das misturas RF2

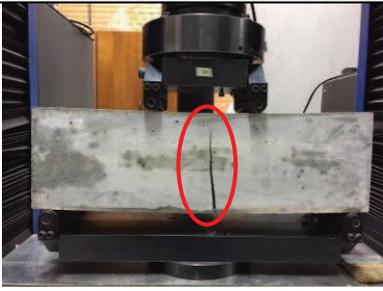


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que as misturas RF2 apresentaram maior capacidade de carregamento após a fissuração do que as misturas RF1 devido à maior área de contato das fibras com comprimento de 60 mm com a matriz. As matrizes reforçadas com 0,50% deste tipo de fibra apresentaram maior intensidade de queda após a fissuração da matriz, porém recuperando parte da capacidade de carregamento ao longo da deformação do corpo de prova. As matrizes reforçadas com 0,75% e 1,00% destas fibras apresentaram menor queda da capacidade de carregamento após a fissuração da matriz e ainda conseguiram aumentar esta capacidade nos instantes iniciais de deformação, com a queda mais acentuada da capacidade de deformação

ao longo do carregamento. As misturas reforçadas com 1,00% de fibras alcançaram maiores valores de carregamento após a fissura, apesar da discrepância entre os resultados das duas vigas. O comportamento à flexão destes corpos de prova, com o desenvolvimento de fissuras e distribuição de fibras, é apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF2

CAA-RF2-0,50%	CAA-RF2-0,75%	CAA-RF2-1,00%
		
Vista frontal – B1	Vista frontal – B1	Vista frontal – B1
		
Seção fissurada – B1	Seção fissurada – B1	Seção fissurada – B1
		
Vista frontal – B2	Vista frontal – B2	Vista frontal – B2
		
Seção fissurada – B2	Seção fissurada – B2	Seção fissurada – B2

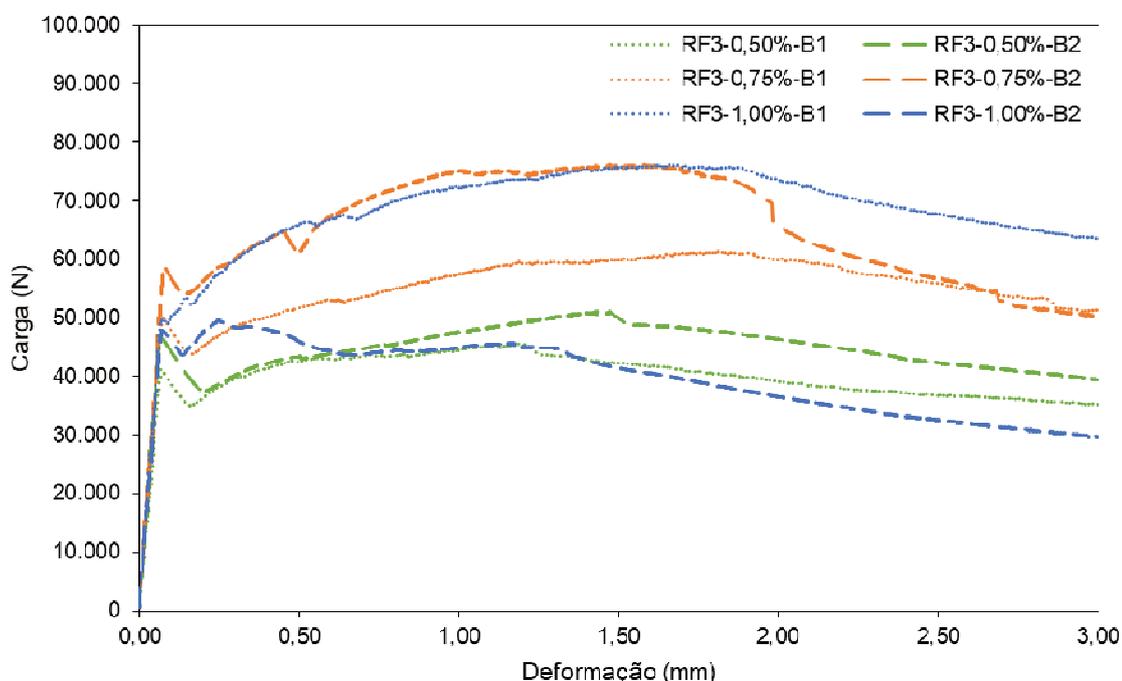
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as misturas RF2 a fissuração dos corpos de prova também ocorreu dentro do terço médio do vão do corpo de prova, apesar de o corpo de prova da primeira betonada da mistura RF2-1,00% ter fissurado muito próximo ao cutelo de

aplicação de carga. Com relação ao número de fibras presentes na seção transversal é possível observar que, apesar de estar visualmente coerente com o teor de fibras incorporadas, a amostra da segunda betonada da mistura RF2-0,50% apresentou uma quantidade maior de fibras e mais bem distribuídas, o que justifica a sua maior capacidade resistente após a fissuração da matriz cimentícia. O mesmo foi observado entre as amostras com teores de 0,75% e 1,00%, nas quais foi evidenciada a aglomeração de fibras em alguns pontos da seção transversal, aparentemente, em maior nível do que para as misturas RF1.

