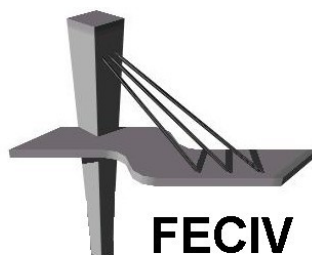


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA FLUÊNCIA À COMPRESSÃO DE
CONCRETOS COM FIBRAS METÁLICAS COM
CLASSES DE RESISTÊNCIAS DE 25 E 50 MPa**

PAULO VÍTOR CAMIN PENA

UBERLÂNDIA, 28 DE MARÇO DE 2019



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Paulo Vítor Camin Pena

**ANÁLISE DA FLUÊNCIA À COMPRESSÃO DE
CONCRETOS COM FIBRAS METÁLICAS COM CLASSES
DE RESISTÊNCIAS DE 25 E 50 MPa**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos

Uberlândia, 28 de Março de 2019.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P397a Pena, Paulo Vítor Camin, 1991-
2019 Análise da fluência à compressão de concretos com fibras metálicas
com classes de resistências de 25 e 50 Mpa [recurso eletrônico] / Paulo
Vítor Camin Pena. - 2019.

Orientador: Antônio Carlos dos Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.977>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Concreto - Fluência. 3. Concreto. 4. Fibras de
metal. I. Santos, Antônio Carlos dos, 1968-, (Orient.) II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDU:624

Glória Aparecida – CRB-6/2047



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, PPGEC - 237				
Data:	28 de março de 2019	Hora de início:	[13:30]	Hora de encerramento:	[17:00]
Matrícula do Discente:	11712ECV007				
Nome do Discente:	Paulo Vitor Camin Pena				
Título do Trabalho:	Análise da fluência à compressão de concretos com fibras metálicas com classe de resistência de 20 e 40 MPa				
Área de concentração:	Estruturas e Construção Civil				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Recuperação e reforço de elementos estruturais				

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta: Professores Doutores: Andrielli Moraes de Oliveira – EECA/UFG, Antônio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU e Antonio Carlos dos Santos - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Antonio Carlos dos Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

[A]provado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/04/2019, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio de Paulo Peruzzi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/05/2019, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Usuário Externo**, em 06/05/2019, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1099115** e o código CRC **018BCFBC**.

Pena, P. V. C. *Análise da fluência à compressão de concretos com fibras metálicas com classes de resistências de 25 e 50 MPa.* 133 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

RESUMO

As propriedades dependentes do tempo nos materiais, como a fluência e a retração, relacionam-se diretamente às condições de durabilidade, segurança e desempenho das estruturas. A fluência do concreto é definida como a deformação observada ao longo do tempo ocasionada por uma tensão constante aplicada ao elemento. Tal deformação é causada principalmente pela movimentação ou remoção da água na pasta de cimento. É objetivo deste trabalho analisar a influência da adição de fibras de aço nos concretos com classe de resistência de 25 e 50 MPa quanto à fluência quando submetido à compressão. Para tanto, empregou-se um aparato experimental capaz de determinar a fluência em corpos de prova de concreto de maneira simplificada, descartando a utilização de extensômetros internos no concreto e dispositivos complexos, permanecendo dentro dos preceitos da ACI 209.2R, CEB MC90-99 e ABNT NBR 8224:2012. Foram ensaiados concretos convencionais com resistência característica à compressão de 25 e 50 MPa, com adição de fibras de aço nos teores de 30, 40, 50 e 60 kg/m³, os quais correspondem a 0,38%, 0,50%, 0,64% e 0,77% em volume. O ensaio foi realizado em corpos de prova de concreto com idade de 28 dias, submetidos à tensão de compressão equivalente à 35% da resistência última estimada, em local com condições de temperatura e umidade relativa do ar controladas. A duração do ensaio foi de 90 dias, com coleta diária de dados.

Palavras-chave: fluência, compressão, aparato, concreto, fibras de aço

Pena, P. V. C. *Análise da fluência à compressão de concretos com fibras metálicas com classes de resistências de 25 e 50 MPa.* 133 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The time dependent properties of materials, such as creep and retraction, are directly related to the durability, safety and performance of structures. The creep of the concrete is defined as the deformation observed over time caused by a constant tension applied to the element. Such deformation is caused mainly by the movement or removal of water in the cement paste. It is objective of this work to analyze the influence of the addition of steel fibers on concretes with resistance class of 25 and 50 MPa about creep when subjected to compression. For this, an experimental apparatus was used to determine the creep in concrete specimens in a simplified way, discarding the use of internal extensometers in concrete and complex devices, remaining within the precepts of ACI 209.2R, CEB MC90-99 and ABNT NBR 8224:2012. Conventional concretes with compressive strength of 25 and 50 MPa were tested with addition of steel fibers in the contents of 30, 40, 50 and 60 kg/m³, wich correspond to 0.38%, 0.50%, 0.6% and 0.77% by volume. The test was performed in concrete test specimens aged 28 days, submitted to compression stress equivalent to 35 % of the estimated ultimate resistance, in a room with controlled temperature and relative humidity conditions. The duration of the test was 90 days, with daily data collection.

Keywords: compressive creep, device, concrete, steel fibers

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador professor doutor Antônio Carlos dos Santos, pelos sábios ensinamentos, dedicação, colaboração e confiança no meu esforço, sem o apoio do senhor este objetivo não teria sido alcançado.

Agradeço a Deus por me dar saúde para que eu possa percorrer o meu caminho.

A minha mãe e ao meu pai por me darem amor incondicional, motivação e coragem para alcançar meus objetivos e a enfrentar os obstáculos sempre com visão otimista.

A Daniela por me dar amor e sempre estar ao meu lado me apoiando nos momentos mais difíceis.

As minhas irmãs, avós, Graciana e Luiz, por estarem sempre ao meu lado tornando meus dias mais felizes.

Aos meus padrinhos Ronaldo e Tida que desde o início de minha jornada confiaram na minha capacidade e empenho.

Aos meus tios e primos pelo amor e carinho.

A todos os meus amigos, especialmente ao Luis Stasiak, Igor Cortes, Gabriel Peres e Marcello Paniago pela amizade, apoio e ajuda durante minha trajetória na pós-graduação.

A equipe da Geoteste, em especial ao Matheus Alves e ao Thalles Eduardo, pela disponibilização dos recursos necessários para execução desta pesquisa.

Aos professores da pós-graduação da faculdade de engenharia civil, por ampliarem a minha visão de engenharia, especialmente a professora doutora Andrielli Moraes de Oliveira.

A Cristiane Pires cuja a ajuda foi determinante para a realização desta pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado pela força e companheirismo durante o curso.

A Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao departamento de engenharia civil e aos seus funcionários.

As empresas Belgo Bekaert Arames e Basf pelo incentivo a esta pesquisa com a doação das fibras de aço e do aditivo superplastificante.

A CAPES pelo apoio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos tipos de compósitos segundo Callister Jr.	23
Figura 2 – Seção longitudinal e transversal de diferentes tipos de fibras de aço	25
Figura 3 – Formação de ouriços devido à mistura inadequada das fibras no concreto	27
Figura 4 – Relação resistência à compressão versus volume de fibras de aço no concreto	28
Figura 5 – Aumento da resistência à compressão com o aumento do volume de fibras	29
Figura 6 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto reforçado com fibras de aço.....	30
Figura 7 – Aumento no módulo de elasticidade nas idades de 4, 7 e 28 dias	31
Figura 8 – Comportamento mecânico de matrizes de concreto sem e com adição de fibras de aço.....	31
Figura 9 – Deformação total do concreto ao longo do tempo	32
Figura 10 – Resultante das tensões atuantes no concreto	35
Figura 11 – Deformação e recuperação de fluência no concreto	36
Figura 12 – Influência do tipo de cimento na deformação por fluência do concreto	40
Figura 13 – Determinação da fluência em condição selada e com exposição ao meio	41
Figura 14 – Efeito da idade do carregamento na fluência à compressão do concreto.....	42
Figura 15 – Aumento súbito na fluência após fissuração de amostra	43
Figura 16 – Fluência específica <i>versus</i> tempo de corpos de prova de SHCC com carga tensão imposta de (a) 60% e (b) 80%	44
Figura 17 – Fluência específica do concreto compostos de diferentes agregados graúdos.	47
Figura 18 – Fluência do concreto à níveis de carga de (a) 30% e (b) 50% da resistência última	47
Figura 19 – Fluência específica de concreto reforçado com fibras de aço.....	48
Figura 20 – Fluência do concreto reforçado com fibras de aço longas	49
Figura 21 – Redução da fluência devido às fibras de aço	50
Figura 22 – Resultados experimentais de fluência no concreto	51
Figura 23 – Variação da fluência de acordo com o teor de fibras e a temperatura, com idade de carregamento de 28 dias	51
Figura 24 – Influência de diferentes tipos e teores de fibras de aço na fluência do concreto	52

Figura 25 – Fluência básica em concreto auto adensável reforçado com fibras de aço	54
Figura 26 – Comparação de resultados da fluência na tração	55
Figura 27 – Resultados de fluência específica na tração	56
Figura 28 – Variação do coeficiente de deformação lenta irreversível	61
Figura 29 – Posicionamento dos extensômetros, discos metálicos e jaqueta.....	63
Figura 30 – Método de determinação do coeficiente de fluência para concreto	66
Figura 31 – Fluxograma das variáveis em análise do programa experimental	71
Figura 32 – Fibras de aço Dramix RC 65/35 BN	76
Figura 33 – Fibras de aço agrupadas em forma de pentes.....	79
Figura 34 – Determinação da consistência do concreto no estado fresco	80
Figura 35 – Corpos de prova moldados com CRFA	81
Figura 36 – Retificação das superfícies de ensaio dos corpos de prova.....	82
Figura 37 – Curva de secagem de corpos de prova da série C25 à temperatura de 60 °C ..	83
Figura 38 – Selagem dos corpos de prova com fita de alumínio e plástico filme	83
Figura 39 – Ensaio para determinação da resistência à compressão	84
Figura 40 – Ensaio para determinação da resistência à tração	86
Figura 41 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade longitudinal	87
Figura 42 – Aparatos utilizados para ensaio de fluência à compressão	88
Figura 43 – Aparato em escala reduzida	89
Figura 44 – Ensaio de módulo de elasticidade da barra roscada	90
Figura 45 – Aparato experimental	91
Figura 46 – Validação das leituras das células de carga.....	92
Figura 47 – Medição dos deslocamentos por meio de LVDTs	93
Figura 48 – Apartos experimentais carregados em mesmas condições.....	94
Figura 49 – Armazenamento dos aparatos em câmara fechada.....	94
Figura 50 – Deformação imediata e fluência específica referente a série C25	108
Figura 51 – Fluência específica das dosagens da série C25	109
Figura 52 – Deformação imediata e fluência específica referente a série C05	110
Figura 53 – Evolução da deformação divergente da dosagem C50-0,64%.....	112
Figura 54 – Fluência específica das dosagens da série C50	112
Figura 55 – Comparação de fluência para as classes de resistência de 25 e 50 MPa.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das análises experimentais de fluência do concreto	46
Tabela 2 – Valores numéricos para determinação da fluência	59
Tabela 3 – Valores para determinação do coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento.....	60
Tabela 4 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada dosagem e ensaio.....	72
Tabela 5 – Caracterização do Cimento <i>Portland</i> CP II-F-40	73
Tabela 6 – Caracterização dos agregados miúdos	73
Tabela 7 – Caracterização dos agregados miúdos utilizados por Vítor (2018).....	74
Tabela 8 – Caracterização dos agregados graúdos	74
Tabela 9 – Caracterização dos agregados graúdos utilizados por Vítor (2018)	75
Tabela 10 – Caracterização do aditivo superplastificante	75
Tabela 11 – Verificação dimensional das fibras de aço	76
Tabela 12 – Consumo de materiais para as séries C20 e C40	77
Tabela 13 – Proporcionamento dos materiais utilizados para produção do concreto	78
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone e massa específica .	80
Tabela 15 – Quantidade de corpos de prova moldados para determinação da taxa de secagem da umidade interna.....	82
Tabela 16 – Propriedades mecânicas do aço-carbono SAE 1045	90
Tabela 17 – Variação das leituras das células de carga de acordo com leitura do anel dinamométrico.....	92
Tabela 18 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias.....	97
Tabela 19 – Aumento ou redução na resistência à compressão média aos 28 dias.....	98
Tabela 20 – Valores de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	99
Tabela 21 – Aumento na resistência à tração por compressão diametral média	99
Tabela 22 – Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias	100
Tabela 23 – Aumento ou redução do módulo de elasticidade médio.....	101
Tabela 24 – Quantidade de água perdida para o ambiente	102
Tabela 25 – Carga aplicada no ensaio de fluência.....	104
Tabela 26 – Valores de deformação imediata referente ao início do carregamento.....	105
Tabela 27 – Valores teóricos e experimentais de coeficiente de fluência do concreto	114

Tabela 28 – Valores teóricos e experimentais de deformação imediata e fluência.....	115
Tabela 29 – Correlação das propriedades do concreto	115

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras romanas

A_c – área da seção transversal;

$C(t, t_0)$ – fluência específica;

D – diâmetro do corpo de prova;

E_c – módulo de elasticidade do compósito;

E_{ci} – módulo de elasticidade ou deformação inicial do concreto;

E_{cm} – módulo de elasticidade secante do concreto, aos 28 dias;

E_f – módulo de elasticidade da fibra;

E_m – módulo de elasticidade da matriz;

f_c – resistência à compressão;

F_{cr} – carga máxima alcançada;

$F_{(i)}$ – carga inicial;

$F_{(t)}$ – carga no instante t ;

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto;

f_t – resistência à tração do concreto;

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral;

h_{fic} – espessura fictícia;

$J(t, t_0)$ – função de fluência;

l_{cp} – comprimento do corpo de prova.

M_s – massa seca;

M_u – massa úmida;

t – idade do concreto no instante considerado no ensaio;

t – idade fictícia;

t_{ef} – período em que a temperatura média diária do ambiente, pode ser admitida constante;

t_0 – idade do concreto no momento da aplicação da carga de ensaio;

U – umidade relativa;

U – umidade;

u – perímetro da superfície que está exposta;

u_{ar} – perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar.

V_f – fração volumétrica da fibra;

V_m – fração volumétrica da matriz;

Letras gregas

α – coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento;

ε_a – deformação específica médias dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa);

ε_b – deformação específica média do corpo de prova sob a tensão maior;

β_d – coeficiente relativo à deformação lenta reversível;

β_f – coeficiente relativo a deformação lenta irreversível;

γ – coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente;

ε_c – deformação imediata;

ε_{cc} – deformação por fluência;

ε_{cca} – deformação por fluência rápida;

ε_{ccd} – deformação por fluência lenta reversível;

ε_{ccf} – deformação por fluência lenta irreversível;

ε_{cs} – deformação por retração;

ε_t – deformação total;

ε_{vs} – deformação visco-elástica;

φ_{1c} – coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente;

φ_{2c} – coeficiente dependente da espessura fictícia;

$\varphi(t, t_0)$ – coeficiente de fluência;

φ_a – coeficiente de fluência rápida;

$\varphi_{d\infty}$ – valor final do coeficiente de deformação lenta reversível;

$\varphi_{f\infty}$ – valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

φ_{nl} – coeficiente de fluência não-linear;

φ_0 – coeficiente de fluência teórico;

φ_{RH} – fator de efeito da umidade relativa no coeficiente de fluência teórico;

σ_c – tensão à compressão no concreto;

σ_c – tensão unidirecional no compósito;

σ_f – tensão atuante na fibra;

σ_m – tensão atuante na matriz;

Abreviaturas

CC – célula de carga;

C-S-H – silicato de cálcio hidratado;

CRF – concreto reforçado com fibras;

CRFA – concreto reforçado com fibras de aço;

LVDT – *linear variable differential transformers*;

pH – potencial hidrogeniônico;

PP – polipropileno;

PVA – poliacetato de vinila.

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACI – *American Concrete Institute*;

CEB – *Comité Euro-International Du Béton*;

EN – *European Standard*;

FECIV/UFU – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia;

SAE – *Society of Automotive Engineers* (EUA);

NBR – Norma Brasileira;

PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil;

RILEM – *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*;

UFU – Universidade Federal de Uberlândia.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Importância do tema	19
1.2 Objetivos	21
1.3 Organização do trabalho	21
2 DEFORMAÇÕES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	23
2.1 Materiais compósitos	23
2.2 Concreto reforçado com fibras	24
2.2.1 Fase matriz	24
2.2.2 Fase fibra	24
2.2.3 Interação fibra-matriz	25
2.3 Concreto reforçado com fibras de aço	26
2.3.1 Propriedades no estado fresco	26
2.3.2 Propriedades no estado endurecido	27
2.3.2.1 Resistência à compressão	28
2.3.2.2 Resistência à tração	29
2.3.2.3 Módulo de elasticidade ou deformação	30
2.3.2.4 Tenacidade	31
2.4 Deformações dependentes do tempo no concreto	32
2.5 Retração	33
2.6 Fluência	34
2.6.1 Origens da fluência	37
2.6.2 Fatores intervenientes	39
2.6.2.1 Materiais	39
2.6.2.2 Temperatura	40
2.6.2.3 Umidade relativa da atmosfera	40
2.6.2.4 Níveis de tensões	42
2.6.2.5 Idade de carregamento	42

2.6.2.6 Integridade das amostras	43
2.6.3 Redução da fluência.....	44
2.7 Fluência do concreto reforçado com fibras	44
2.8 Recomendações normativas	57
2.8.1 NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento	57
2.8.2 NBR 8224:2012 – Concreto Endurecido – Determinação da Fluência.....	62
2.8.3 ACI Committe 209.2R-08 – Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete.....	64
2.8.4 CEB Model Code 2010 - Design Code e EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures	65
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1 Introdução.....	70
3.2 Planejamento experimental.....	71
3.3 Materiais	72
3.3.1 Aglomerante	72
3.3.2 Agregado miúdo	73
3.3.3 Agregado graúdo	74
3.3.4 Aditivo	75
3.3.5 Fibras de aço.....	76
3.3.6 Água	77
3.4 Concretos estudados	77
3.5 Produção, moldagem, cura e preparação dos corpos de prova.....	78
3.6 Ensaio de caracterização	84
3.6.1 Resistência à compressão (f_c)	84
3.6.2 Resistência à tração por compressão diametral (f_t, D).....	85
3.6.3 Módulo de elasticidade longitudinal (E_{ci}).....	86
3.7 Fluência	88
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	97
4.1 Introdução.....	97
4.2 Resistência à compressão	97
4.3 Resistência à tração por compressão diametral	99
4.4 Módulo de elasticidade.....	100
4.5 Fluência	102

4.5.1 Qualidade do selo	102
4.5.2 Níveis de tensão	104
4.5.3 Deformação imediata.....	105
4.5.4 Deformação por fluência	107
5 CONCLUSÃO.....	118
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A	128
APÊNDICE B.....	130
APÊNDICE C	131
APÊNDICE D	132
APÊNDICE E.....	133
APÊNDICE F	134

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

A busca para alcançar níveis mais elevados de desempenho mecânico nos leva à utilização de novos materiais, muitas vezes originados da combinação de materiais conhecidos.