Na Figura 39 apresenta-se o diagrama carga-deformação das misturas RF3.

Figura 39 – Diagrama carga-deformação das misturas RF3

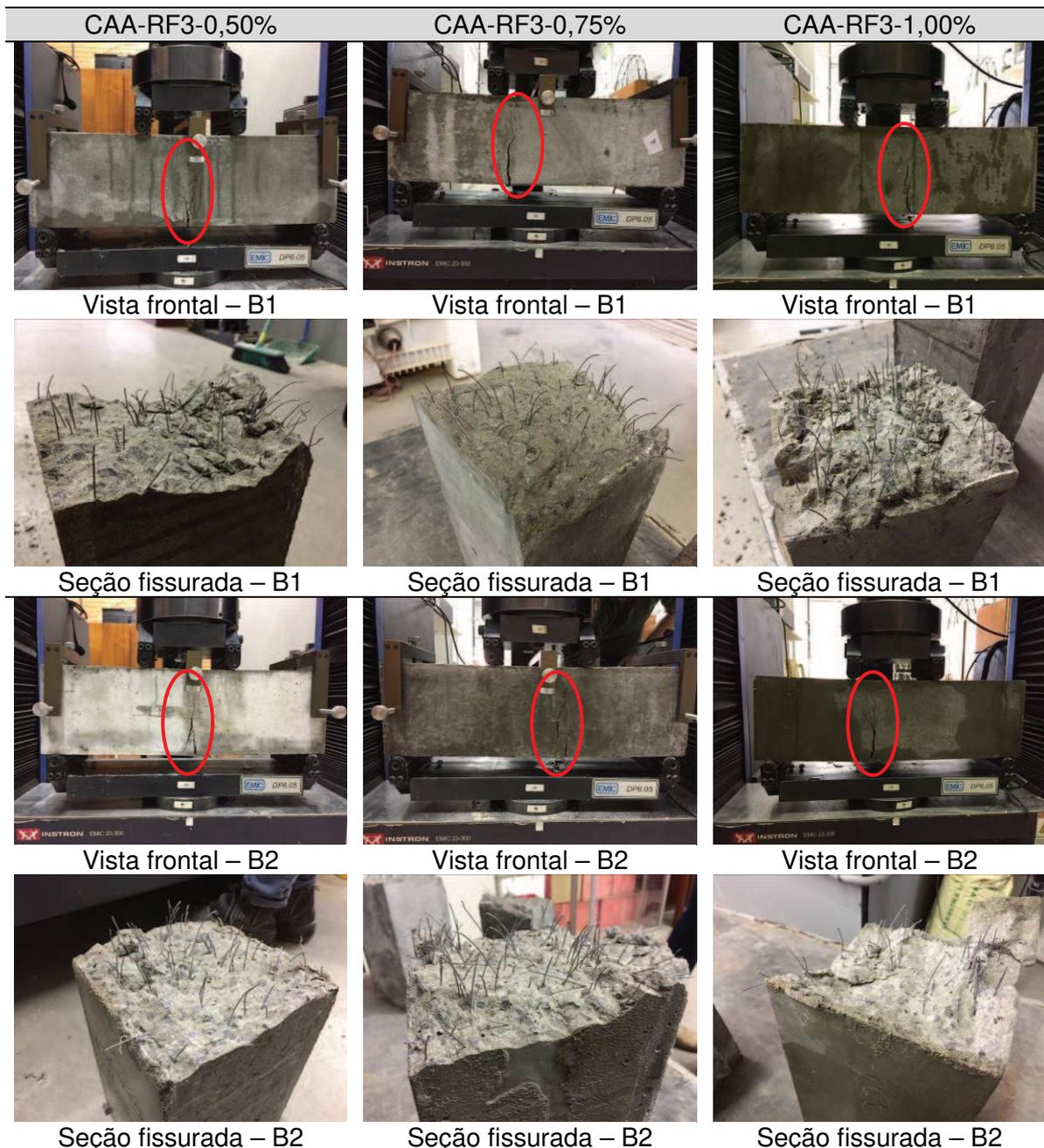


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que as misturas RF3 apresentaram uma queda similar após a fissuração da matriz cimentícia, com maior capacidade de carregamento ao longo da deformação. O aumento na capacidade de suporte de carga foi relacionado ao aumento no teor de fibras, onde as misturas com maior teor de fibras apresentaram maior capacidade resistente após a fissuração. A amostra da segunda betonada da mistura RF3-1,00% apresentou comportamento anômalo, com perda constante da capacidade de carregamento após a fissuração, que pode estar atrelado a segregação das fibras no estado fresco, resultando em uma distribuição não homogênea das fibras ao longo do corpo de prova.

A Tabela 37 apresenta imagens do comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF3, através das quais foi possível analisar o desenvolvimento de fissuras decorrentes dos esforços submetidos e da distribuição das fibras na seção fissurada do corpo de prova.