As propriedades dos materiais e suas possíveis combinações tem sido objeto de estudo para o desenvolvimento de materiais compósitos (CALLISTER JR., 2008). Com o surgimento de novos materiais e compósitos, torna-se importante buscar o conhecimento do comportamento destes materiais, quanto aos diferentes estados de tensões aos quais são impostos.

O concreto é um material com inúmeras vantagens de aplicações e de conhecimento no meio técnico científico, assim como seu uso potencial nas condições aos quais é submetido, como elevadas ou baixíssimas temperaturas, radiação, umidade *etc.* Essas condições de exposição influenciam diretamente no desempenho mecânico do concreto.

Observações recentes, como deformações excessivas ao longo de décadas, fissurações extensas e flambagem, comprovam que a fluência e a retração podem comprometer seriamente a utilização, a durabilidade e a sustentabilidade (HUBLER; WENDNER; BAŽANT, 2015).

Apesar de haver diversas pesquisas sobre a fluência do concreto, ainda há muito a ser compreendido sob o comportamento do concreto reforçado com fibras quanto à fluência, pois são vários os fatores influenciadores no desempenho do material, como a classe de resistência, o teor de fibras adicionado ao concreto, o tipo de material utilizado na dosagem, o tempo de cura, a idade de carregamento *etc.*

Nesta pesquisa são analisados e comparados os comportamentos do concreto simples (sem fibras) e do concreto reforçado com fibras de aço quando sujeitos à fluência na compressão a fim de determinar a influência do reforço das fibras de aço e ampliar o conhecimento sobre as deformações dependentes do tempo.

O efeito Rüsç é um coeficiente de minoração da resistência de projeto do concreto à compressão que leva em conta os efeitos deletérios da ação das cargas de longa duração combinado com o efeito benéfico de crescimento da resistência do concreto com o tempo (FILHO; HELENE, 2011). A redução das deformações ao longo do tempo do concreto implicaria num ganho de tensão admissível de cálculo do concreto, apresentando vantagens como a redução do consumo de materiais, redução de dimensões das peças estruturais *etc.*

Normalmente, erros na previsão da fluência não ocasionam o colapso estrutural, entretanto o aumento de flechas e deformações decorrentes destes erros, além dos limites aceitáveis para uso em serviço, pode levar à interdição da estrutura (MILLER, 2008).

Conforme apresentado na RILEM TC 107 (1998), a grande diversificação dos componentes do concreto, como os reforços com fibras, por exemplo, é acompanhada por uma diversificação no comportamento das propriedades do concreto dependentes do tempo, em particular a fluência. Desta forma, os valores de fluência passam a ser determinantes, em certos casos, como critério de seleção dos materiais.

Em pontes e viadutos, a consideração da fluência é de grande importância nos processos construtivos com esquemas evolutivos, ou seja, que se modificam com o tempo, como na técnica construtiva dos balanços sucessivos, em que as deformações da estrutura são rigorosamente controladas (KHOURI, 2001).

Segundo Long e Khayat (2011), o conhecimento da fluência é importante na elaboração de projetos de estruturas de concreto protendido. A fluência é responsável pela deformação do concreto ao longo do tempo, que ocasiona a mudança de comprimento dos cabos de protensão, resultando na redução da tensão de protensão e no aumento das flechas em membros fletidos, como vigas protendidas de pontes.

Segundo Hubler, Wendner e Bažant (2015), um grande obstáculo na concepção de projetos de grandes pontes e muitas outras estruturas de grande porte é a falta de dados laboratoriais referentes a ensaios de fluência de longas durações.

As deformações excessivas por fluência do concreto são responsáveis pelo surgimento de fissuras e prejuízos na utilização da estrutura. Como, por exemplo, em pilares submetidos à carregamento com presença de excentricidades, a fluência pode causar aumentos de deformações, conduzindo a uma flambagem do elemento estrutural.

De acordo com Mangat e Motamedi Azari (1986), a fluência do concreto desempenha um papel crítico na capacidade estrutural do material, desta forma, o seu conhecimento é essencial no dimensionamento.

Dentro deste cenário, o presente trabalho propõe-se a avaliar a influência da adição de fibras de aço no concreto, por meio de análise experimental. Foi produzido um aparato experimental para determinação da deformação por fluência de corpos de prova de concreto, possibilitando assim, analisar a influência da adição de diferentes teores de fibras de aço no concreto.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de fibras de aço, adicionadas ao concreto no comportamento quanto à fluência à compressão. Para tanto, utilizou-se um aparato experimental capaz de mensurar a redução de carga aplicada ao longo do tempo, associada a deformação por fluência do concreto.

O comportamento quanto à fluência do concreto reforçado com fibras de aço foi analisado nas seguintes situações:

- duas classes de resistência à compressão do concreto, quais sejam, 20 e 40 MPa.
- adições de teores volumétricos de fibras de aço de 30, 40, 50 e 60 kg/m³, os quais correspondem a 0,38%, 0,50%, 0,64% e 0,77% em volume.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é constituído de seis capítulos, dispostos da seguinte maneira:

- Capítulo 2: constitui uma revisão bibliográfica geral do concreto reforçado com fibra e as deformações do material, apresentando os principais aspectos da fase fibra, fase matriz e interação fibra-matriz deste tipo de compósito. Ainda neste capítulo, é abordado o concreto reforçado com fibras de aço, com foco nas propriedades no estado fresco, como

trabalhabilidade, e no estado endurecido, como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração. Aborda o comportamento do concreto quanto à fluência, sob esforços de tração e flexão, e principalmente sujeitos à compressão. São mencionados métodos utilizados para determinação das deformações por fluência, assim como as prescrições de normas nacionais e internacionais vigentes;

- Capítulo 3: apresentam-se os materiais utilizados, o programa experimental, o proporcionamento e produção do concreto, a moldagem e preparação dos corpos de prova e a aplicação de cargas e monitoramento dos aparatos experimentais;
- Capítulo 4: são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, a análise e comparação dos resultados investigados;
- Capítulo 5: são enumeradas as conclusões resultantes do presente estudo e sugestões para pesquisas subsequentes.

CAPÍTULO 2

DEFORMAÇÕES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

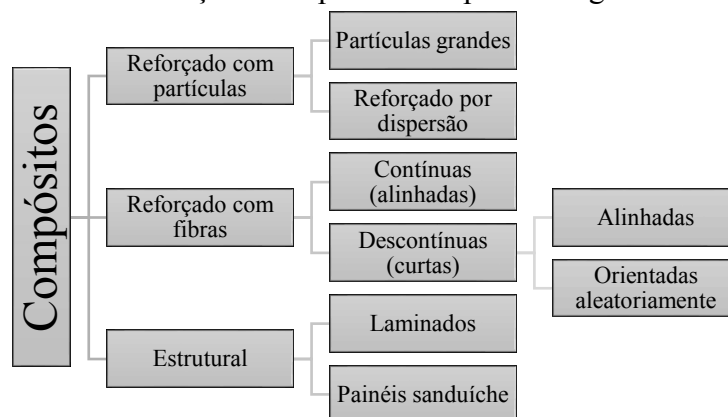
2.1 Materiais compósitos

O material compósito pode ser definido como qualquer material multifásico que apresenta uma proporção relevante das fases que o constituem. Além disso, busca-se que as propriedades do material compósito sejam superiores aquelas encontradas nas fases de maneira individual (CALLISTER JR., 2008).

Segundo Santos (2003), o termo material compósito é destinado aqueles materiais com duas ou mais fases. São fabricados com o objetivo de melhorar as propriedades que seus constituintes apresentam separadamente, exibindo ainda uma zona de interface entre eles. Os materiais que formam os compósitos podem ser classificados como aglomerantes (fase contínua ou matriz) ou reforçantes (fase dispersa).

De acordo com Callister Jr. (2008), genericamente, os compósitos podem ser classificados em três tipos distintos: reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais (Figura 1).

Figura 1 – Classificação dos tipos de compósitos segundo Callister Jr.



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2008)

2.2 Concreto reforçado com fibras

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um tipo de material compósito produzido com cimento hidráulico, agregados de tamanhos variados e adição de fibras discretas e descontínuas de forma a ser composto basicamente de duas fases: a matriz, que mesmo multifásica é considerada como uma fase única, e as fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

Nas duas ou mais fases presentes no CRF é possível distinguir uma fase de reforço e outra aglutinante, a qual permite que os reforços transfiram esforços mecânicos entre si e trabalhem de forma integrada (CALLISTER JR., 2008).

2.2.1 Fase matriz

A matriz tem função de manter os reforçantes unidos, transmitindo a estes os carregamentos. E os reforçantes, por sua vez, devem suportar os carregamentos transmitidos (SANTOS, 2003).

No CRF a matriz apresenta, além da zona de transição na região entre os agregados graúdos e a pasta, outra região na qual a microestrutura é diferente do restante da pasta. Essa região, também chamada de zona de transição interfacial, e é localizada na região próxima às fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

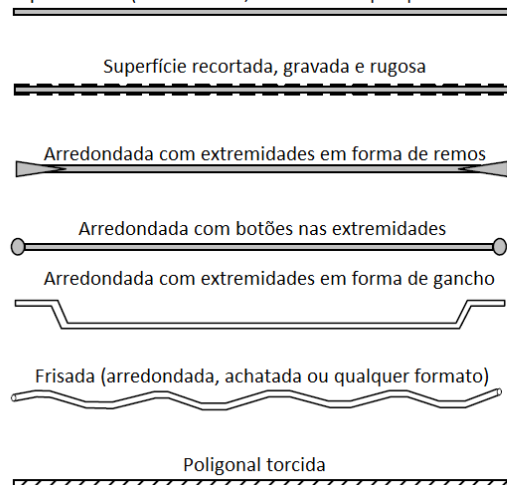
2.2.2 Fase fibra

As fibras podem ser classificadas em micro ou macrofibras, conforme suas dimensões. De acordo com Pereira (2017), as microfibras atuam em conjunto com a matriz desde o início do carregamento e, assim, auxiliam no controle da retração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica (ACI 544.1R: 2009). As macrofibras, como as fibras metálicas, contribuem principalmente na fase pós-fissuração conferindo resistência residual ao CRF (BENTUR; MINDESS, 2007).

Em relação às fibras de aço, as mesmas podem ser classificadas de acordo com sua geometria: podendo ser lisas, onduladas e com ganchos nas extremidades (CHENG; PARRA-MONTESINHOS, 2010). A Figura 2 apresenta diferentes geometrias de fibras de aço empregadas atualmente.

Figura 2 – Seção longitudinal e transversal de diferentes tipos de fibras de aço

Superfície lisa (arredondada, achatada ou qualquer formato)



Fonte: Traduzido de Naaman (2003)

De acordo com Garcez (2005), a escolha de fibras deformadas nas extremidades ou ao longo do seu comprimento melhora as condições de ancoragem entre as fibras e a matriz do concreto, pois tem-se como mecanismo de transferência de tensões, além da aderência e do atrito, a aderência mecânica. Dessa forma, com o aumento da aderência, Banthia e Trottier (1995) citam que, em geral, as fibras deformadas aumentam de modo significativo a capacidade de absorção de energia do compósito, ou seja, aumentam a tenacidade.

2.2.3 Interação fibra-matriz

O desempenho mecânico de um CRF depende da maneira em que um carregamento imposto é transmitido para as fibras por meio da matriz cimentícia (ASLANI; NEJADI, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2012). A interação fibra-matriz é responsável por governar esse processo de transferência de tensões num volume relativamente pequeno da matriz em torno da fibra (ARAUZ, 2002; BENTUR; MINDESS, 2007).

A interação fibra-matriz é influenciada pelo fator de forma ou de aspecto das fibras (relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro), ancoragem das fibras à matriz, resistência à tração das fibras, resistência da ligação entre as fibras e a matriz, teor de fibras incorporado e o comprimento da fibra embebido na matriz do CRF quando a matriz se encontra fissurada (ARAUZ, 2002; FIGUEIREDO, 2011b; ASLANI; NEJADI, 2012).

Assim como a zona de transição formada na região próxima aos agregados graúdos e a pasta de cimento, a microestrutura da zona de transição interfacial das fibras é muito mais porosa e sua resistência depende do volume e tamanho dos vazios ou poros existentes. Essa microestrutura especial da zona de transição na região periférica das fibras pode ocasionar a redução global na ligação entre a fibra e a matriz e é, portanto, onde se localiza a parte mais frágil da ligação na camada porosa da zona de transição (BENTUR; MINDESS, 2007).

Segundo Nunes (2006), os principais parâmetros que interferem na interação entre a fibra e a matriz são o tipo de fibras, o teor de fibras no compósito, as dimensões das fibras e as propriedades mecânicas da matriz e das fibras, tais como resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade.

2.3 Concreto reforçado com fibras de aço

O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é definido pela ACI 318 (2014) como um concreto contendo uma quantidade prescrita de fibras de aço descontínuas, dispersas e aleatoriamente orientadas.

Por se mostrarem mais eficazes, econômicas e de fácil mistura à matriz, as fibras de aço são as mais utilizadas em reforços de concreto e podem ser obtidas por meio de diferentes processos de fabricação e podem ser encontradas no mercado em vários tipos de seção transversal (JOHNSTON, 2001).

2.3.1 Propriedades no estado fresco

Para que o concreto apresente as propriedades desejáveis no estado endurecido, é necessário que haja qualidade no concreto no estado fresco, que o mesmo apresente propriedades que assegurem a obtenção de uma mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que após o endurecimento, seja homogêneo e com mínimo de vazios (SOBRAL, 2013). Assim, considerações a respeito da trabalhabilidade do CRF são de grande importância.

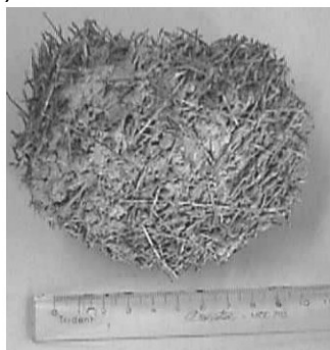
2.3.1.1 Trabalhabilidade

A adição de fibras ao concreto altera a consistência do mesmo e, por consequência, interfere na trabalhabilidade. Tem-se que no CRFA, as fibras bloqueiam a mobilidade dos agregados,

de modo que a fluidez da mistura é reduzida. Esse bloqueio depende do material constituinte das fibras, do teor e da geometria das fibras. Além disso, o fator de forma e o módulo de elasticidade das fibras interferem diretamente na trabalhabilidade do CRF, uma vez que fibras mais rígidas causam maior perda de mobilidade dos concretos (FIGUEIREDO, 2011a).

Figueiredo (2011a) afirma que além da perda da fluidez, a adição de fibras ao concreto pode promover o aparecimento dos chamados “ouriços”, estes que são aglomerados de fibras que formam bolas (Figura 3). Os ouriços causam a redução do teor de fibras distribuído de forma homogênea e gera pontos fracos nos locais em que os ouriços se alojam, uma vez que nesses locais há maior porosidade.

Figura 3 – Formação de ouriços devido à mistura inadequada das fibras no concreto



Fonte: Figueiredo (2000)

Para teores de fibras maiores que 0,25% ou 20 kg/m³, os procedimentos de dosagem devem garantir a trabalhabilidade do CRFA, uma vez que a adição de fibras ao concreto tende a reduzir a trabalhabilidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dependendo da quantidade de fibras, pode ser necessário ajustar o teor de água, ou de preferência, adicionar ou aumentar a quantidade de aditivos redutores de água para manter a trabalhabilidade.

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

A geometria das fibras, as propriedades da interface com a matriz e a fração volumétrica são os parâmetros de maior influência nas propriedades do CRFA no estado endurecido (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). No entanto, segundo Bentur e Mindess (2007), esta influência é particularmente mais efetiva sob ações de tração direta, flexão, cisalhamento e impacto e menos efetiva sob ações de compressão.

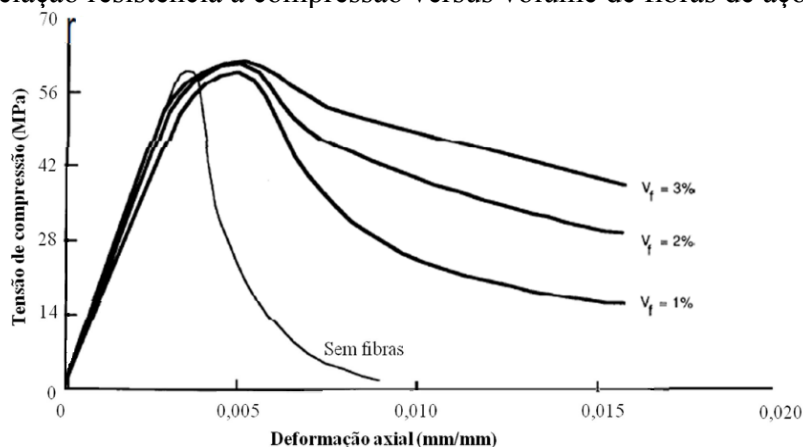
2.3.2.1 Resistência à compressão

A adição de fibras de aço no concreto pode aumentar ou diminuir a resistência à compressão do CRFA, dependendo principalmente do teor de fibras adicionado.

Oliveira Junior (2012) credita a diminuição da resistência à compressão do CRFA, em algumas situações, ao aumento do teor de ar incorporado que aumenta a quantidade e dimensão dos vazios e provoca uma redução da resistência à compressão superior ao aumento da resistência produzido pelas fibras. Por outro lado, as fibras dificultam a abertura de fissuras que se iniciam devido aos esforços de tração e cisalhamento presentes nos ensaios de compressão reduzindo a fragilidade do material.

Segundo o ACI 544.4R (2009), Bentur e Mindess (2007) e Mehta e Monteiro (2014), a adição de fibras de aço em teores menores que 2% não acrescentam melhoras na resistência à compressão do concreto, podendo até levar a uma pequena redução nessa propriedade, conforme apresentado na Figura 4.