Tabela 37 – Comportamento à flexão dos corpos de prova das misturas RF3



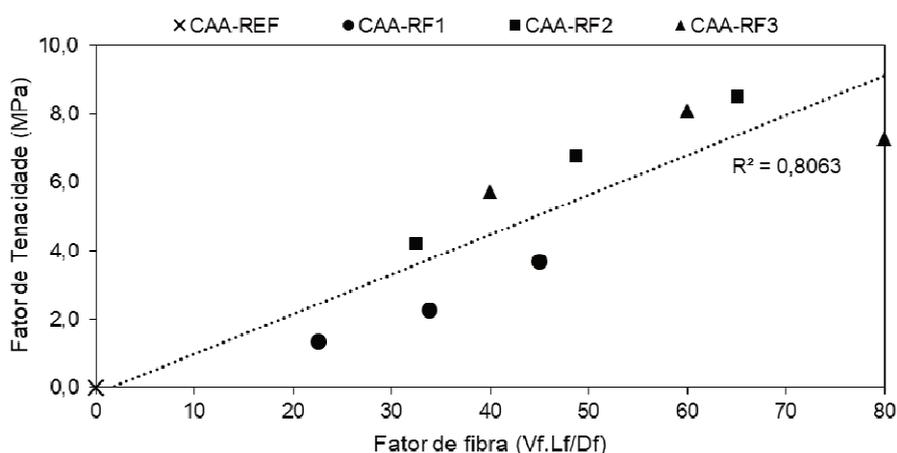
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, para as misturas RF3, a fissuração de todos os corpos de prova também ocorreu dentro do terço médio do vão. A relação entre o número de fibras presentes e a sua distribuição ao longo da seção transversal foi muito similar

para as duas amostras com teor de fibras 0,50%, evidenciado pela proximidade entre as duas curvas no gráfico carga-deslocamento destas amostras. No entanto, foi evidenciada uma discrepância em relação ao número de fibras presentes nas seções transversais entre as betonadas com teores de 0,75% e 1,00%. Verifica-se que o número de fibras presentes na amostra da segunda betonada da mistura RF3-0,75% aparentou maior do que da primeira, enquanto que o número de fibras na primeira betonada da mistura RF3-1,00% aparentou ser maior do que segunda. Neste último caso, a falta de fibras ao longo da seção transversal ficou evidente no diagrama carga-deformação, cujo corpo de prova apresentou um comportamento anômalo devido à baixa capacidade de suporte de carga ao longo do deslocamento. De modo geral, verificou-se uma melhor distribuição das fibras ao longo da seção transversal dos corpos de prova em relação aquelas reforçadas com outras fibras.

Com base nestes gráficos foi possível determinar a área abaixo da curva até o deslocamento prescrito de 3,0 mm, cujos resultados foram utilizados para determinação do fator de tenacidade de cada traço, conforme apresentado na Tabela 33. A Figura 40 apresenta uma análise comparativa da média dos fatores de tenacidade obtidos para os traços estudados em relação ao fator de fibra.

Figura 40 – Análise comparativa dos resultados de fator de tenacidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as misturas com fibras apresentaram fator de tenacidade maior do que a mistura de CAA-REF, sendo observado seu aumento com o aumento do comprimento das fibras e do seu fator de forma, assim como do teor de fibras incorporadas. Isso foi enfatizado pela alta correlação encontrada na linha de tendência que relaciona todas as misturas, verificada também para a correlação

entre as misturas reforçadas com cada tipo de fibra. Valores similares foram encontrados por outros autores como Akcay e Ali (2012) e Khayat, Kassimi e Ghoddousi (2014).

De modo a verificar a influência do tipo de fibra e do seu teor de incorporação (variáveis independentes) no fator de tenacidade (variável dependente), realizou-se uma ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – ANOVA para o fator de tenacidade

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intersecção	254,8325	1	254,8325	316,1698	0,000059
Fibra	37,5855	2	18,7928	23,3161	0,006241
Teor	11,8409	2	5,9204	7,3455	0,045799
Erro	3,2240	4	0,8060		

Onde: SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Razão entre modelo e erro; p: Nível de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