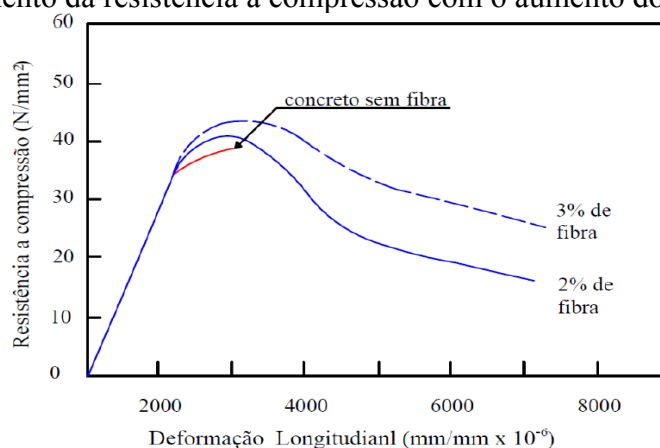
Figura 4 – Relação resistência à compressão versus volume de fibras de aço no concreto



Fonte: Traduzido de ACI 544.4R (2009)

No entanto, segundo a ACI 544.1R (2009), para um teor de fibras de 1,5% são observados aumentos entre 0% e 15% na resistência à compressão do CRFA quando comparado com o concreto sem fibras. Bentur e Mindess (2007) observou aumento na resistência à compressão do concreto com adições de fibras de aço nos teores volumétricos de 2 e 3% (Figura 5). Arif (2014) obteve ganhos de resistência à compressão de 1% e 18 % para teores de fibras de 0,38% e 0,77% por volume de concreto, respectivamente. Perumal (2015) obteve um ganho máximo de 12,4% na resistência à compressão do concreto de alta resistência reforçado com fibra de aço para um teor de fibras de 1,5%.

Figura 5 – Aumento da resistência à compressão com o aumento do volume de fibras



Fonte: Bentur e Mindess (2007)

2.3.2.2 Resistência à tração

Conforme Sudano (2010), a adição de fibras no concreto em volume suficiente e com resistência e módulo e elasticidade apropriados resulta na necessidade de uma maior quantidade de energia para a formação e a propagação das fissuras.

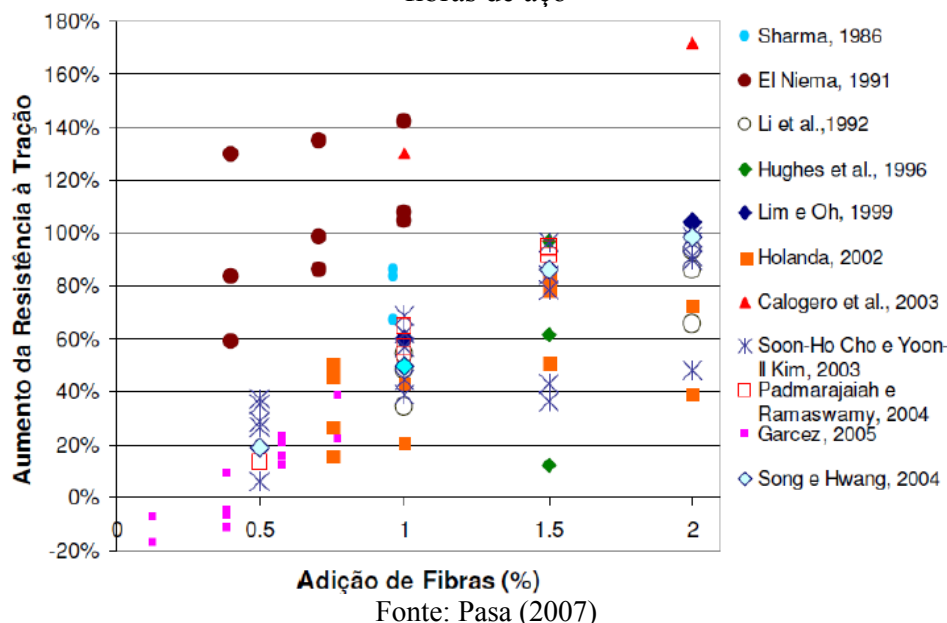
Entretanto, Quinino (2015) ressalta que o aumento da resistência à tração sofre interferência do volume de fibras empregado e do alinhamento das fibras na direção das tensões principais de tração.

A ACI 544.1R (2009) prescreve que ao adicionar um volume de 1,5% de fibra ao concreto, obtém-se um aumento na resistência à tração direta entre 30 e 40%.

Bentur e Mindess (2007) afirmam que ao empregar 5% em volume de fibras alinhadas na direção da tração, pode-se obter um aumento na resistência à tração direta de até 133%. Ao empregar o mesmo volume e tipo de fibras de forma aleatória, o aumento na resistência à tração pode atingir até 60%.

Pasa (2007) apresenta em sua pesquisa os resultados obtidos por diversos autores da literatura que avaliaram o CRFA quanto à tração por compressão diametral. Como pode-se observar na Figura 6, os autores obtiveram um aumento no desempenho desta propriedade mecânica do CRFA.

Figura 6 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto reforçado com fibras de aço



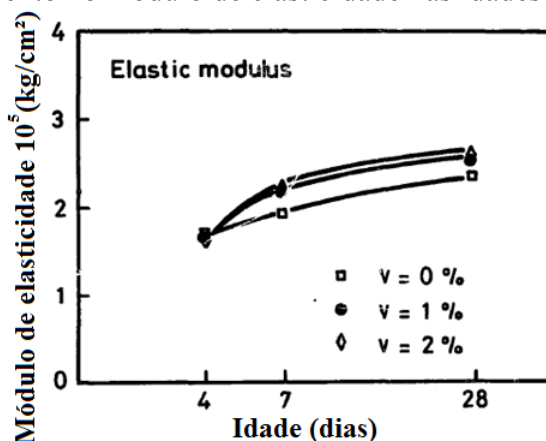
2.3.2.3 Módulo de elasticidade ou deformação

O módulo de elasticidade do CRFA é a soma dos módulos da fibra e da matriz multiplicadas pelos seus volumes, respectivamente. Assim, como o volume de fibras é pequeno se comparado ao volume da matriz, o módulo de elasticidade do CRF depende principalmente do módulo da matriz (FIGUEIREDO, 2011b).

As fibras com maiores módulo e resistência à tração são as mais indicadas para reforço de compósitos cimentícios estruturais, pois apresentam maior capacidade de absorção de cargas dinâmicas. Além disso, estas fibras possuem elevada tendência de apresentarem boa aderência à matriz (MONTEDOR, 2004).

Chern e Youngt (1989) analisaram o módulo de elasticidade do CRFA de acordo com o teor adicionado de fibras (1 e 2%), nas idades de 4, 7 e 28 dias (Figura 7). Aos 4 dias, não houve variação significativa dos resultados. Já aos 7 e 28 dias, conforme aumentou-se o teor de fibras de aço no concreto, aumentou-se também o módulo de elasticidade.

Figura 7 – Aumento no módulo de elasticidade nas idades de 4, 7 e 28 dias



Fonte: Traduzido de Chern e Youngt (1989)

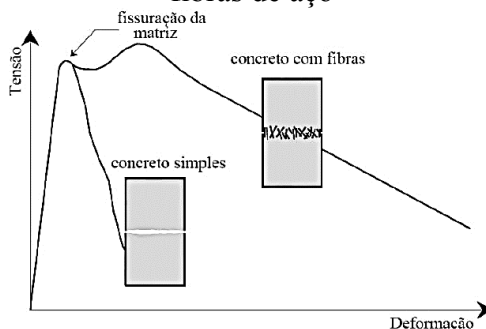
2.3.2.4 Tenacidade

De acordo com Callister Jr. (2008), para pequenas taxas de deformação, a tenacidade pode ser definida com a área sob a curva de tensão-deformação em tração até o ponto de ruptura, em que a unidade de medida é energia por volume do material. Entretanto, conforme Nunes (1998), esse conceito não é aplicável experimentalmente para o CRFA, uma vez que determinar a tensão após a fissuração da matriz é muito difícil.

Figueiredo (2011b) define a tenacidade para os materiais compósitos como a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz quando o elemento está sob tensão, sendo que após a fissuração da matriz as fibras atuam de forma mais efetiva.

Ao comparar o concreto simples com o CRFA, tem-se que após a fissuração da matriz a capacidade de carga do concreto simples é reduzida rapidamente. O CRFA apresenta uma tenacidade considerável, uma vez que as fibras retardam a abertura de fissuras, assim como pode ser observado na Figura 8 (VITOR, 2017).

Figura 8 – Comportamento mecânico de matrizes de concreto sem e com adição de fibras de aço

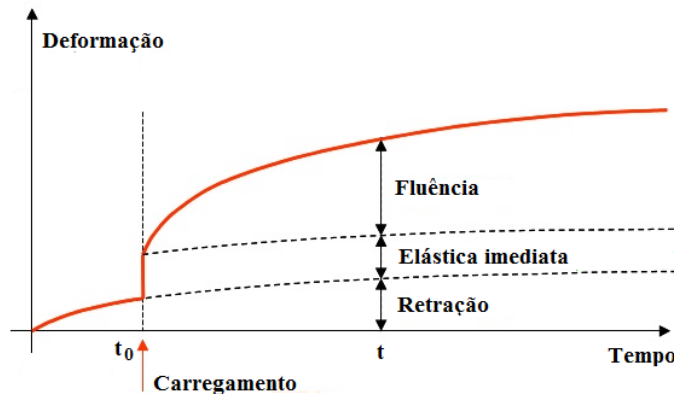


Fonte: Callister Jr. (2008)

2.4 Deformações dependentes do tempo no concreto

As deformações no concreto (Figura 9), que muitas vezes levam ao surgimento de fissuras, ocorrem como resultado da resposta do material à carga externa e ao meio a que está exposto. O concreto apresenta deformações elásticas e inelásticas quando submetido a carregamento, e retração na secagem ou resfriamento. Quando a retração é contida, o concreto apresenta complexas tensões de tração que resultam em microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 9 – Deformação total do concreto ao longo do tempo



Fonte: Autor (2019) baseado em Mehta e Monteiro (2014)

Quando no concreto, sem impedimentos para deformar, é aplicada, no tempo t_0 , uma tensão constante no intervalo (t, t_0) , sua deformação total, no tempo t , é dada pela Equação (1) (NBR 6118, 2014).

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) \quad (1)$$

Em que:

t : é a idade do concreto no instante considerado no ensaio, expressa em dias;

t_0 : é a idade do concreto no momento da aplicação da carga de ensaio, expressa em dias;

$\varepsilon_c(t)$: deformação total, no tempo t ;

$\varepsilon_c(t_0)$: é a deformação imediata, ocasionada pelo carregamento;

$\varepsilon_{cc}(t)$: é a deformação por fluência, no intervalo de tempo (t, t_0) ;

$\varepsilon_{cs}(t)$: é a deformação por retração, no intervalo de tempo (t, t_0) .

A deformação imediata é calculada conforme apresentado na Equação (2).

$$\varepsilon_c(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}(t_0)} \quad (2)$$

Em que:

$\sigma_c(t_0)$: é a tensão à compressão no concreto, no tempo t_0 ;

$E_{ci}(t_0)$: é o módulo de elasticidade ou de deformação inicial do concreto, calculado para $j = t_0$.

O módulo de elasticidade ou deformação inicial do concreto, aos t_0 dias, é dado pela Equação (3).

$$E_{ci}(t_0) = 5600 \times f_{ckj}^{1/2} \quad (3)$$

Em que:

f_{ckj} : é a resistência característica à compressão do concreto aos j dias.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o aumento gradual da deformação ao longo do tempo devido a um nível determinado de carregamento constante é o fenômeno chamado fluência. A diminuição gradual da tensão ao longo do tempo sob um determinado nível de deformação constante é o fenômeno chamado relaxação da tensão. Essas duas manifestações são típicas de materiais visco elásticos.

Deformações no concreto relacionadas ao tempo desempenham um efeito significativo no comportamento estrutural e devem ser consideradas no dimensionamento (CHERN; YOUNGT, 1989).

2.5 Retração

A retração é definida como a variação volumétrica ocasionada por reações químicas e físicas devido ao processo de hidratação do concreto e por alterações de umidade com o meio em que se encontra exposto (WITTMAN, 2008).

Segundo RILEM TC 107 (1998), por definição, a deformação de retração é medida em amostras livres de carregamentos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), não haverá estabilidade dimensional numa pasta de cimento saturada quando exposta a meios com umidades relativas que estejam abaixo da

saturação, principalmente porque a perda de água fisicamente adsorvida de C-S-H resulta em uma tensão de contração.

A retração autógena é provocada pelo consumo de água da reação de hidratação do cimento, e estará sempre atuando enquanto a reação se processar, e será tanto mais significativa quanto mais jovem for o material. A retração de secagem é proveniente da perda de água, fisicamente adsorvida nos silicatos de cálcio hidratado, do concreto para o meio externo (VELASCO, 2008).

A exposição de amostras de concreto, sem restrições para movimentar, à condições de umidade relativa baixa, causa a retração de secagem, que aumenta com o tempo. No entanto, se a amostra for restringida de deformar, não haverá deformação, porém tensões de tração se desenvolverão com o tempo. Esta é a razão pelo surgimento de microfissuras devido a retração de secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.6 Fluência

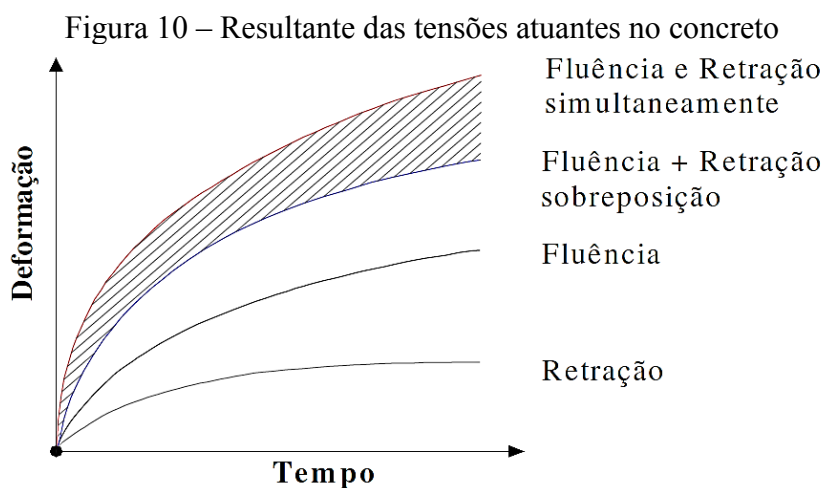
O primeiro relato sobre o comportamento do concreto sob carga mantida foi feito por Hatt, em 1907. Nesta pesquisa, foram ensaiadas vigas de concreto armado, com idade de 60 dias, submetidas à esforço de flexão durante um período de 45 dias, expostas às condições climáticas. Notou-se que após o período de ensaio, a flecha final foi aproximadamente o dobro da flecha inicial, medida após o carregamento. Assim Hatt cita um tipo de plasticidade no comportamento do concreto ao longo do tempo, devido a carga mantida (MILLER, 2008)

Segundo Velasco (2008), o concreto pode apresentar três tipos de deformações: elásticas, plásticas e viscosas (dependentes do tempo). Estas deformações podem ocorrer segundo três tipos de combinações, são elas: deformações visco-elásticas, visco-plásticas e elasto-plásticas. O fenômeno da fluência é caracterizado pelas deformações visco-elásticas e visco-plásticas.

Sob carregamento constante, a deformação do concreto aumenta significativamente com a duração da carga, este aumento pode atingir até duas a três vezes o valor da deformação instantânea no momento da aplicação da carga. Esse fenômeno, dependente do tempo, é conhecido com fluência e requer uma avaliação precisa, em particular para o projeto de estruturas (RILEM TC 107, 1998).

A fluência do concreto pode ser classificada em dois tipos diferentes, a básica e a de secagem. A aplicação de uma tensão constante em uma amostra de concreto, não havendo troca de umidade com o meio, leva a um aumento da deformação ao longo do tempo, caracterizando a chamada fluência básica. Quando o concreto é submetido, simultaneamente, a tensão constante e condições de umidade relativa baixa, a deformação total é maior que a soma da deformação elástica, deformação por retração e da deformação por fluência básica. A fluência adicional que ocorre quando o concreto é submetido a estas condições é chamada de fluência por secagem. A fluência total é a soma das duas parcelas: a fluência básica e a de secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No entanto, conforme (BAŽANT, 1988), apesar da conveniência em distinguir a deformação por fluência em básica e por secagem, é evidente que a deformação total resultante não depende de forma distinta do estado de tensões interno e das ações externas, e sim da atuação conjunta das tensões. O esquema apresentado na Figura 10 exemplifica o que foi dito.



Fonte: Miller (2008)

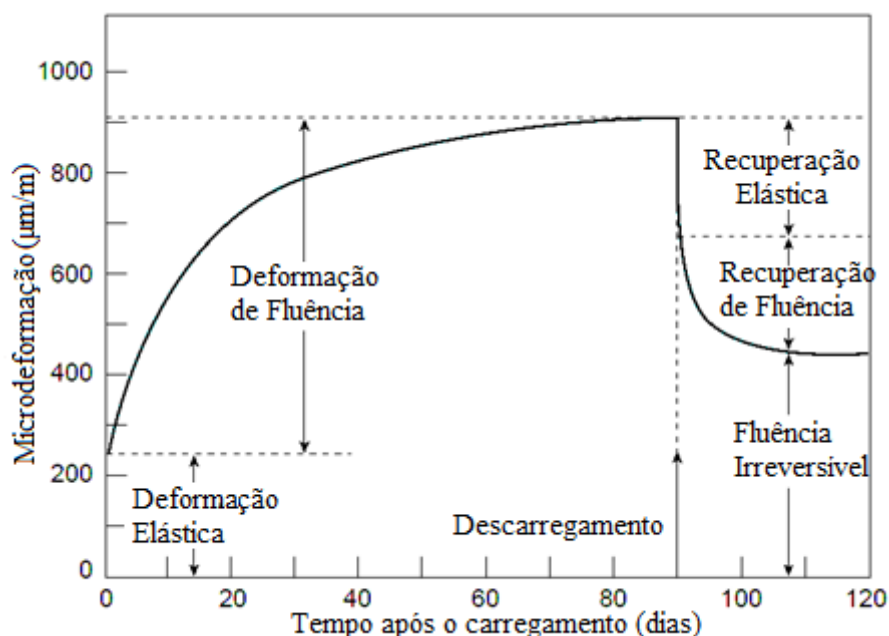
Além da distinção das deformações por condições de exposição e secagem, pode-se subdividir a deformação por fluência em função do tempo, sendo assim dividida em fluência rápida, originada da redistribuição de água nos poros capilares da microestrutura, e a parcela de deformação contínua, ocasionada pelo deslocamento das partículas do gel (Miller, 2008).

A parcela de fluência rápida causa uma grande deformação por fluência no período imediatamente após o carregamento e rapidamente atinge seu limite. A componente de deformação contínua da fluência age de forma oposta, sendo de valores ínfimos nos

primeiros instantes após a aplicação da carga e crescente com o tempo (ILLSTON, 1956 apud MANGAT; MOTAMEDI AZARI, 1985, p. 1129).