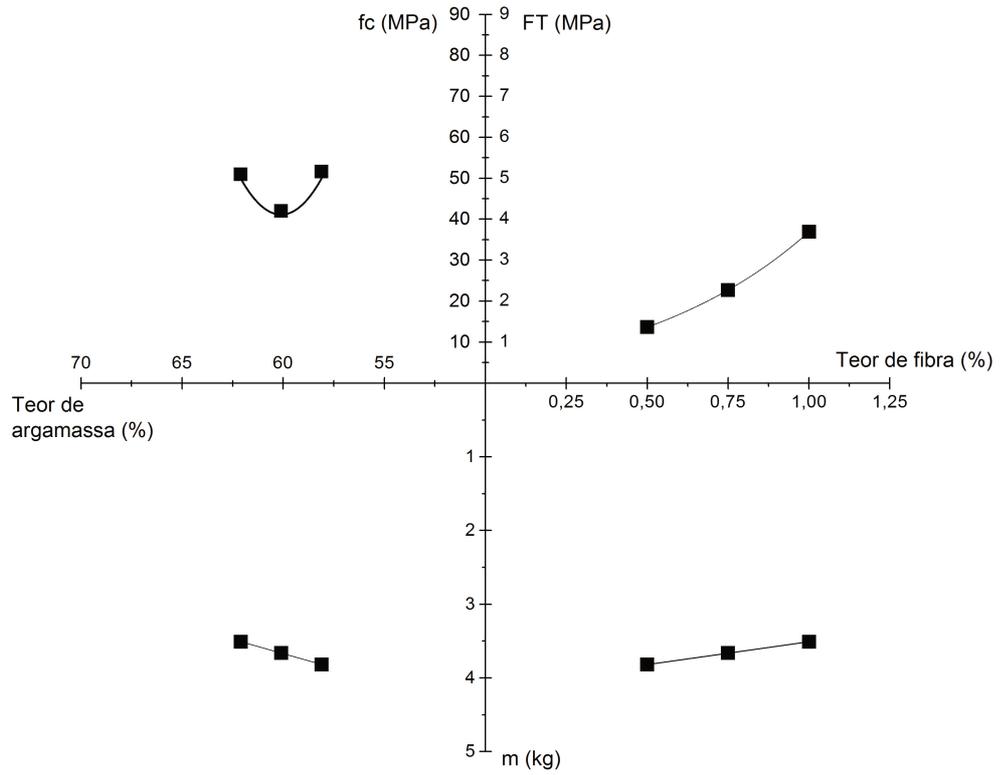
Com base nestes resultados, foi possível afirmar, com 95% de confiança, que tanto o tipo de fibra quanto o teor incorporado exercem influência significativa no fator de tenacidade das misturas dosadas com o método proposto nesta dissertação, indo ao encontro do que é relatado pela bibliografia.

4.4 DIAGRAMAS DE DOSAGEM

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos estados fresco e endurecido, procedeu-se a confecção do diagrama de dosagem proposto nesta dissertação. As Figura 41, Figura 42 e Figura 43 apresentam os diagramas de dosagem para as misturas RF1, RF2 e RF3, respectivamente. A ideia principal deste diagrama consiste em relacionar as principais propriedades mecânicas de interesse do concreto, resistência à compressão e fator de tenacidade, com a composição da mistura, pelo teor de fibras, massa total de agregados e teor de argamassa. Sabendo-se que a relação a/c e o teor de aditivo superplastificante são fixos em relação ao consumo de cimento, é possível determinar a composição da mistura com base nas propriedades mecânicas desejadas.

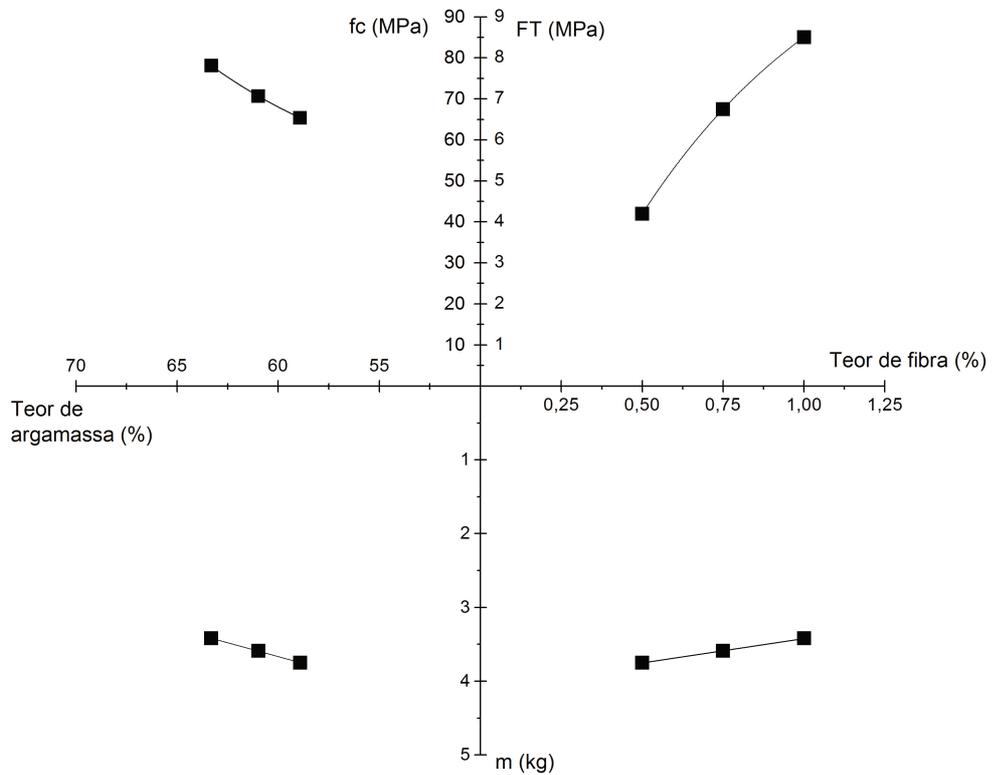
Para análise comparativa, apresenta-se na Figura 44 um diagrama-resumo, com os resultados obtidos na dosagem dos três tipos de fibra estudados neste trabalho.