De acordo com Mangat e Motamedi Azari (1986), a energia de deformação ocasionada pela componente de deformação rápida da fluência é equivalente a energia de deformação recuperada após o descarregamento, denominada recuperação de fluência. A deformação irreversível causada pela componente contínua da fluência equivale a deformação residual após o descarregamento, denominada fluência irreversível. A Figura 11 demonstra a evolução da deformação por fluência assim como sua recuperação após o descarregamento.

Figura 11 – Deformação e recuperação de fluência no concreto



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

A fim de prever as deformações por fluência, diversas expressões matemáticas estão disponíveis na literatura. Desconsiderando as deformações decorrentes da variação de temperatura ou retração, as deformações de um elemento de concreto sujeito a um carregamento constante em um tempo qualquer t , posterior à aplicação da carga no tempo t_0 , podem ser previstas conhecendo-se a função de fluência, conforme Equação (4). Esta função relaciona a parcela elástica das deformações, e a parcela viscosa, representada por outra função, definida como fluência específica.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + C(t, t_0) \quad (4)$$

Em que:

$J(t, t_0)$: é a função de fluência;

$1/E_c(t_0)$: parcela elástica das deformações;

$C(t, t_0)$: é a função de fluência específica (parcela viscosa das deformações).

A fluência específica relaciona a deformação por fluência em um tempo t e a tensão aplicada no tempo t_0 , desta forma os resultados se tornam padronizados de acordo com os níveis de tensão. Esta função é utilizada pela maioria dos pesquisadores para apresentar os resultados de suas pesquisas experimentais, facilitando assim à comparação entre resultados de diferentes níveis de tensões. A fluência específica pode ser obtida por da Equação (5):

$$C(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\sigma_{ci}} \quad (5)$$

Em que:

$\varepsilon_{cc}(t, t_0)$: é a deformação por fluência;

Outro parâmetro importante para a avaliação da fluência é o coeficiente de fluência, que representa a relação entre a deformação por fluência e a deformação elástica imediata, de acordo com a Equação (6).

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\varepsilon_c(t_0)} \quad (6)$$

Em que:

$\varphi(t, t_0)$: é o coeficiente de fluência.

É possível também correlacionar o coeficiente de fluência e a fluência específica de acordo com a Equação (7).

$$\varphi(t, t_0) = C(t, t_0) \times E_c(t_0) \quad (7)$$

2.6.1 Origens da fluência

Conforme RILEM TC 107 (1998), um fator de influência crucial na determinação da fluência é o teor de água adsorvida no interior do material que, exceto em casos muito especiais, não é uniforme nas estruturas, devido à baixa velocidade do processo de secagem.

De acordo com Boshoff (2007), a fluência parte do princípio da combinação de três mecanismos, e são eles:

- 1) Causado pela movimentação da água adsorvida presente nos poros capilares na matriz cimentícia. Esse movimento é provocado quando uma tensão é aplicada ao material. Este fenômeno está diretamente ligado a uma teoria de viscosidade dos fluidos que define a pasta de cimento hidratada como um fluido com viscosidade elevada (THOMAS, 1937 apud BOSHOF, 2007). Esse modelo descreve o comportamento de fluência com uma precisão razoável, especialmente abaixo de 50% da tensão máxima, em que a variação de deformação é proporcional à tensão aplicada.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), quando a pasta de cimento hidratada é submetida a uma tensão constante, dependendo de sua duração e magnitude, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) irá perder uma grande quantidade de água adsorvida fisicamente, e a pasta irá apresentar uma deformação por fluência.

- 2) Quebra e restabelecimento das ligações da microestrutura. Isto está diretamente ligado ao primeiro mecanismo do movimento da umidade na estrutura do poro. Devido à tensão aplicada ao material, acredita-se que a estrutura do gel entre em colapso quando os picos de tensão interna são formados. A microestrutura é então redefinida devido à continuação da hidratação. Esta é uma explicação para a deformação permanente associada à fluência.
- 3) A formação de microfissuras na matriz em condições de tensões relativamente altas cause a não linearidade da fluência. Os picos de tensão se formam internamente, excedendo a resistência à ruptura, causando microfissuras. Com uma carga constante, essas fissuras aumentam e se conectam, podendo eventualmente causar uma falha global no nível macro da estrutura, chamada de fratura por fluência.

A não-linearidade da relação tensão-deformação no concreto, especialmente a níveis de tensões superiores a 30% da resistência última, claramente mostra a contribuição das microfissuras na zona de transição interfacial para a fluência. Quando o concreto é submetido, simultaneamente, a condições de secagem, há um aumento adicional de microfissuras na zona de transição interfacial, ocasionando maiores deformações por fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), outra causa da fluência é a ocorrência da deformação elástica tardia no agregado. Como a pasta de cimento e o agregado estão unidos,

a tensão na pasta diminui gradativamente à medida que a carga é transferida para o agregado, assim, com o aumento da transferência de carga, o agregado se deforma elasticamente. Desta forma, a deformação elástica tardia contribui para a fluência total.

Por definição, a deformação visco elástica $\varepsilon_{ve}(t, t_0)$, a uma determinada idade t é a deformação obtida subtraindo-se da deformação total $\varepsilon_t(t, t_0)$, medida em uma amostra submetida a uma tensão constante σ_c aplicada em uma idade t_0 , a deformação por retração $\varepsilon_{cs}(t)$, de mesma duração. A deformação imediata $\varepsilon_c(t_0)$ não é descontada, mesmo quando determinada durante o ensaio à fluência (RILEM TC 107, 1998).

2.6.2 Fatores intervenientes

Diversos autores (BAŽANT, 1988; RILEM TC 107, 1998; BOSHOF, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014) apontam a perda de água adsorvida como a principal causa da fluência. As demais causas que contribuem para este fenômeno são bastante complexas, sendo determinadas por vários processos físicos químicos (BAŽANT, 1988).

São elencados a seguir diversos fatores que podem influenciar direta e indiretamente nas deformações por fluência do concreto:

- materiais constituintes do concreto, como cimento e agregados;
- condições de exposição ao meio, referentes à umidade relativa do ar e temperatura;
- geometria do elemento;
- níveis de tensão imposta;
- idade e duração do carregamento;
- integridade dos elementos.

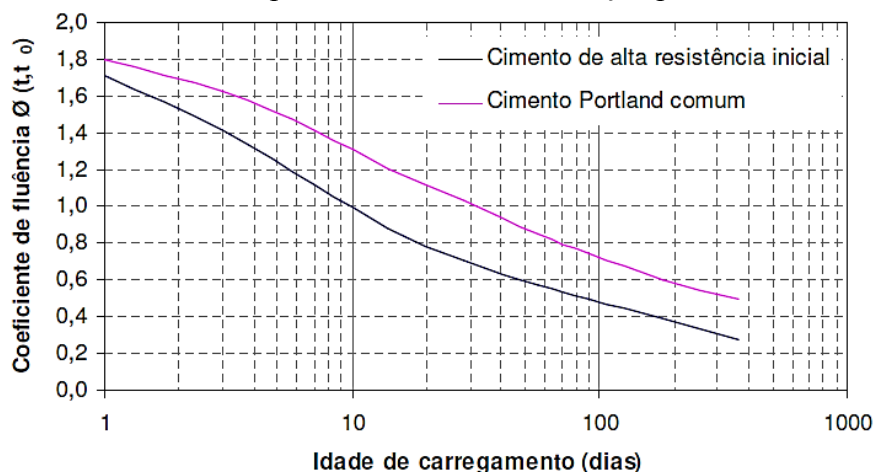
Logo abaixo são explanados os fatores intervenientes de maior influência na deformação de fluência do concreto.

2.6.2.1 Materiais

Dentre a influência dos tipos de materiais e suas proporções na mistura de concreto, o tipo de cimento é o principal fator, pois é o material que determina a hidratação da matriz. Segundo Mehta e Monteiro (2014), cimentos de alta resistência inicial apresentam menor fluência específica, no caso dos cimentos pozolânicos, estes conferem maior fluência,

provavelmente devido à baixa resistência da matriz nas primeiras idades ser reduzida. Portanto o tipo de cimento altera a fluência na medida em que influencia a resistência do concreto no momento de aplicação da carga, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Influência do tipo de cimento na deformação por fluência do concreto



Fonte: Miller (2008)

Com relação aos agregados, a quantidade utilizada e seu módulo de elasticidade interferem diretamente na deformabilidade do concreto assim como na restrição às deformações por fluência. A substituição de um agregado de elevado módulo de elasticidade por outro de módulo inferior, acarretará num aumento da deformação por fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.6.2.2 Temperatura

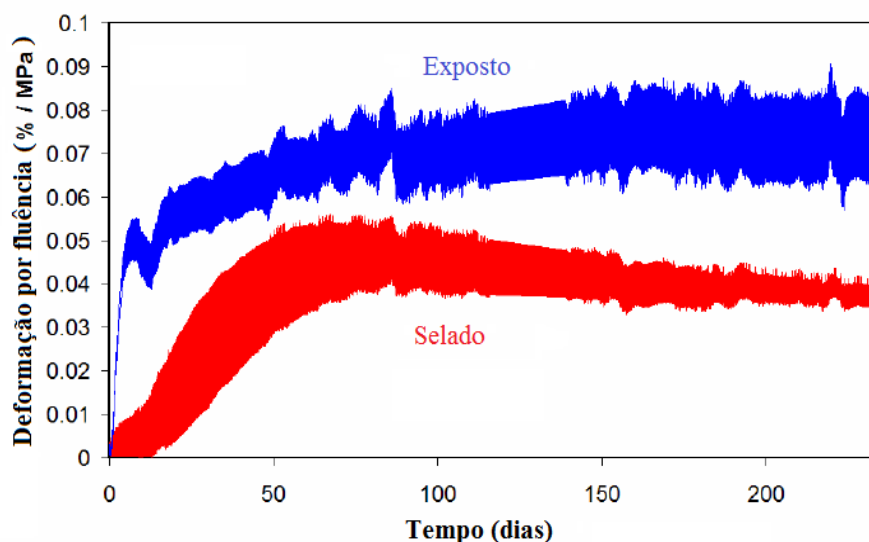
Quanto ao efeito térmico, limita-se na influência no processo de hidratação do cimento e logo, no ganho de resistência da pasta de cimento, diretamente ligado ao comportamento quanto à fluência. Logo, quanto maior a resistência do concreto, menor sua susceptibilidade à deformação por fluência. Em situações de aplicação de carga à elevadas temperaturas, pode haver aumento substancial na deformação por fluência (NEVILLE, 2016).

2.6.2.3 Umidade relativa da atmosfera

Em relação à umidade relativa, segundo Neville (2016), maiores deformações por fluência ocorrem em peças de concreto expostas a teores menores de umidade relativa, devido à perda de água do interior do concreto para o meio a que está exposto. No caso de elementos que tenham atingido o equilíbrio higroscópico com o meio, antes da aplicação da carga, a influência da umidade relativa é bem menor.

No experimento realizado por Boshoff (2007), é apresentada a variação entre a determinação da deformação por fluência na condição selada e com exposição ao meio, conforme Figura 13. O autor observou que o material utilizado para a selagem não era totalmente impermeável, no entanto, a diferença entre as determinações é significativa.

Figura 13 – Determinação da fluência em condição selada e com exposição ao meio



Fonte: Traduzido de Boshoff (2007)

Nota-se que os resultados obtidos na condição de exposição ao meio apresentam um desvio maior que os obtidos na condição selada, e que há uma elevada deformação inicial de fluência de secagem.

Para determinação da fluência básica, as amostras de concreto devem ser revestidas por uma camada capaz de selar toda a superfície de exposição e manter-se aderente à amostra, usualmente são utilizados filmes plásticos, fitas de alumínio, resinas ou qualquer outro material impermeável. A temperatura deve ser mantida constante, preferencialmente em uma câmara climática controlada.

A fluência de secagem é determinada em condições de temperatura e umidade relativa constantes, fazendo-se necessário o uso de câmaras climáticas controladas. É necessário que seja determinada a perda de água durante o ensaio de fluência, medindo a massa das amostras antes e depois do processo (RILEM TC 107, 1998).

2.6.2.4 Níveis de tensões

Dados experimentais disponíveis na literatura permitem afirmar que há uma proporcionalidade válida entre os níveis de tensão aplicada, quando as tensões permanecem na fase linear da relação tensão-deformação, e o fenômeno da fluência. Quanto mais elevados forem os níveis das tensões aplicadas, maiores serão as deformações decorrentes do processo de fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

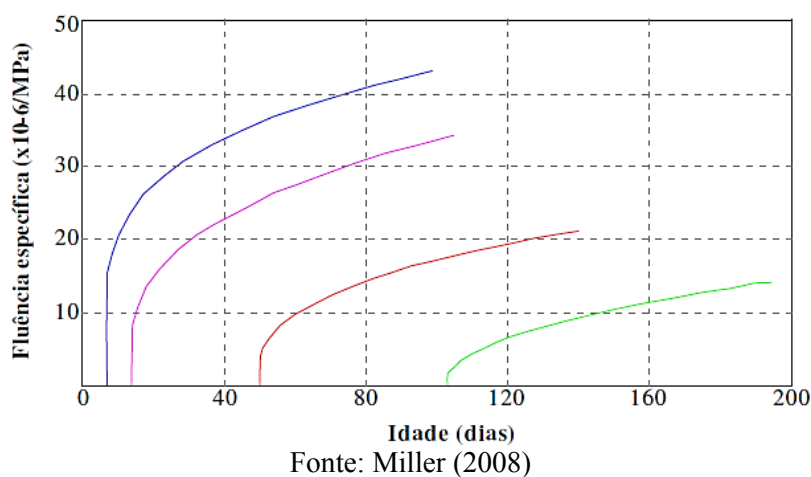
2.6.2.5 Idade de carregamento

A relação inversamente proporcional entre a fluência e a idade de carregamento é consequência direta das reações de hidratação do cimento. Devido ao envelhecimento do concreto, tem-se um aumento na resistência ao longo do tempo, o que reflete em uma diminuição da deformação por fluência em comparação com idades inferiores.

Sabe-se que fluência é um fenômeno relacionado à maior ou menor deformabilidade do concreto, estando intimamente ligado ao módulo de elasticidade no momento de aplicação da carga. Entretanto, com a idade, ocorrem também modificações na microestrutura do material que conduzem à diminuição do conteúdo de água evaporável (pois esta é consumida nas reações de hidratação), e também da porosidade, o que torna a matriz mais compacta.

Todos esses fatores contribuem para que a fluência diminua com a idade do carregamento, desde que seja mantida a relação tensão-resistência. Esse comportamento pode ser observado na Figura 14.

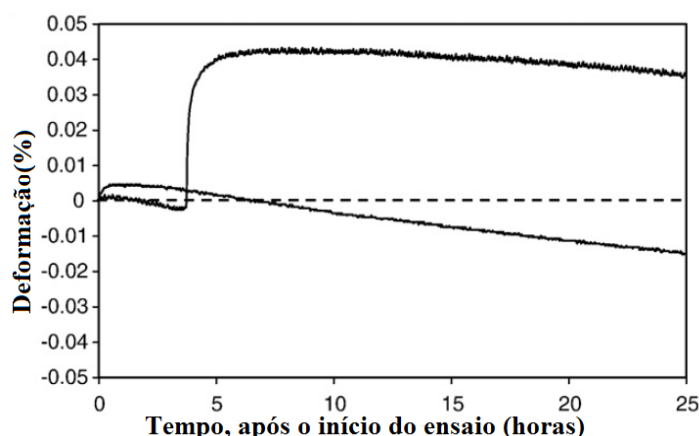
Figura 14 – Efeito da idade do carregamento na fluência à compressão do concreto



2.6.2.6 Integridade das amostras

O surgimento de fissuras nos primeiros instantes após o carregamento das amostras, seja compressão ou tração, pode ocasionar o surgimento súbito de deformações. De acordo com Boshoff e Van Zijl (2007), sob tensão aplicada de 50% da resistência última à tração, a fluência na amostra fissurada aumentou abruptamente após 4 horas do início do carregamento, conforme Figura 15.

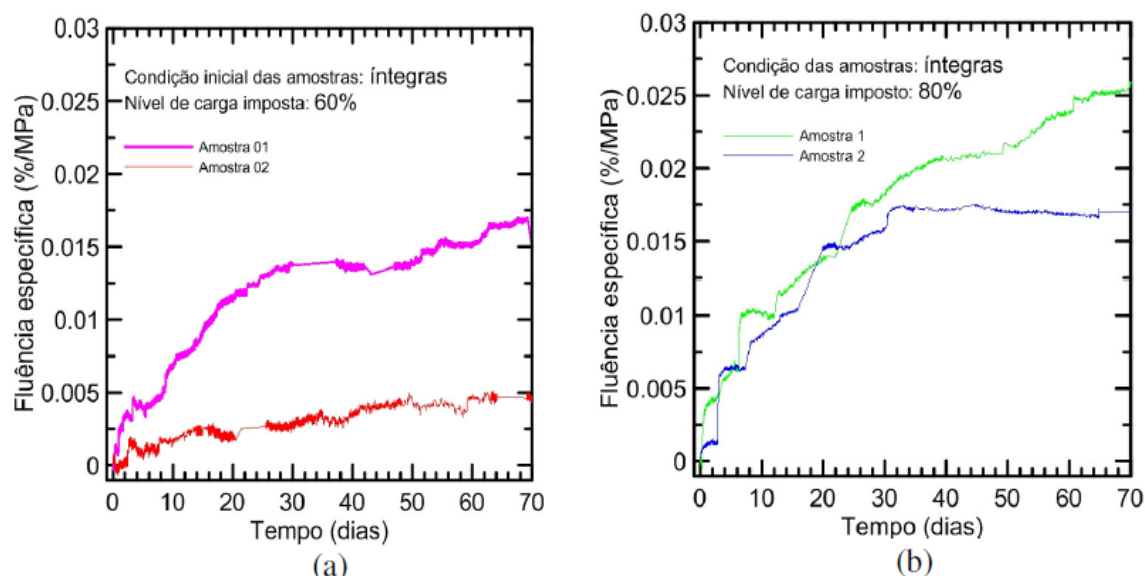
Figura 15 – Aumento súbito na fluência após fissuração de amostra



Fonte: Traduzido de Boshoff e Van Zijl (2007)

A fluência à tração em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA foi testada por Oliveira (2015), a níveis de tensão imposta de 60% e 80% da tensão de abertura da primeira fissura, conforme Figura 16, que observou que as amostras que sofreram fissuração durante o carregamento apresentaram grandes deformações nos primeiros dias de ensaio, independentemente do nível de carga. A autora concluiu que as deformações nos primeiros dias de ensaio não são constantes e isso pode ser atribuído à deformação da matriz cimentícia e formação de fissuras.