Figura 41 – Diagrama de dosagem para misturas RF1



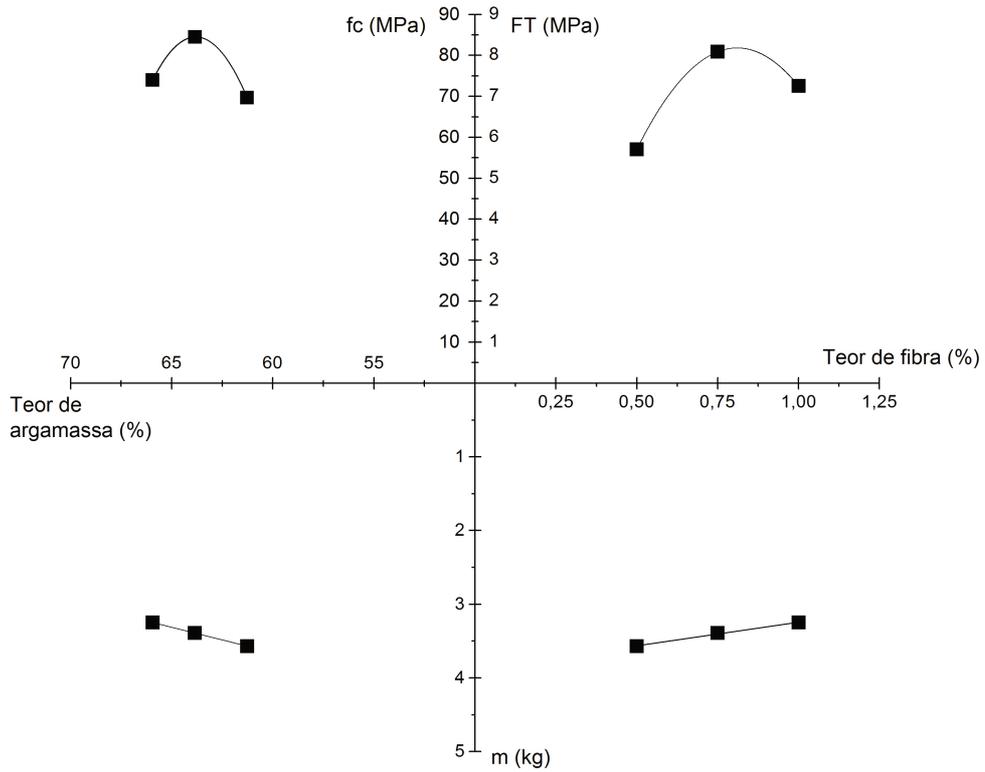
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42 – Diagrama de dosagem para misturas RF2



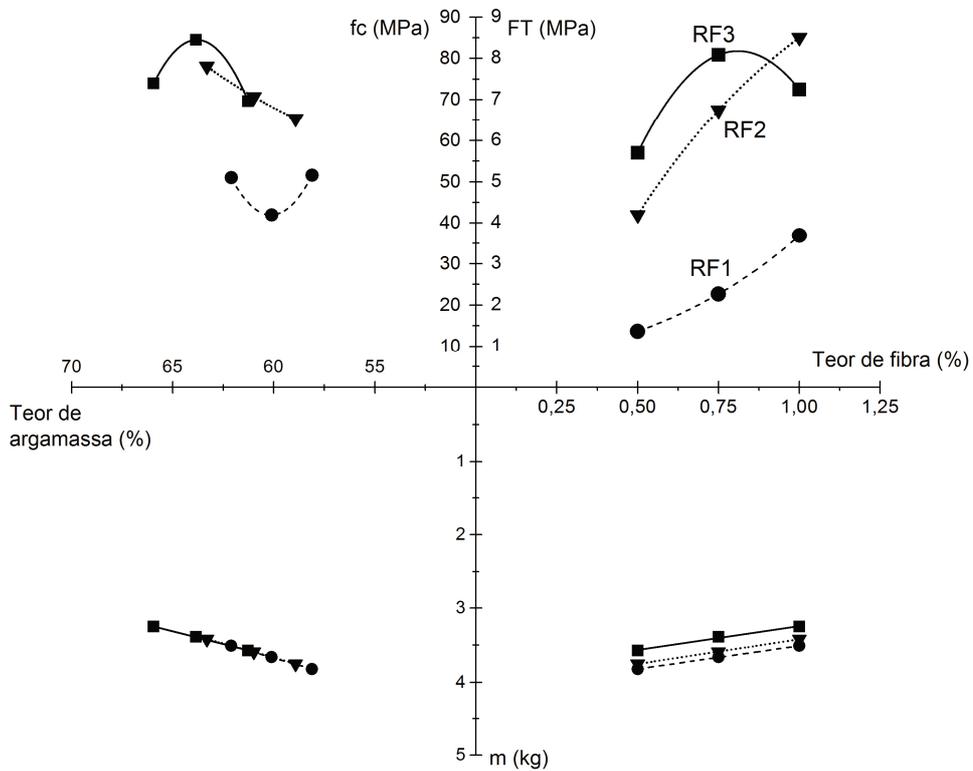
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – Diagrama de dosagem para misturas RF3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Diagrama-resumo da dosagem das misturas RF1, RF2 e RF3



Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo geral, foi possível perceber que a obtenção das propriedades mecânicas desejadas possui elevada influência do tipo de fibra, uma vez que as misturas com fibras de maior comprimento apresentaram valores muito mais altos em relação às misturas com fibras de menor comprimento. Isso enfatiza o fato de que a otimização do processo de dosagem depende do conhecimento prévio dos materiais empregados, principalmente do tipo de fibra. Caso contrário, a obtenção de misturas com determinados valores de fator de tenacidade poderão demandar teores extremamente elevados de fibras, que, além de aumentar o custo do material, pode prejudicar as suas propriedades no estado fresco.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem para concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas. A dosagem de concretos reforçados com fibras é realizada, geralmente, de modo empírico, adicionando fibras em teores pré-estabelecidos e ajustando suas propriedades reológicas, sem muito embasamento científico. Os métodos apresentados na bibliografia para incorporação de fibras no CAA são considerados complexos e com pouca viabilidade prática, principalmente pelo fato de não relacionarem suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

O método proposto nesta dissertação foi elaborado com base nos estudos desenvolvidos por outros autores, tendo como princípio a inclusão das fibras na mistura em função da área superficial dos componentes. Para isso, estabeleceu-se um modelo teórico para inclusão de fibras em uma mistura de CAA, de modo a manter a mesma espessura da camada de argamassa sobre os agregados graúdos e fibras da mistura de CAA original. Para aplicação deste modelo, foi proposto um método de dosagem que resulta em um diagrama que permite a variação do teor de fibras para obtenção das propriedades mecânicas requeridas, sem prejudicar suas propriedades no estado fresco. Para verificação de sua viabilidade, foi realizada a dosagem de misturas reforçadas com três tipos de fibras, sendo utilizados três teores de cada fibra para composição do diagrama de dosagem.

Através da aplicação do método de dosagem proposto nesta dissertação, foi possível verificar a redução do conteúdo de agregado graúdo e o aumento do conteúdo de cimento, areia fina e areia média na composição das misturas. Deste modo, a inclusão de fibras pelo método proposto ocasionou um aumento no teor de argamassa, que variou de 2,1% a 9,9%, de acordo com tipo e teor de fibras incorporadas. Além disso, verificou-se que o consumo de cimento aumentou de 439,4 kg/m³ para 495,8 kg/m², da mistura de CAA para a mistura com fibras de maior fator de forma em maior teor de incorporação. Essas alterações foram proporcionais ao tipo e teor de fibras incorporadas, onde as misturas contendo maiores teores de fibras mais longas e com maior fator de forma apresentaram maiores valores de teor de argamassa e, conseqüentemente, maior consumo de cimento.

A avaliação das propriedades das misturas no estado fresco permitiu verificar que a maior parte das misturas atendeam às classes SF3, VS1 e VF1 da NBR

15823-1 (ABNT, 2017a) para os ensaios de espalhamento, t_{500} e funil V, respectivamente. A análise de variância revelou, a um grau de significância de 95%, que estes tipos e teores de fibras, incorporadas pelo método proposto, não apresentaram influência significativa sobre estas propriedades. No entanto, foi possível verificar que misturas com maiores teores de fibras mais longas e com maior fator de forma apresentaram maior perda de estabilidade e de dispersão das fibras, evidenciando a ocorrência de segregação das fibras. Para incorporações em teores na ordem de 1,00%, verificou-se que o IEV das misturas chegou a ser 2 ou 3, enquanto que o IDF chegou a 7,53%. A mesma análise de variância revelou que tanto o tipo quanto o teor de fibras apresentaram influência significativa sobre a estabilidade visual da mistura e distribuição das fibras.

Observa-se, assim, que o aumento do teor de argamassa das misturas para manter a mesma espessura de argamassa sobre os agregados graúdos e as fibras compensou a perda de trabalhabilidade para misturas com menores teores de incorporação de fibras menores. Apesar de este aumento não ter alterado algumas classificações, foi possível identificar a redução da estabilidade da mistura, que ocasionaram a segregação das fibras em algumas misturas e afetaram a sua dispersão dentro do material. Sendo assim, é possível afirmar que existe uma limitação na dosagem de misturas com fibras de comprimento na ordem de 60 mm em teores na ordem de 1,00% para melhor atender aos critérios de estabilidade da mistura e dispersão das fibras.

Avaliando as propriedades mecânicas das misturas, foi possível constatar que a incorporação de fibras pelo método proposto contribuiu para o aumento das propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão e fator de tenacidade. A resistência à compressão das amostras com fibras de comprimento 30 mm apresentaram pouca alteração na resistência à compressão, porém misturas com o uso de fibras de comprimento 60 mm alcançaram valores na ordem 84,5 MPa. Isso pode estar atrelado ao confinamento das fibras no interior dos moldes cilíndricos, ocasionando a orientação das fibras em diferentes planos de fissuração. Sendo assim, pode-se dizer que a utilização de corpos de prova cilíndricos, com dimensões 10x20 cm, são inadequadas para avaliação de concretos reforçados com fibras de comprimento de 60 mm.