Figura 16 – Fluência específica *versus* tempo de corpos de prova de SHCC com carga tensão imposta de (a) 60% e (b) 80%



Fonte: Oliveira (2015)

2.6.3 Redução da fluência

Adequando os tipos de materiais e suas proporções na mistura do concreto, pode-se reduzir a fluência por meio de combinações que propiciem maior resistência mecânica e, consequentemente, maior módulo de elasticidade, menor porosidade e quantidade de água adsorvida na matriz cimentícia.

Após moldado, a cura e manutenção do concreto em ambientes com elevada umidade relativa proporciona redução da fluência, ganhos de resistência e do módulo de elasticidade (relacionados às reações de hidratação) e redução da retração.

A redução dos efeitos negativos da fluência também é obtida adiando o carregamento prematuro das estruturas de concreto (relacionados às operações de escoramento e aplicação de cargas construtivas), levando em consideração a influência da idade de carregamento no comportamento quanto à fluência. A solicitação da estrutura à níveis de tensão menores também contribuem para menores deformações.

2.7 Fluência do concreto reforçado com fibras

O conhecimento do comportamento ao longo do tempo de materiais compósitos é interessante uma vez que a adição de fibras promove maior acomodação devido à

movimentos causados por influências externas e o controle da tendência à fissuração. Para tal, se faz necessária a compreensão dos mecanismos de fluência do concreto comum. (NEVILLE, 2016).

Apesar do estado de tensão analisado nesta pesquisa ser a compressão uniaxial, a avaliação da fluência em outras condições de carregamento e as informações sobre o comportamento nessas condições, são particularmente úteis para o conhecimento da sua natureza e para certos problemas de projeto.

Sabe-se que a fluência pode ter um efeito benéfico em elementos tracionados, por conta da redistribuição de tensões que ocorre no concreto. No entanto, em elementos fletidos, a ampliação dos deslocamentos verticais ocasionada pela deformação por fluência não é favorável, de modo que a previsão incorreta no dimensionamento pode afetar a durabilidade da estrutura devido a restrições de serviço (MILLER, 2008).

Neville (2016) comenta que as fibras podem ser entendidas como uma parcela adicional de agregado de formato especial que permitem ganho de rigidez e melhoram a ligação entre a pasta de cimento e os agregados finos. Dessa forma, as fibras podem contribuir para aumentar a restrição às movimentações da matriz, melhorando o desempenho com relação à fluência.

São apresentados a seguir, estudos experimentais que analisam os três tipos de estado de tensão, principalmente à compressão axial. Alguns resultados e conclusões são contraditórios quanto ao efeito das fibras no comportamento à fluência do concreto, pois o comportamento final é reflexo da ação conjunta de inúmeros fatores, como dosagem e natureza dos materiais utilizados na matriz, formato, dimensões da fibra utilizada, teor de fibra utilizado e tipo de solicitação. A seguir é apresentado um resumo geral, contendo as variáveis de maior importância e as conclusões de cada experimento (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo das análises experimentais de fluência do concreto

Autor	Estado de tensão	Tipo		Teor de fibra	Nível de tensão	Idade na aplicação da carga	Umidade relativa e temp.	Duração do ensaio	Variável principal	Fluência
		Concreto	Fibra							
Silva (2015)	Comp.	Auto adensável	-	-	40%	-	50±2% e 21±2°C	90 dias	Tipo de agregado	Quanto maior o módulo de elasticidade do concreto, menor a fluência
Ranaivomanana, Multon e Turatsinze (2013)	Flexão, tração e comp.	Comum	-	-	30, 40 e 50%	-	50±5% e 20±1°C	200 dias	Estado de tensão	Quanto maior o nível de tensão, maior a fluência.
Rossi, Tailhan e Le Maou (2013)	Comp.	Comum	-	-	=	28 dias ou superior	Amostras seladas	-	Estado de tensão	Fluência na compressão é 3 vezes maior que na tração
Velasco (2018)	Comp.	Adição de sílica ativa e cinza volante	Aço	0%, 1%, 1,5% e 2%	40%	28 dias	Amostras seladas	170 dias	Teor de fibra	Adição de fibras de aço aumentou a fluência
Saje <i>et al.</i> (2013)	Comp.	CRFA	Aço	0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2%	22%	7 dias	70±3% e 22±2°C	365dias	Teor de fibra	Teor de fibras de 0,5% reduziu a fluência, os demais teores aumentaram
Zhao <i>et al.</i> (2016)	Comp.	Adição de cinzas volante	Aço	0%, 1%, 2% e 3%	40%	28 dias	60±5% e 20±2°C	365dias	Teor de fibra	Adição de fibras de aço reduziu a fluência
Aslani e Nejadi (2013)	Comp.	Adição de cinzas volante e escória de alto forno	Aço, poliprop. (PP) e híbrido	=	40%	28 dias	50±5% e 23±2°C	365dias	Tipo de fibra	Adição de fibra de PP aumentou a fluência, enquanto a de aço e híbrida reduziu
Chern e Youngt (1989)	Comp.	CRF	Aço	1% e 2%	25%	4, 7 e 28 dias	100% e 23°C, 50% e 23°C, 95% e 35°C	170 dias	Teor de fibra e temp.	Adição de fibras de aço reduziu a fluência
Mangat e Motamedi Azari (1985)	Comp.	CRF	Aço	1,5% e 3%	30% e 55%	28 dias	55% e 20°C	90 dias	Teor e aderência da fibra	Adição de fibras de aço reduziu a fluência
Mangat e Motamedi Azari (1986)	Comp.	CRF	Aço	1,3%, 1,5%, 2% e 3%	30%, 41% e 55%	28 dias	55% e 20°C	90 dias	Teor e aderência da fibra	Adição de fibras de aço reduziu a fluência

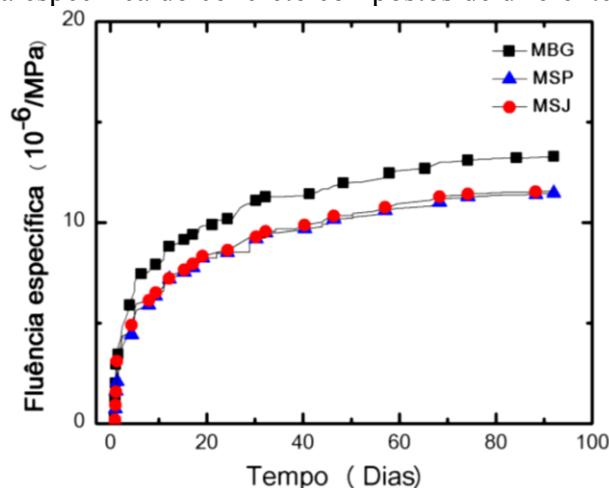
Fonte: Autor (2019)

Devido a grande quantidade de variáveis existentes e para possibilitar uma comparação de resultados, nesta pesquisa foi considerado apenas o teor de fibras como variável principal.

Silva (2015) realizou ensaios de fluência à compressão do concreto auto adensável sem adição de fibras, com composição de diferentes tipos de agregados. Por meio da Figura 17 pode-se visualizar as curvas das três matrizes analisadas, a matriz cimentícia composta por

agregados de brita granítica (MBG) obteve maiores deformações em comparação as outras matrizes cimentícias compostas por agregados de seixo dos rios Paraná e Juruá (MSP e MSJ, respectivamente). Conclui-se que o módulo de elasticidade da mistura, influenciado pelo tipo de agregado (brita possuía menor módulo de elasticidade que o seixo), está diretamente ligado à deformação por fluência do concreto.

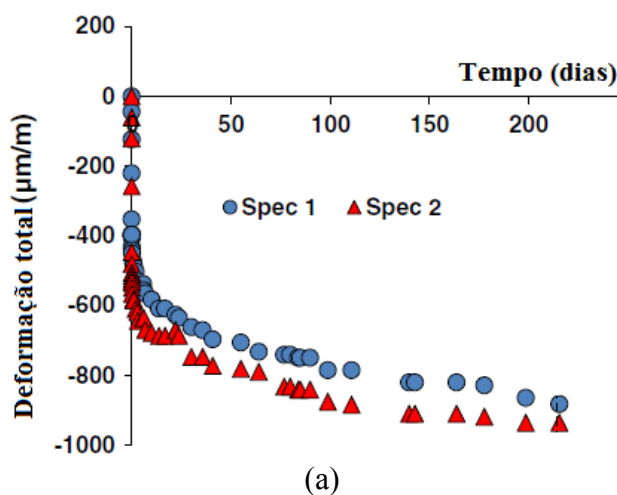
Figura 17 – Fluência específica do concreto compostos de diferentes agregados graúdos

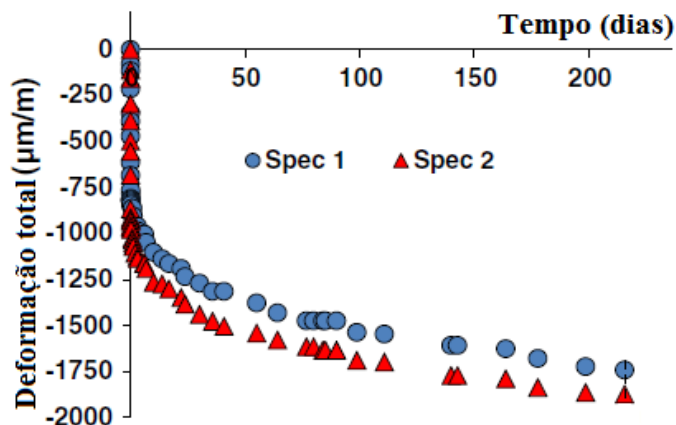


Fonte: Silva (2015).

Os experimentos realizados por Ranaivomanana, Multon e Turatsinze (2013) se basearam na análise da deformação por fluência nos três estados de tensões do concreto, submetido a níveis de carga de 30% e 50% da resistência última. São comparados os resultados de deformação e observa-se que as maiores deformações são oriundas de esforços à compressão. Quanto maior o nível de carregamento ao qual o concreto é submetido, maiores serão as deformações por fluência, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluência do concreto à níveis de carga de (a) 30% e (b) 50% da resistência última





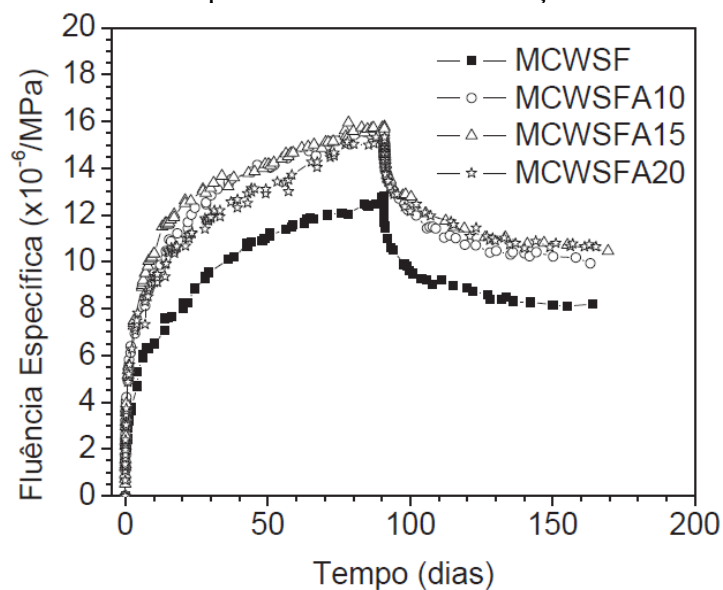
(b)

Fonte: Adaptado de Ranaivomanana, Multon e Turatsinze (2013)

Segundo Rossi, Tailhan e Le Maou (2013), a fluência básica à compressão em concreto comum, com idade igual ou superior a 28 dias, é aproximadamente três vezes maior que à tração e não varia de acordo com a forma do espécime submetido a tensão.

Segundo Velasco (2008), ao submeter espécimes de compósitos de matriz cimentícia, com substituição parcial do cimento por sílica ativa (10%, em massa) e cinza volante (20%, em massa), com adição de fibras de aço, a um carregamento constante equivalente a 40% da tensão de ruptura à compressão aos 28 dias, observou que houve um aumento da deformação por fluência no concreto, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Fluência específica de concreto reforçado com fibras de aço



Fonte: Velasco (2008)

Em que:

MCWSF: concreto sem adição de fibras;

MCWSFA10: concreto com adição de fibras de aço na fração volumétrica de 1,0%;

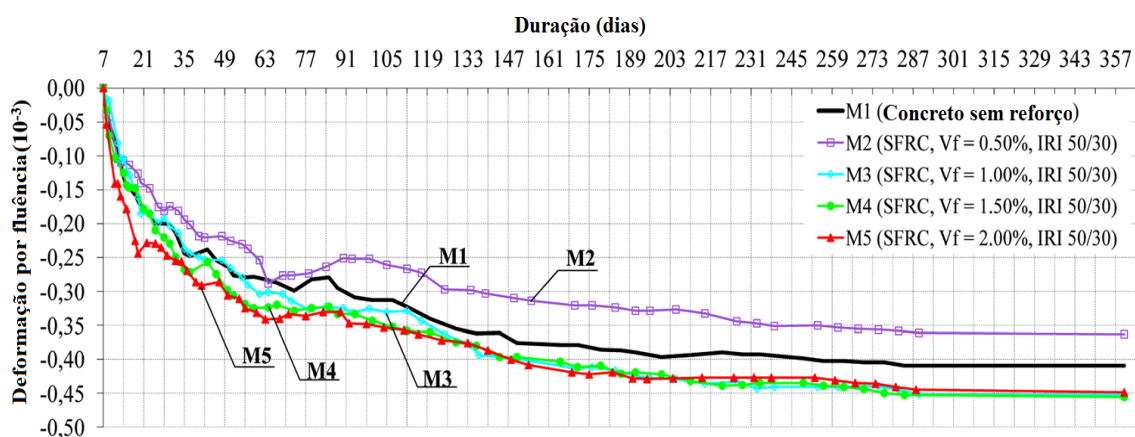
MCWSFA15: concreto com adição de fibras de aço na fração volumétrica de 1,5%;

MCWSFA20: concreto com adição de fibras de aço na fração volumétrica de 2,0%.

A justificativa apresentada por Velasco (2008) é que a adição de fibras no concreto acarreta mudança na porosidade do concreto, alterando a movimentação de água nos poros, no entanto não foi realizado ensaio para determinação do índice de vazios.

A eficácia da adição de fibras de aço no concreto, em diferentes frações volumétricas, longas (30mm) e curtas (16mm), é analisada por Saje *et al.* (2013), que concluíram que a adição de fibras curtas, com frações volumétricas de 0,5%, 1,0 %, 1,5 % e 2,0 %, causam uma redução de 11,0% na fluência do concreto comparadas a uma amostra de concreto sem adição de fibras. O concreto reforçado com fibras de aço longas, com frações volumétricas de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, apresentaram deformações iguais ou superiores ao concreto simples. No entanto, a adição de fibras longas com teor de 0,5%, em volume, ocasionou uma redução de 12% na fluência comparada ao concreto simples, conforme Figura 20. A tensão imposta nas amostras foi de 10 MPa, aproximadamente 22% da resistência última à compressão, com idade de 7 dias.

Figura 20 – Fluência do concreto reforçado com fibras de aço longas



Fonte: Traduzido de Saje *et al.* (2013)

Em que:

M1: concreto sem adição de fibras, referência para comparações;

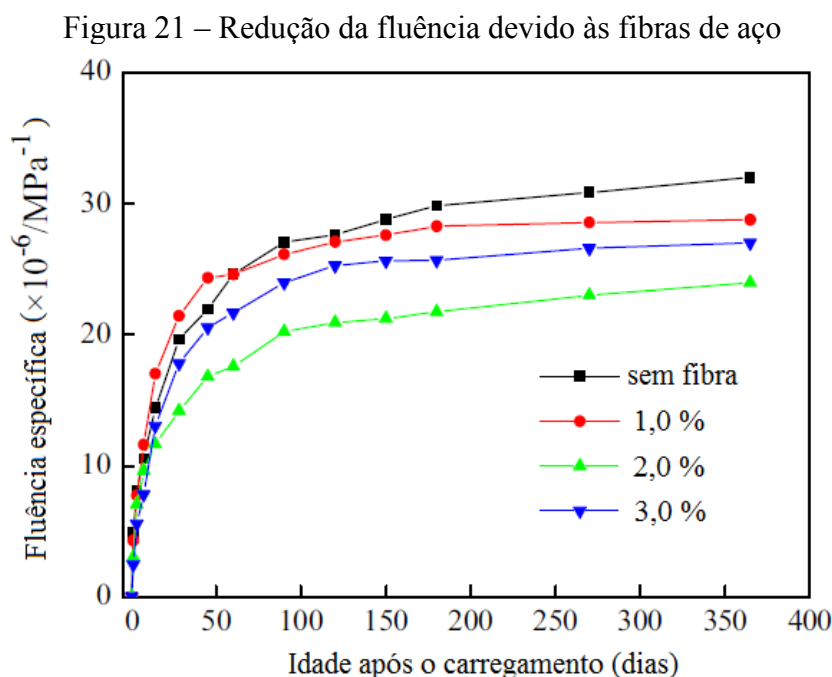
M2: concreto com adição de fibras longas de aço, teor de 0,5%, em volume;

M3: concreto com adição de fibras longas de aço, teor de 1,0%, em volume;

M4: concreto com adição de fibras longas de aço, teor de 1,5%, em volume;

M5: concreto com adição de fibras longas de aço, teor de 2,0%, em volume.

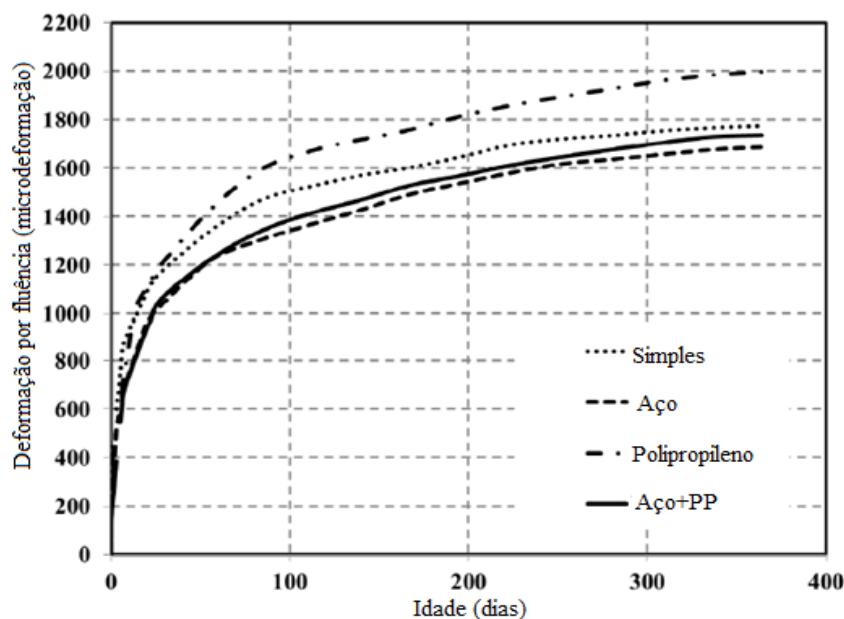
De acordo com experimentos realizados por Zhao *et al.* (2016), o concreto reforçado com fibras de aço, em frações volumétricas de 1%, 2% e 3%, apresentou uma redução de 10,1%, 25,1% e 15,5%, respectivamente, quando comparado ao concreto simples, conforme Figura 21. Nota-se que a adição de fibras de aço reduz a deformação por fluência, no entanto, ao aumentar a dosagem (de 2% para 3%) pode haver uma redução na resistência à fluência. As amostras de concreto foram submetidas a tensão equivalente a 40% da resistência última à compressão, na idade de 28 dias.