O módulo de elasticidade da mistura de CAA-REF foi de aproximadamente 30 GPa, sendo este valor muito próximo aos resultados encontrados para as misturas

com incorporação de fibras. Não foi possível identificar a influência do tipo ou do teor de fibras incorporadas. Cabe ressaltar que este valor é considerado baixo para concretos convencionais nesta faixa de resistência à compressão, o que pode ter sido influenciado pelo aumento do teor de argamassa das misturas, sendo esta redução ainda maior para misturas com fibras.

No ensaio de flexão de corpos de prova prismáticos, verificou-se um pequeno aumento da resistência à tração na flexão com o aumento no fator de fibra. No entanto, a análise de variância desta propriedade não identificou influência significativa das variáveis contempladas neste estudo. Para o fator de tenacidade, obtido a partir do diagrama carga-deformação, foi observado um aumento desta propriedade com o aumento do teor de fibras de maior comprimento e maior fator de forma, enfatizado a influência destes dois fatores nas propriedades do compósito que também foi constatada por meio da análise de variância.

Analisando a seção fissurada dos corpos de prova, foi possível verificar que as misturas que apresentaram menor estabilidade no estado fresco apresentaram uma distribuição de fibras heterogênea, evidenciando a ocorrência de sua segregação. Além disso, foi possível observar no diagrama carga-deformação de algumas amostras que a segregação das fibras ocasionou a perda da capacidade resistente do material, conduzindo a valores mais baixos de fator de tenacidade para algumas betonadas.

De modo geral, é possível perceber que a aplicação do conceito de espessura da camada de argamassa sobre os componentes sólidos não foi completamente suficiente para solucionar os problemas da incorporação das fibras metálicas no estado fresco. Apesar de alguns resultados obtidos no estado endurecido serem satisfatórios e permitirem a sua aplicação no diagrama de dosagem proposto, é possível observar que existe uma limitação para incorporação de fibras com comprimento na ordem de 60 mm em misturas de CAA, que pode estar tanto atrelada ao método de dosagem proposto como à união destas tecnologias.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho verificou-se a possibilidade de continuação desta pesquisa através de outros trabalhos que pudessem contribuir para o

desenvolvimento metodológico de concretos autoadensáveis reforçados com fibras, sendo eles:

- a) aplicar o método de dosagem proposto nesta dissertação para misturas com fibras de outras naturezas, como as poliméricas, ou ainda outras características geométricas, como as multifilamentos e sem ancoragem;
- b) aplicar o método de dosagem proposto nesta dissertação para misturas com outros tipos de agregados, cimentos e aditivos químicos para verificar a sua influência nos resultados obtidos;
- c) adaptar o método proposto para incluir conceitos relacionados a massa específica dos materiais e fator de forma das fibras e dos agregados, de modo a prevenir a segregação das fibras com maior comprimento e fator de forma.

REFERÊNCIAS

- AFROUGHSABET, V.; OZBAKKALOGLU, T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. **Construction & Building Materials**, v. 94, p. 73–82, 2015.
- AİTCIN, P. C. Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349–1359, 2000.
- AİTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5 SPEC, p. 409–420, 2003.
- AİTCIN, P.; FLATT, R. J. **Science and Technology of Concrete Admixtures Edited by**. Cambridge: Woodhead, 2016.
- AKCAY, B.; ALI, M. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 287–293, 2012.
- ALENCAR, R. **Dosagem do CAA para produção de pré-fabricados**. 2008. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 544.1R-96**: Report on Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, 2009.
- _____. ACI 212.3: Report on Chemical Admixtures for Concrete. Farmington Hills, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C29-12**: Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. West Conshohocken, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Estudo Técnico**: Parâmetros de Dosagem do Concreto. São Paulo: ABCP, 1984a. 34 p.
- _____. **Estudo Técnico**: Reologia e Trabalhabilidade dos Concretos. São Paulo: ABCP, 1984b. 94 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

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

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **NBR 15823-2:** Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do conde de Abrams. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. **NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017c.

_____. **NBR 15823-3:** Concreto auto-adensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017d.

_____. **NBR 15823-4:** Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2017e.

_____. **NBR 15823-6:** Concreto auto-adensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2017f.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017g.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): Fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**, v. 37, n. December, p. 707–716, 2004.

BASHEERUDEEN, A.; ANANDAN, S. Simplified Mix Design Procedures for Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete. **ENGINEERING JOURNAL**, v. 19, n. 1, p. 21–36, 2015.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Nova Iorque: 2. ed. Taylor & Francis, 2007.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de cimento Portland**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.

BROWN, D. **Origem**. Arqueiro, 2017.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y.; SHAH, S. P. Rheological model for self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 6, p. 549–559, 2002.

BUI, V. K.; GEIKER, M. R.; SHAH, S. P. **Rheology of fiber-reinforced cementitious materials**. In: NAAMAN, A.; RHEINHARDT, H.W. (Org.). **Proceedings HPFRCC4**. Paris: RILEM Pubs., 2003. p. 221–231.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2713–2722, 2011.

CASTRO, A. L. D. E. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2007.

CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, v. 57, p. 63–75, 2011.