Fonte: Traduzido de Zhao *et al.* (2016)

Aslani e Nejadi (2013), compararam a evolução da deformação por fluência em quatro tipos de concreto, concreto sem adição de fibras, com adição de fibras de aço, com fibras de polipropileno (PP) e híbrido (fibras de aço e de polipropileno), submetidos a carregamento constante equivalente a 40% da resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados obtidos apontam que o concreto reforçado com fibras de aço é o que apresentou menores valores de deformação por fluência, conforme na Figura 22.

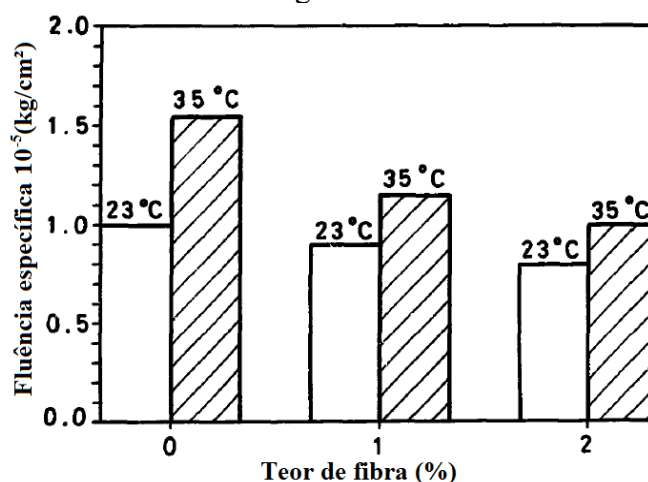
Figura 22 – Resultados experimentais de fluência no concreto



Fonte: Traduzido de Aslani e Nejadi (2013)

Chern e Youngt (1989) avaliaram o comportamento do concreto reforçado com fibras metálicas de extremidades achatadas, de comprimento 19 mm, sendo utilizados duas frações volumétricas de fibras, 1% e 2%. Foram mensuradas as deformações de fluência básica, fluência por secagem e retração. O ensaio de fluência foi realizado nas temperaturas de 23 e 35°C, com idade de carregamento de 4, 7 e 28 dias, a duração dos ensaios foram de 170 dias. Concluiu-se que a adição de fibras reduziu a fluência conforme o teor de fibras adicionada aumentou. Ao elevar a temperatura, as amostras apresentaram maiores deformações.

Figura 23 – Variação da fluência de acordo com o teor de fibras e a temperatura, com idade de carregamento de 28 dias



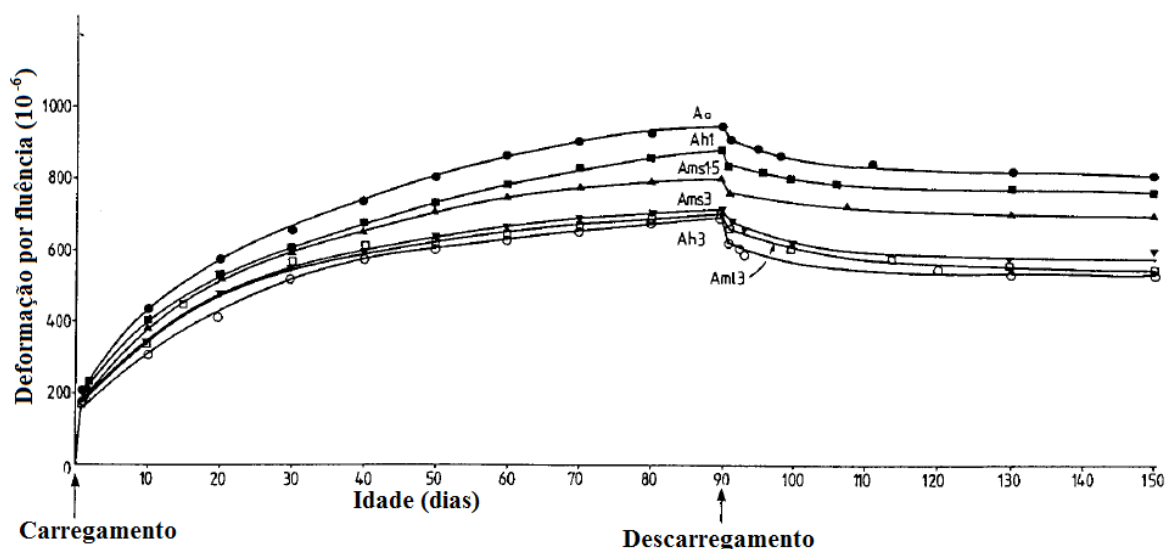
Fonte: Traduzido de Chern e Youngt (1989)

Segundo Mangat e Motamedi Azari (1985), uma adição de 3% de fibras de aço, em volume, resultou em uma diminuição em torno de 25% da deformação por fluência após 90 dias de carregamento. Observou-se que quanto maior o período de carregamento, maior a efetividade da adição de fibras de aço.

A adição de fibras de aço se mostrou mais eficiente nas amostras submetidas a tensões equivalentes a 30% da tensão de ruptura à compressão do concreto, comparado às amostras submetidas a 55%. A redução das forças de ligação da interface fibra-matriz, a elevadas tensões, leva a uma redução na contensão promovida pelas fibras de aço na deformação por fluência da matriz cimentícia (MANGAT; MOTAMEDI AZARI, 1985).

Os experimentos realizados por Mangat e Motamedi Azari (1986) apresentam resultados de redução da fluência em CRFA na ordem de 15 e 24%, de amostras com 1,5 e 3,0% de adição de fibras, em volume, respectivamente, submetidas a carregamento equivalente a tensão de 30 da resistência à compressão (Figura 24). Para uma mesma adição em volume de fibras de 3,0%, porém em amostras submetidas a um carregamento equivalente a 55% da resistência à compressão, a redução na fluência foi de 21%.

Figura 24 – Influência de diferentes tipos e teores de fibras de aço na fluência do concreto



Fonte: Traduzido de Mangat e Motamedi Azari (1986)

Em que:

A_0 = concreto sem fibras;

A_{h1} = concreto com fibras de aço com extremidades em gancho, teor de 1%;

A_{ms15} = concreto com fibras de aço lisas, comprimento de 22,5 mm, teor de 1,5%;

A_{ms3} = concreto com fibras de aço lisas, comprimento de 22,5 mm, teor de 3%;

A_{ml3} = concreto com fibras de aço lisas, comprimento de 31,8 mm, teor de 1,5%;

A_{h3} = concreto com fibras de aço com extremidades em gancho, teor de 3%;

O módulo de elasticidade das fibras é o fator de maior influência para a fluência no concreto. Fibras com o módulo de elasticidade muito maiores que o módulo do concreto simples podem evidentemente restringir a deformação por fluência, enquanto fibras com o módulo muito abaixo desempenham o papel contrário (ZHAO *et al.*, 2016).

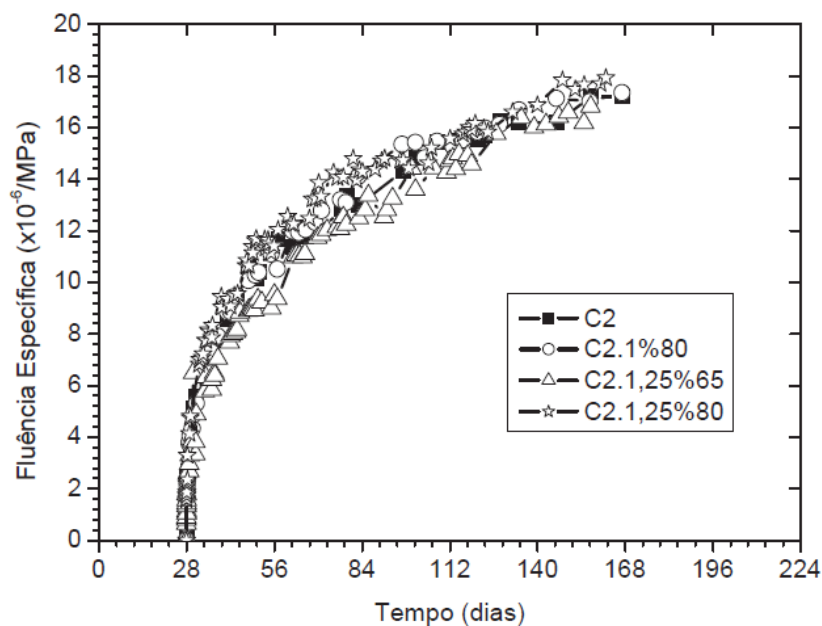
Ainda conforme Zhao *et al.* (2016), fibras mais rígidas podem reduzir o surgimento das microfissuras no concreto e distribuir a concentração de tensão na ponta das fissuras. Isso aumenta a resistência à propagação das fissuras e limita a deformação adicional do concreto, reduzindo a deformação por fluência. As fibras com baixo módulo de elasticidade podem aumentar a ductilidade do concreto quando os níveis de fissuração estão avançados, no entanto são incapazes de reduzir a deformação a longo prazo do concreto sob baixos níveis de tensão.

Em contradição ao dito por Mangat e Motamedi Azari (1986), os resultados obtidos por Blyszko (2017) mostram que o concreto reforçado com fibras apresenta maiores deformações por fluência, principalmente nas primeiras horas, quando comparado ao concreto simples de estrutura similar, com idades de 24 horas e de 28 dias, submetidos a uma tensão equivalente a 40% da resistência última à compressão.

A adição de fibras em elevados teores aumenta a porosidade e a permeabilidade no concreto e quando submetido a carregamento, ocorre movimentação e exsudação da água adsorvida, aumentando a deformação por fluência (ZHAO *et al.*, 2016).

De acordo com Marangon (2011), os resultados obtidos no ensaio de fluência à compressão mostraram que a adição de fibras de aço não influenciou na fluência específica dos concretos auto adensáveis fibrosos, uma vez que a variação observada entre os valores não foi significativa, conforme Figura 25.

Figura 25 – Fluência básica em concreto auto adensável reforçado com fibras de aço



Fonte: Marangon (2011)

Em que:

C2: matriz de referência, sem fibras;

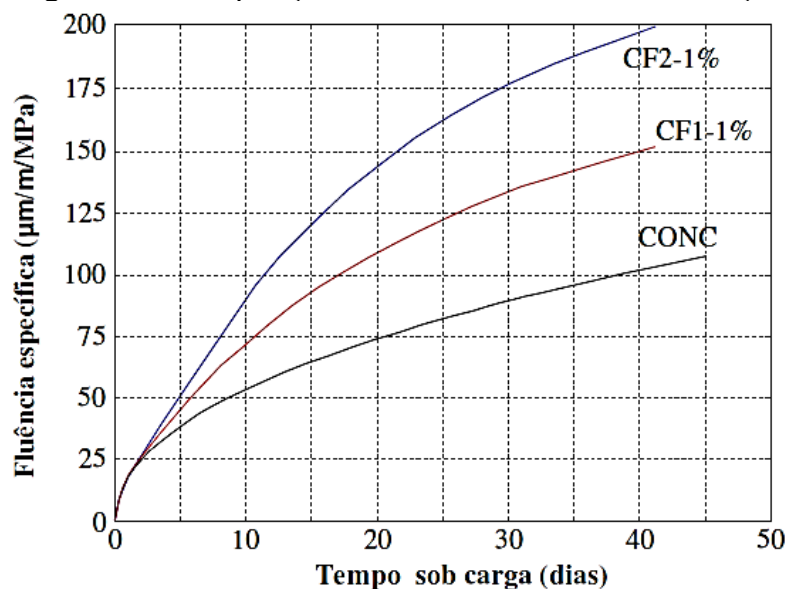
C2.1%80: matriz com adição de 1,00% de teor de fibra de aço, com relação de aspecto 80;

C2.1,25%65: matriz com adição de 1,25% de teor de fibra de aço, com relação de aspecto 65;

C2.1,25%80: matriz com adição de 1,25% de teor de fibra de aço, com relação de aspecto 80;

Bissonnette e Pigeon (1995) estudaram a influência das fibras sobre a fluência na tração uniaxial. Para tanto, foram avaliados comparativamente o comportamento de três materiais: a matriz de referência, a matriz com adição de macrofibras metálicas (16 mm de comprimento), do tipo trançada com extremidade cortada; e a matriz com adição de microfibras metálicas (3 mm de comprimento). Os corpos de prova prismáticos (50x50x70 mm) foram ensaiado em câmara climatizada, com condição ambiental de 23 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa, durante 45 dias. Observou-se que a adição das fibras proporcionou um aumento considerável das deformações por fluência, sendo que o concreto reforçado com a macrofibra apresentou, após 45 dias, fluência 42% superior à deformação correspondente da matriz, e para o concreto reforçado com microfibras, este aumento foi de 100% (Figura 26).

Figura 26 – Comparação de resultados da fluência na tração



Fonte: Adaptado de Bissonnette e Pigeon (1995)

Em que:

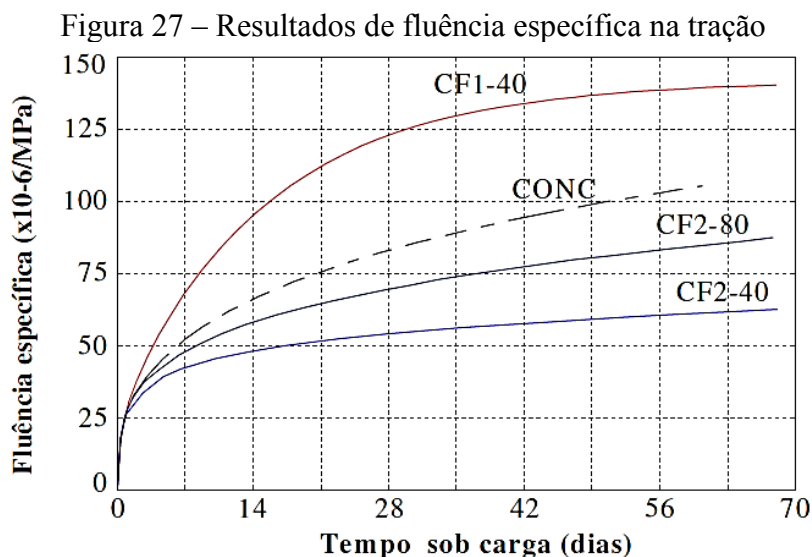
CONC: concreto sem fibras;

CF1-1%: concreto com teor de 1,0% de macrofibras metálicas;

CF2-1%: concreto com teor de 1,0% de microfibras metálicas;

Bissonnette, Pigeon e Vaysburd (2007), avaliaram experimentalmente o comportamento à fluência na tração do concreto quanto a influência de dois tipos de fibras metálicas, uma de formato ondulado (teores de fibras de 0,5% e 1,0%) e outra com ganchos nas extremidades (teor de fibra de 0,5%), ambas com comprimento de 30 mm.

O compósito resultante da adição de 0,5% (40 kg/m^3) de fibras com ganchos na extremidade apresentou aumento nas deformações por fluência entre 30% e 35%, enquanto que a mesma dosagem das fibras onduladas conduziu a uma redução na fluência da mesma ordem. Além disso, o aumento no teor das fibras onduladas, de 0,5% para 1,0% (80 kg/m^3) ocasionou uma piora no comportamento do material compósito, ainda que a curva resultante seja inferior àquela obtida para a matriz, conforme Figura 27.



Fonte: Adaptado de Bissonnette e Pigeon (1995)

Em que:

CONC: concreto sem fibras;

CF1-40: concreto com 40 kg/m³ de fibras com gancho nas extremidades;

CF2-40: concreto com 40 kg/m³ de fibras onduladas;

CF2-80: concreto com 80 kg/m³ de fibras onduladas.

Altoubat e Lange (2001) avaliaram a influência das fibras sobre o comportamento do concreto nas primeiras idades (inferiores a 3 dias). Foram realizados ensaios de tração uniaxial de fluência de curta duração (7 dias) em peças de concreto reforçado com teor de 0,5% de fibras metálicas, de extremidades achatadas de 30 mm de comprimento. Os corpos de prova com formato tipo Dog-Bone¹ foram mantidos em câmara climatizada durante o ensaio. Concluiu-se que a adição de fibra de aço causou um ligeiro aumento na fluência total de tração no concreto.

Tan, Paramasivam e Tan (1994) avaliaram experimentalmente o comportamento à fluência na flexão de vigas (100x125x2000 mm) de concreto armado reforçadas com diferentes teores (variando entre 0% a 2%) de fibras de aço com ganchos nas extremidades (30 mm de comprimento). Diversos níveis de tensão foram impostos às vigas, variando entre 35 e 80% da resistência à flexão.

¹ Corpos de prova moldados em formato de “osso de cachorro”, ou seja, trapezoidal nas extremidade e retangular em seu comprimento.

Conclui-se que o coeficiente de fluência foi significativamente inferior para os concretos reforçados com fibras de aço comparativamente aos corpos-de-prova moldados com a matriz. As vigas de CRFA apresentaram reduções de até 20% para teores de 2% de fibras. As fibras também proporcionaram menores flechas imediatas e se mostraram mais eficientes no controle das flechas diferidas para maiores níveis de tensão do que aqueles estipulados para serviço.

2.8 Recomendações normativas

São apresentados a seguir, recomendações normativas para determinação das deformações decorrentes do fenômeno da fluência, como definições, expressões matemáticas utilizadas nos cálculos e aparatos necessários para mensurar as deformações e carregamentos.

2.8.1 NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento

Segundo a NBR 6118:2014, a deformação por fluência do concreto é composta de duas partes, uma rápida e outra lenta, conforme a Equação (8). A deformação rápida é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 h após a aplicação da carga que a originou. A deformação lenta é, por sua vez, composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível e a deformação lenta reversível.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} \quad (8)$$

Em que:

ε_{cca} : é a deformação rápida;

ε_{ccf} : é a deformação lenta irreversível;

ε_{ccd} : é a deformação lenta reversível.

No instante t a deformação devido à fluência é dada pela Equação (9).

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} = \frac{\sigma_c}{E_{ci28}} \times \varphi(t, t_0) \quad (9)$$

Em que:

E_{ci28} : é o módulo de deformação inicial, para $j=28$ dias.

O coeficiente de fluência é dado pela Equação (10).

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \times \beta_d \quad (10)$$

Em que:

φ_a : é o coeficiente de fluência rápida;

$\varphi_{f\infty}$: é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

$\beta_f(t)$ e $\beta_f(t_0)$: são os coeficientes relativos a deformação lenta irreversível, em função da idade do concreto;

$\varphi_{d\infty}$: é o valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4;

β_d : é o coeficiente relativo à deformação lenta reversível, função do tempo (t, t_0) decorrido após o carregamento.

O coeficiente de fluência rápida é calculado conforme apresentado na Equação (11), para concretos de classes C20 a C45, e a Equação (12), para concretos de classes C50 a C90.

$$\varphi_a = 0,8 \times \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad (11)$$

$$\varphi_a = 1,4 \times \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad (12)$$

Em que:

$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)}$: é a função do crescimento da resistência à compressão do concreto em função da idade, no início do carregamento e no final do intervalo considerado.

O valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível são dados pela Equação (13), para concretos de classes C20 a C45, e a Equação (14), para concretos de classes C50 a C90.

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c} \quad (13)$$

$$\varphi_{f\infty} = 0,45 \times \varphi_{1c} \times \varphi_{2c} \quad (14)$$

Em que:

φ_{1c} : é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U , expresso em porcentagem (%), e da consistência do concreto dada pela Tabela 2;

φ_{2c} : é o coeficiente dependente da espessura fictícia h_{fic} da peça.

Os valores numéricos usuais para a determinação da fluência, segundo a NBR 6118:2014, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores numéricos para determinação da fluência

Tabela 2 – Valores numéricos para determinação da fluência					
Ambiente	Umidade U %	Fluência $\varphi_{1c}^{a, b}$			γ^c
		Abatimento de acordo com a NBR NM 67 cm			
		0 - 4	5 - 9	10 - 15	
Na água	-	0,6	0,8	1,0	30,0
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	1,0	1,3	1,6	5,0
Ao ar livre, em geral	70	1,5	2,0	2,5	1,5
Em ambiente seco	40	2,3	3,0	3,8	1,0

^a $\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035 \times U$ para abatimento no intervalo de 5 cm a 9 cm e $U \leq 90 \%$.

^b O valor de φ_{1c} para $U \leq 90 \%$ e abatimento entre 0 cm e 4 cm são 25 % menores e, para abatimentos entre 10 cm e 15 cm, são 25 % maiores.

^c $\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1 \times U)$ para $U \leq 90 \%$.

NOTA Para o cálculo dos valores de fluência, a consistência do concreto é aquela correspondente à obtida com o mesmo traço, sem a adição de superplastificantes e superfluidificantes.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014)

A espessura fictícia da peça, em centímetros, é determinada conforme a Equação (15).

$$h_{fic} = \gamma \times \frac{2 \times A_c}{u_{ar}} \quad (15)$$

Em que:

γ : é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente;

A_c : é a área da seção transversal da peça;

u_{ar} : é a parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar.

O coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente é dado pela Equação (16).

$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1 \times U) \quad (16)$$

O coeficiente dependente da espessura fictícia da peça é calculado conforme a Equação (17).

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad (17)$$

Quando o endurecimento do concreto é feito à temperatura ambiente de 20 °C, a idade a se considerar é a idade fictícia t , expressa em dias, determinada conforme a Equação (18).

$$t = \alpha \times t_{ef} \quad (18)$$

Em que:

α : é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento, na falta de dados experimentais, permite-se o emprego dos valores constantes na Tabela 3;

t_{ef} : é o período, expresso em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente, pode ser admitida constante.

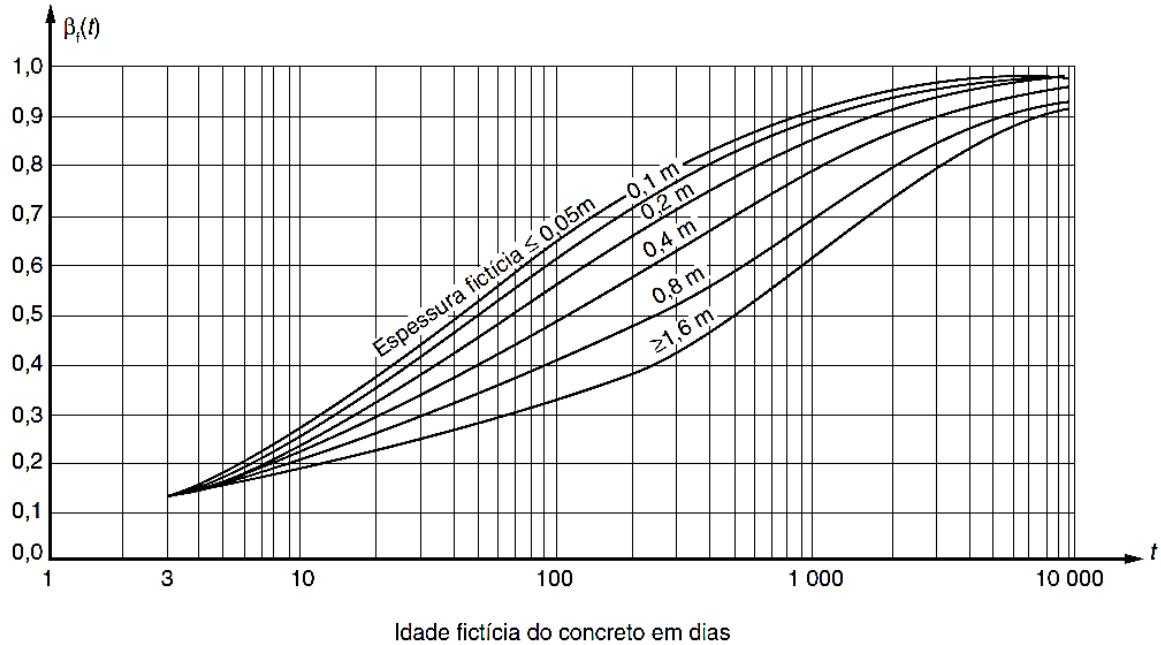
Tabela 3 – Valores para determinação do coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento

Cimento Portland (CP)	α
	Fluência
De endurecimento lento (CP III e CP IV, todas as classes de resistência)	1
De endurecimento normal (CP I e CP II, todas as classes de resistência)	2
De endurecimento rápido (CP V-ARI)	3
Legenda: CP I e CP I-S - Cimento Portland comum CP II-E, CP II-F e CP II-Z - Cimento Portland composto CP III - Cimento Portland de alto forno CP IV - Cimento Portland pozolânico CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial RS - Cimento Portland resistente a sulfatos (propriedade específica de alguns dos tipos de cimento citados)	

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014)

A Figura 28 é utilizada para determinar os coeficientes relativos à deformação lenta irreversível, em função da idade do concreto.

Figura 28 – Variação do coeficiente de deformação lenta irreversível



Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014)

A Equação (19) também pode ser utilizada para determinação dos coeficientes relativos a deformação lenta irreversível.

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + A \times t + B}{t^2 + C \times t + D} \quad (19)$$

Em que:

$$A = 42 \times h^3 - 350 \times h^2 + 588 \times h + 113;$$

$$B = 768 \times h^3 - 3060 \times h^2 + 3234 \times h - 23;$$

$$C = -200 \times h^3 + 13 \times h^2 + 1090 \times h + 183;$$

$$D = 7579 \times h^3 - 31916 \times h^2 + 35343 \times h + 1931;$$

h : é a espessura fictícia, expressa em metros (m), para valores fora do intervalo $(0,05 \leq h \leq 1,6)$ adotam-se os extremos correspondentes;

t : é o tempo, expresso em dias ($t \geq 3$).

O coeficiente relativo à deformação lenta reversível em função do tempo (t, t_0) decorrido após o carregamento é determinado de acordo com a Equação (20).

$$\beta_d(t) = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70} \quad (20)$$

2.8.2 NBR 8224:2012 – Concreto Endurecido – Determinação da Fluência

Segundo a NBR 8224:2012, entende-se por fluência a deformação devida a um carregamento mantido ao longo do tempo.

A deformação por fluência é determinada em certa idade, pela diferença entre a deformação total e a soma das deformações independentes da permanência do carregamento ao longo do tempo, sendo estas parcelas:

- deformação imediata ocorre no ato da aplicação do carregamento;
- deformação autógena ocorre ao longo do tempo de duração do ensaio de fluência.

A deformação imediata é medida durante a aplicação do carregamento e a deformação autógena é determinada em corpos de prova similares àqueles utilizados para a determinação de fluência, sendo mantidos em condições ambientais idênticas, porém, não são submetidos a carregamento.

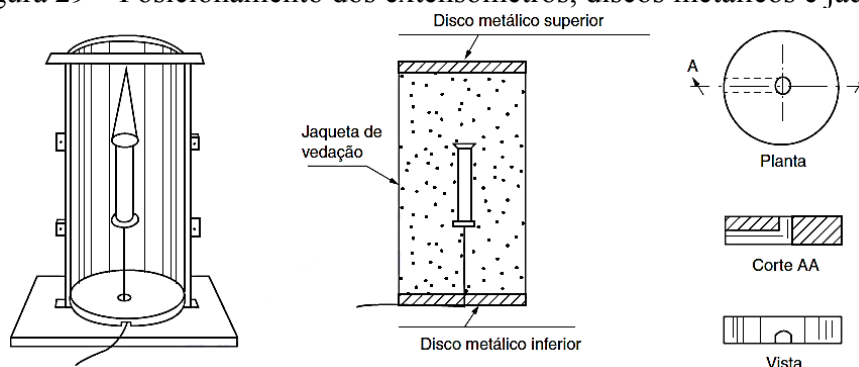
A norma recomenda amostragem composta por corpos de prova cilíndricos, com relação altura/diâmetro igual ou superior a 2. Deve-se dispor de corpos de prova complementares para ensaios de resistência à compressão, deformação autógena e módulo de deformação.

A cura padrão dos corpos de prova deve ser realizada em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa não inferior à 95%, até a idade de ensaio, embora outras condições de cura e estocagem possam ser utilizadas, de acordo com as necessidades do projeto e obra, devendo ser detalhadas de modo específicas no relatório.

Para umidades internas do concreto específicas, deve-se promover a selagem dos corpos de prova por meio de revestimento à prova d'água, denominado jaqueta, podendo o material ser constituído de borracha ou filme plástico, no caso do filme devem ser empregados no mínimo cinco camadas.

A referida norma prevê apenas a determinação das deformações do concreto devido a fluência por meio de medidores de deformações (extensômetros) embutidos, acoplados previamente à moldagem dos corpos de prova com o auxílio de discos metálicos (Figura 29).

Figura 29 – Posicionamento dos extensômetros, discos metálicos e jaqueta



Fonte: NBR 8224 (2012)

Para a execução do ensaio são determinadas as idades de carregamento, sendo recomendado que para comparação da característica de fluência de diferentes misturas de concretos, dever ser definida apenas uma idade de carregamento. A temperatura de ensaio deve ser especificada e mantida rigorosamente no intervalo de variação de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. A tensão de carregamento deve ser equivalente à $(40 \pm 2) \%$ da resistência à compressão do concreto na idade do carregamento, sendo aplicada durante um período o mais próximo possível de 30 s.

Antes do carregamento definitivo devem ser realizados dois ciclos iniciais de carregamento e descarregamento dos corpos de prova, até a carga estabelecida no ensaio. Após este processo, as leituras subsequentes devem ser realizadas da seguinte maneira:

- 30 s após o carregamento (deformação imediata);
- 5 min, 10 min e 30 min após o carregamento;
- 1 h, 2 h e 5 h após o carregamento;
- diariamente durante uma semana;
- duas vezes por semana até completar um mês;
- semanalmente até completar o ensaio.

Segundo a NBR 8224:2012, a deformação por fluência deve ser calculada conforme a Equação (21).

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_t - \varepsilon_c - \varepsilon_{cs} \quad (21)$$

Em que:

ε_t é a deformação total a partir da leitura de referência, nos corpos de prova sob carregamento, na idade considerada;

ε_c é a deformação imediata medida no ato de aplicação de carga;

ε_{cs} é a deformação média dos corpos de prova complementares não submetidos a carregamento (deformação autógena).

Para a apresentação adequada dos resultados, são solicitadas as seguintes informações no relatório de ensaio:

- tipo de agregado miúdo e graúdo, inclusive a dimensão máximo do agregado graúdo;
- marca e tipo de cimento;
- composição da mistura do concreto, assim como a porcentagem de pasta em relação ao volume de concreto
- dimensões, data de moldagem, condições de moldagem e cura;
- resistência à compressão e módulo de deformação na idade do carregamento;
- idade de carregamento, tensão aplicada, duração e condições do ensaio;
- informações sobre os aparelhos ou instrumentos utilizados nas medições do ensaio.

2.8.3 ACI Committe 209.2R-08 – Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete

Nesta norma são tratadas as variações volumétricas devido à fluência e retração do concreto, ambas dependentes do tempo. São apresentados modelos matemáticos de estimativa para previsão da fluência e retração.

A ACI 209.2R (2008) define a deformação por fluência como o aumento ao longo do tempo da deformação sob carga constante, que se inicia logo após a deformação instantânea devido ao carregamento.

São feitas recomendações para escolha e avaliação do modelo matemático para previsão das deformações, de acordo com as variáveis que mais se adequam à situação em estudo. Os modelos da ACI 209R-92 (ACI COMMITTEE 209, 1992), de Bazant-Baweja B3 (BAZANT; BAWEJA; 2000), do CEB Model Code 1990-99 (CEB MC90-99, 1999) e o GL2000 (GARDNER; LOCKMAN, 2001) são comparados pela ACI 209.2R (2008) com intuito de

demonstrar as vantagens e desvantagens de cada modelo matemático, pois se a fórmula não descreve apropriadamente o fenômeno, extrapolações dos resultados de fluência e retração desviarão da realidade.

2.8.4 CEB Model Code 2010 - Design Code e EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures

Segundo as normas europeias CEB MC (2010) e EN 1992-1-1 (2004), a fluência é uma propriedade dependente do tempo do concreto e seus efeitos devem ser, normalmente, considerados na verificação do estado limite de serviço. Os efeitos da fluência só devem ser considerados nos estados limites últimos quando os seus efeitos são significativos, como por exemplo, na verificação do estado limite último de instabilidade, em que os efeitos de segunda ordem são importantes.

A fluência do concreto depende da umidade relativa do ambiente, das dimensões do elemento e da composição do concreto. É influenciada também pela idade do concreto no instante da aplicação da carga, variando de acordo com a magnitude e duração do carregamento (CEB MC, 2010; EN 1992-1-1, 2004).

O coeficiente de fluência $\varphi(t, t_0)$ está relacionado ao módulo de elasticidade tangencial E_c , o qual é determinado pela Equação (22), que pode ser utilizada quando o concreto não está sujeito a tensões de compressão superiores a 45% do f_{ck} , na idade do carregamento.

$$E_c = 1,05 \times E_{cm} \quad (22)$$

Em que:

E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto, aos 28 dias.

A deformação devido a fluência do concreto, no tempo $t = \infty$, para uma tensão de compressão constante, aplicada no concreto com idade t_0 , é dada pela Equação (23).

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \times \left(\frac{\sigma_c}{E_c} \right) \quad (23)$$

Quando a tensão de compressão excede o valor de $45\% f_{ck}$, na idade do carregamento, então a fluência não-linear deve ser considerada. Nestes casos, o coeficiente de fluência deve ser calculado conforme a Equação (24).

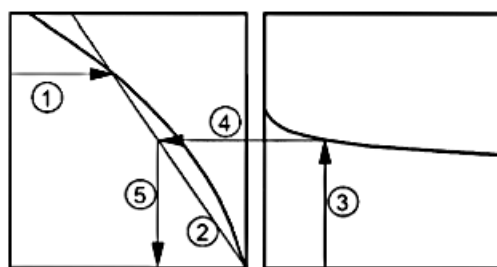
$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \exp(1,5 \times (k_\sigma - 0,45)) \quad (24)$$

Em que:

$\varphi_{nl}(\infty, t_0)$ é o coeficiente de fluência não-linear, que substitui $\varphi(\infty, t_0)$ na Equação (23);
 k_σ é a relação tensão-deformação $\sigma_c / f_{ck}(t_0)$, no qual σ_c é a tensão de compressão e $f_{ck}(t_0)$ é a resistência característica à compressão, no momento do carregamento.

A norma EM 1992-1-1 (2004) apresenta um método de determinação do coeficiente de fluência $\varphi(\infty, t_0)$ para concreto submetido a condições ambientais normais, que é ilustrado pela Figura 30.