DACZKO, J. A. **Self-consolidating concrete: applying what we know**. Nova Iorque: Spon Press, 2012.

DE LARRARD, F. **Concrete mixing proportioning: a scientific approach**. Nova Iorque: Routledge, 1999.

DESNERCK, P. et al. Mechanical Properties. In: KHAYAT, K.; DE SCHUTTER, G. (Org.). **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. 1. ed. New York: Springer, 2014. p. 299–334.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Londres: EFNARC, fev. 2002.

EMBORG, M. Rheology tests for self-compacting concrete – How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production? Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 95-105

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EN).. **EN 14651**: Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels, 2007.

FERRARA, L. Fiber Reinforced SCC. In: KHAYAT, K.; DE SCHUTTER, G. (Org.). **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. New York: Springer, 2014. p. 161–219.

FERRARA, L.; PARK, Y.; SHAH, S. P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 37, p. 957–971, 2007.

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, p. 461, 1999.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fire design of concrete structures** – materials, structures and modeling – state-of-art report. Lausanne: fib, 2007. 97 f. (Bulletin d'information, 38).

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000. 70 f.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v, cap. 37.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 248 f. Tese (Livre-Docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

GOŁASZEWSKI, J.; SZWABOWSKI, J. Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 235–248, 2004.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009.

GRABOIS, T. M. **Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

GRÜNEWALD, S. **Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete**. 2004. 233 f. Doctoral Thesis – Technische Universität Darmstadt. Duitland, 2004.

GUIMARÃES, D. **Pisos industriais em concreto**: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos. 2010. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992.

HOOTON, R. D.; BICKLEY, J. A. Design for durability : The key to improving concrete sustainability. **Construction & Building Materials**, v. 67, p. 422-430, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Prática Recomendada Ibracon**: Concreto Autoadensável. Casaleria: São Leopoldo, 2015.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). **JSCE SF4**: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. Japan, 1984.

KHALOO, A. et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 179–186, 2014.

KHAYAT, K. H.; DACZKO, J. **The holistic approach to self-consolidating concrete**. In: North American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 1., 2002, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2002.

KHAYAT, K.; DE SCHUTTER, G. **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. 1. ed. New York: Springer, 2014.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete Utility of statistical models in proportioning self- consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 33, p; 338-344, 2000.

KHAYAT, K. H.; KASSIMI, F.; GHODDOUSI, P. Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 2, p. 143-152, 2014.

KHAYAT, K. H.; ROUSSEL, Y. Testing and performance of fiber-reinforced , self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 33, p. 391-397, 2000.

KLINGSCH, E. W. H. **Explosive spalling of concrete in fire**. 2014. 252 f. Dissertation (Doctor of Sciences) -- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Zürich, 2014.

LEE, M. K.; BARR, B. I. G. Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete, **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 321–332, 2003.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.

MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 226–234, 2010.

MEHTA, P. K., MONTEIRO P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2005.

MONTE, R. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, p. 13, 2008.

MONTE, R.; BARBOZA, A. S. R. Controle tecnológico do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. **Concreto & Construções**, v. 87, p. 33–38, 2017.

MOOSBERG-BUSTNES, H. Characterization of filler. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 540-550.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1998.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto. Porto, 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

PAJA, M.; PONIKIEWSKI, T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. **Construction & Building Materials**, v. 47, p. 397–408, 2013.

OLIVEIRA, L. A. P. et al. Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 642–649, 2013.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adição híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland**. 2 ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 128 p.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. *In*: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v, cap. 48.

ROMANO, R. C.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco. *In*: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v, p. 453–500.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes**. 2000. 208 f. Doctoral Thesis -- Escola d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2000.

ROUSSEL, N. **Understanding the rheology of concrete**. Cambridge: Woodhead, 2012.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 429–439, 2001.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, v. 18, n. 2, p. 1273–1285, 2013.

SHI, C. et al. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction & Building Materials**, v. 84, p. 387–398, 2015.

SILVA, A. S. M. D. S. **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faurý modificado**. 2004. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, G. C. S. **Análise da influência da adição de fibras metálicas nas propriedades do concreto autoadensável**. 2016. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2016.

SU, N.; HSU, K.; CHAI, H. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1799–1807, 2001.

TABATABAEIAN, M. et al. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 497–509, 2017.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno**. Boletim técnico da Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo (USP). Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1999. 25 f.

THANON, E.; RAMLI, M. Contribution of Hybrid Fibers on The Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 814–820, 2011.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. 2007. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **CONCRETO AUTOADENSÁVEL**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v, cap. 12.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. *In*: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v, cap. 13.

TUTIKIAN, B. F.; PACHECO, M. Concreto autoadensável (CAA) - comparativo entre métodos de dosagem. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 4, p. 500–529, 2012.

WU, Q.; AN, X. Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 642–651, 2014.

YEHIA, S.; DOUBA, A.; ABDULLAHI, O.; FARRAG, S. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 120–133, 2016.

YEN, T.; TANG, C.W.; CHANG, C.S.; CHEN, K.H. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. July, 1999.

ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced Concrete : an Overview after 30 Years of Development. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 107–122, 1997.