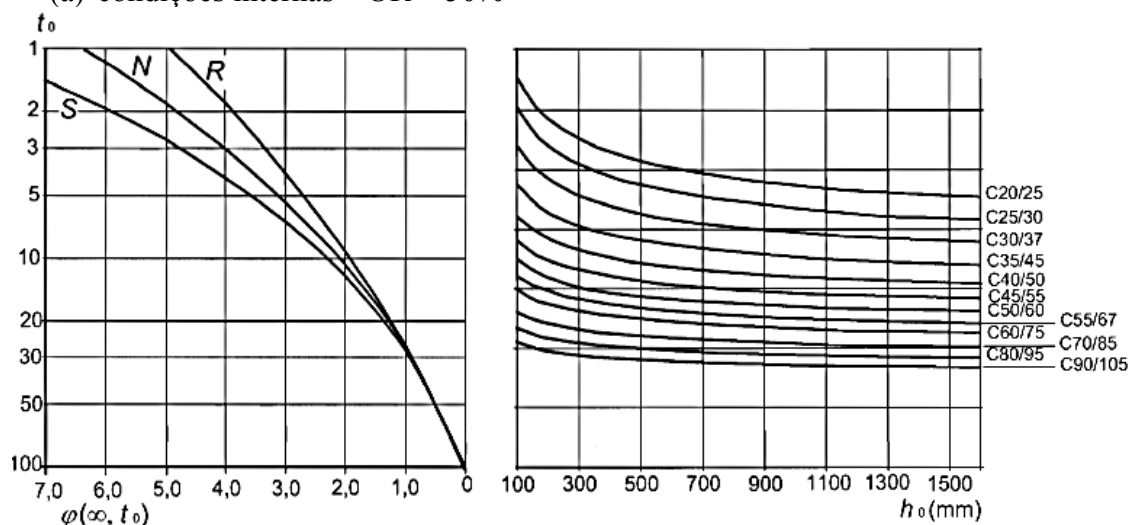
Figura 30 – Método de determinação do coeficiente de fluência para concreto

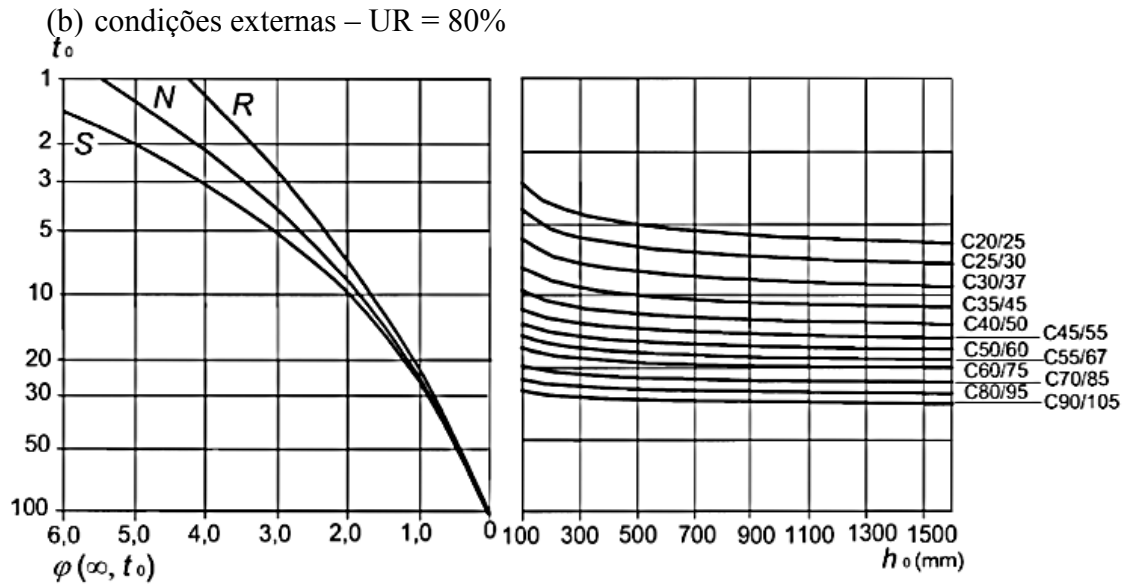


Nota:

- A interseção entre as linhas 4 e 5 também pode ser acima do ponto 1;
- Para $t_0 > 100$ é suficientemente preciso assumir que $t_0 = 100$ (e usar a linha tangente).

(a) condições internas – UR = 50%





Fonte: Traduzido de EN 1992-1-1 (2004)

Em que:

$\varphi(\infty, t_0)$ é o coeficiente de fluência;

t_0 é a idade do concreto no instante do carregamento, em dias;

S, N e R são correspondentes às classes S, N e R de resistência à compressão do cimento;

h_0 é o tamanho teórico da amostra de concreto, conforme demonstrado na Equação (25).

$$h_0 = \frac{(2 \times A_c)}{u} \quad (25)$$

Em que:

A_c é a área transversal do concreto, em mm²;

u é o perímetro da superfície que está exposta, submetida à secagem, em milímetros.

Os valores apresentados acima são válidos para temperaturas ambiente entre -40°C e +40°C e uma média de umidade relativa entre UR = 40% e UR = 100%.

No Anexo B (informativo) da EN 1992-1-1 (2004) são apresentadas expressões matemáticas para determinação do coeficiente de fluência, conforme Equação (26).

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \times \beta_c(t, t_0) \quad (26)$$

Em que:

φ_0 é o coeficiente de fluência teórico e é estimado conforme a Equação (27).

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) \quad (27)$$

Em que:

φ_{RH} é um fator que permite o efeito da umidade relativa no coeficiente de fluência teórico, calculado de acordo com a Equação (28), para $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$, e a Equação (29), para $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$.

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - U / 100}{0,1 \times \sqrt[3]{h_0}} \quad (28)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - U / 100}{0,1 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2 \quad (29)$$

Em que:

U é a umidade relativa do meio ao que o concreto está exposto, em porcentagem.

$\beta(f_{cm})$ é um fator que permite o efeito da resistência à compressão do concreto no coeficiente de fluência teórico, determinado conforme a Equação (30).

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (30)$$

Em que:

f_{cm} é a resistência à compressão média do concreto aos 28 dias, em MPa.

$\beta(t_0)$ é um fator que permite o efeito da idade do concreto no momento do carregamento no coeficiente de fluência teórico, de acordo com a Equação (31).

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \quad (31)$$

h_0 é o tamanho teórico da amostra de concreto, em milímetros, determinado pela Equação (25).

$\beta_c(t, t_0)$ é um coeficiente que descreve o desenvolvimento da fluência ao decorrer do tempo, após o carregamento, e é estimado conforme a Equação (32).

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} \quad (32)$$

Em que:

t é a idade do concreto, em dias, no momento considerado;

t_0 é a idade do concreto no momento do carregamento, em dias;

β_H é um coeficiente dependente da umidade relativa e do tamanho teórico, em porcentagem e milímetros, respectivamente, de acordo com a Equação (33), para $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$, e a Equação (34), para $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$.

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 \times UR)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \quad (33)$$

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 \times UR)^{18} \right] h_0 + 250 \times \alpha_3 \leq 1500 \times \alpha_3 \quad (34)$$

Em que:

$\alpha_{1/2/3}$ são coeficientes para considerar a influência da resistência do concreto, conforme as Equações (35), (36) e (37).

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad (35)$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad (36)$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} \quad (37)$$

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico do CRFA quanto à fluência. A escolha da utilização deste tipo de concreto reforçado com fibras é baseada nas propriedades mecânicas de reforço da fibra de aço e no intuito de dar continuidade nas pesquisas anteriormente desenvolvidas por Arif (2014), Vitor (2017), Pereira (2017) e Dias (2018) no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU).

As classes de resistência analisadas de 25 e 50 MPa foram selecionadas devido à ampla utilização no mercado brasileiro nesta faixa de resistência. Os teores volumétricos de 0,37 a 0,77% de fibras de aço foram determinados baseados na literatura (BENTUR; MINDESS, 2006, FIGUEIREDO, 2011a; FIGUEIREDO, 2011b) que aponta que teores inferiores a 0,25% de adição de fibras de aço no concreto não apresentam alterações significantes no desempenho mecânico como material de reforço, e que teores superiores a 0,77% inviabilizam a utilização do CRFA, quanto utilizados métodos convencionais de adensamento e aplicação do material.

Para a avaliação do desempenho do CRFA à fluência, alguns procedimentos preliminares foram realizados, como a caracterização dos agregados, moldagem de corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas do concreto.

No Laboratório de Materiais e Estruturas da FECIV/UFU foi produzido o CRFA e foram moldados corpos de prova para a realização de todos os ensaios.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de fluência foram elaborados e parcialmente fabricados no laboratório, com exceção do equipamento responsável pela aplicação da carga de ensaio.

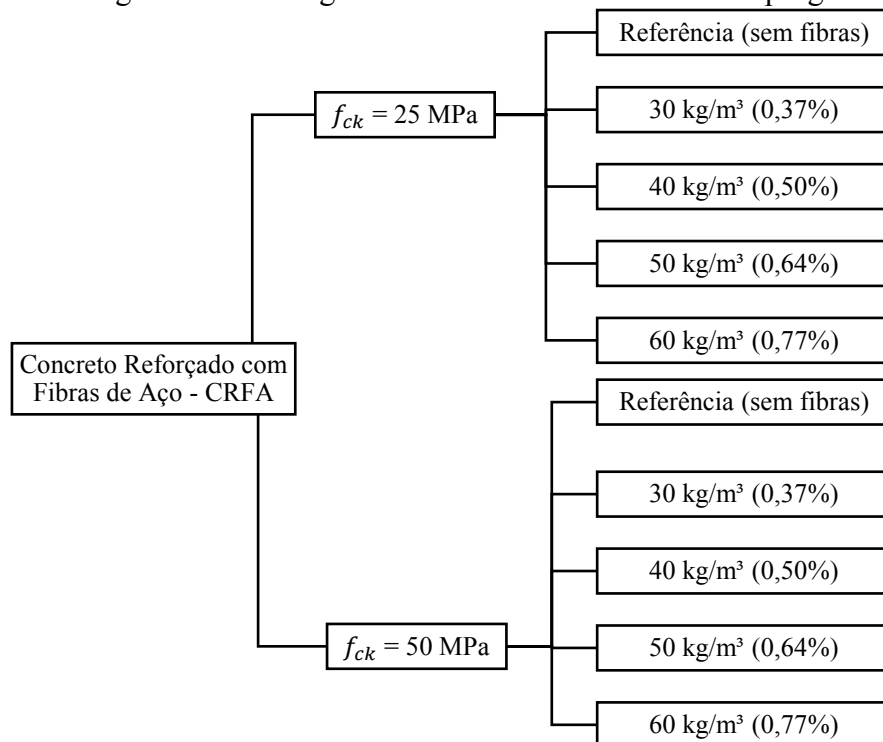
3.2 Planejamento experimental

O planejamento experimental considerou a adoção de dosagens estudadas em pesquisas realizadas na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU) utilizando corpos de prova cilíndricos, com dimensões 10x20 cm, baseado nos estudos feitos por Vitor (2017) e Dias (2018). A determinação dos teores de fibra do CRFA foi realizada com base em resultados de ensaios de tenacidade à flexão e análise do comportamento *deflection-hardening* obtidos pelo método ASTM C1609 (2012).

Assim, foi possível realizar comparações entre os resultados obtidos previamente e otimizar o tempo de pesquisa, tendo em vista que os experimentos são dependentes do tempo.

Esse planejamento constituiu em utilizar dois valores de classe de resistência característica à compressão, e quatro dosagens de concretos contendo fibras de aço e concreto referência (sem fibra) conforme apresentado na Figura 31, totalizando 10 situações de estudo.

Figura 31 – Fluxograma das variáveis em análise do programa experimental



Fonte: Autor (2019)

Para cada combinação entre as resistências características e o volume de fibras foram moldadas quantidades de corpos de prova suficientes a fim de avaliar mecanicamente o CRFA, caracterizando o material quanto as suas propriedades, tais como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. A Tabela 4 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para a realização dos ensaios de caracterização e do ensaio de fluência.

Tabela 4 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada dosagem e ensaio

Dosagem		Quantidade de corpos de prova				
		Resistência à compressão	Resistência à tração (compressão diametral)	Módulo de Elasticidade	Fluência	Total
25 MPa	Referência (sem fibra)	3	3	6	4	16
	30 kg/m ³ (0,37%)	3	3	6	4	16
	40 kg/m ³ (0,50%)	3	3	6	4	16
	50 kg/m ³ (0,64%)	3	3	6	4	16
	60 kg/m ³ (0,77%)	3	3	6	4	16
50 MPa	Referência (sem fibra)	3	3	6	4	16
	30 kg/m ³ (0,37%)	3	3	6	4	16
	40 kg/m ³ (0,50%)	3	3	6	4	16
	50 kg/m ³ (0,64%)	3	3	6	4	16
	60 kg/m ³ (0,77%)	3	3	6	4	16

Fonte: Autor (2019)

3.3 Materiais

São apresentados a seguir os materiais utilizados para a produção do concreto em análise, como agregados, aglomerantes, aditivos *etc.*

3.3.1 Aglomerante

Para a produção do concreto foi utilizado Cimento *Portland* composto do tipo CP II-F-40, conforme classificado pela ABNT NBR 16697:2018.

Foram realizados ensaios de determinação de massa específica e finura, conforme as normas ABNT NBR NM 23:2001 e NBR 11.579:2012, respectivamente, com intuito de analisar as propriedades físicas do material quanto ao atendimento aos limites normativos. A Tabela 5 apresenta as características físicas do aglomerante utilizado.

Tabela 5 – Caracterização do Cimento *Portland* CP II-F-40

Propriedades físicas	CP II 40	Limites	Norma ABNT
Massa específica (kg/m ³)	3,09	-	NBR NM 23:2001
Finura - Resíduo na peneira 200 mm (%)	0,07	< 8	NBR 11.579:2012

Fonte: Autor (2019)

3.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural lavada de rio retirada na região do Triângulo Mineiro do tipo fina e média. Os agregados foram classificados conforme a norma ABNT NBR 7211:2009. Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR NM 45:2006, NBR NM 52:2009 e NBR NM 248:2003, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização dos agregados miúdos

Ensaio realizado	Resultados		Norma ABNT
Massa específica (g/cm ³)	2,587	2,610	NBR NM 52:2009
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,326	1,397	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	1,2	2,4	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	0,93	2,17	NBR NM 248:2003
Granulometria	Areia fina	Areia média	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor (2019)

O módulo de finura da areia fina não se enquadra em nenhum dos limites de aceitação da norma ABNT NBR 7211:2009. No entanto todos os concretos foram produzidos com o mesmo material, portanto não houve prejuízos na validação dos resultados por se tratar de uma análise comparativa. O módulo de finura da areia média está no intervalo da zona utilizável inferior.

As características físicas dos agregados miúdos utilizados por Vitor (2018) são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização dos agregados miúdos utilizados por Vitor (2018)

Ensaio realizado	Resultados		Norma ABNT
Massa específica (g/cm ³)	2,587	2,610	NBR NM 52:2009
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,326	1,397	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	1,2	2,4	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	0,93	2,17	NBR NM 248:2003
Granulometria	Areia fina	Areia média	NBR NM 248:2003

Fonte: Adaptado de Vitor (2018)

Nota-se que as massas específicas dos agregados miúdo utilizados são semelhantes, assim como o diâmetro máximo. No entanto os módulos de finura dos agregados utilizados por Vitor (2018) são ligeiramente maiores do que os utilizados nesta pesquisa.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos, areia fina e areia média, podem ser visualizados no Apêndice A deste trabalho.

3.3.3 Agregado graúdo

Foi utilizado agregado graúdo proveniente do britamento de rocha basalto na região do Triângulo Mineiro, de dois tipos: dimensão máxima de 12,5 mm, denominado brita 1, e 19,0 mm, denominado brita 2. A classificação dos agregados foi realizada conforme a ABNT NBR 7211:2009.

Os ensaios de caracterização de ambos os tipos de brita foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR NM 45:2006, NBR NM 53:2009 e NBR NM 248:2003, cujos resultados podem ser vistos nas Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização dos agregados graúdos

Ensaio realizado	Resultados		Norma ABNT
Massa específica (g/cm ³)	2,801	2,925	NBR NM 52:2009
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,440	1,476	NBR NM 45:2006
Massa unitária estado compactado (g/cm ³)	1,624	1,688	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	12,5	19,0	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	5,38	6,65	NBR NM 248:2003
Granulometria	Brita 0	Brita 1	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor (2019)

As características físicas dos agregados graúdos utilizados por Vitor (2018) são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização dos agregados graúdos utilizados por Vitor (2018)

Ensaio realizado	Resultados		Norma ABNT
Massa específica (g/cm ³)	2,587	2,610	NBR NM 52:2009
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,326	1,397	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	1,2	2,4	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	0,93	2,17	NBR NM 248:2003
Granulometria	Areia fina	Areia média	NBR NM 248:2003

Fonte: Adaptado de Vitor (2018)

A massa específica e a dimensão máxima dos agregados utilizados por Vitor (2018) e nesta pesquisa não apresentam diferenças significativas. Os módulos de finura dos agregados utilizados por Vitor (2018) são ligeiramente maiores que os utilizados nesta pesquisa.

As curvas granulométricas e seus respectivos limites normativos são apresentados no Apêndice A deste trabalho.

Apesar do agregado graúdo utilizado, tipo brita 1, não se enquadrar na zona de utilização descrita na norma NBR NM 248:2003, todas as amostras de concreto foram produzidas utilizando o mesmo agregado, desta forma não houve prejuízos na validação dos resultados por se tratar de uma análise comparativa.

3.3.4 Aditivo

O aditivo de alta redução de água (superplastificante tipo II) MasterGlenium® 3400 disponibilizado pela BASF S.A. foi empregado a fim de se obter a trabalhabilidade necessária para a moldagem dos corpos de prova. As características desse aditivo, de acordo com o catálogo do fabricante estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização do aditivo superplastificante

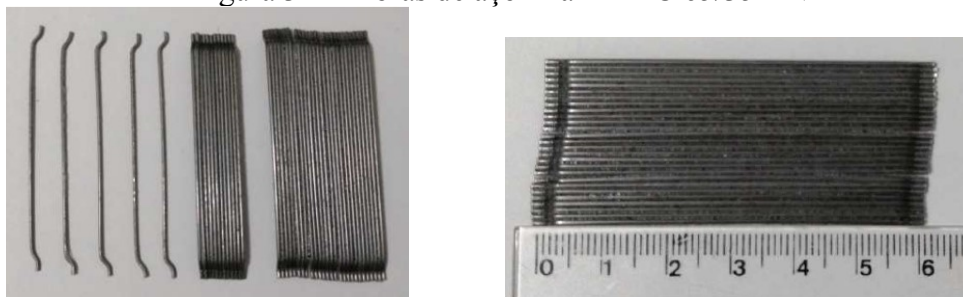
Dados técnicos	Características
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido amarelado
Densidade (g/cm ³)	1,090 a 1,130
pH	8,0 – 10,0
Teor de sólidos (%)	42,5 a 46,5

Fonte: Catálogo do fabricante (2017)

3.3.5 Fibras de aço

O tipo de fibra (Figura 32) selecionado foi a RC 65/35 BN, com as seguintes características: resistência a tração mínima de 1.150 N/mm², 14.500 fibras/kg, fator de forma 64, comprimento 35 mm e diâmetro de 0,55 mm. A letra R indica dupla ancoragem nas extremidades. A letra C se refere à colagem das fibras que comercializadas na forma de pentes. O primeiro número indica a classe e o segundo o comprimento da fibra. A letra B indica aço claro, sem cobrimento, enquanto a letra N significa que o aço tem baixo teor de carbono.

Figura 32 – Fibras de aço Dramix RC 65/35 BN



Fonte: Autor (2019).

Segundo a NBR 15530:2007, a fibra escolhida foi classificada como Tipo A (fibra de aço com ancoragens nas extremidades) e classe 1 (oriunda de arame trefilado a frio).

A fibra de aço foi escolhida levando-se em consideração os seguintes fatores: comprimento, fator de forma (l/d), teor de fibras incorporado no compósito e diâmetro máximo do agregado constituinte na matriz no concreto. Estes são fatores que mais influenciam na determinação do incremento de desempenho dos concretos produzidos.

Vitor (2017) realizou a verificação dimensional de 60 amostras de fibras de aço do mesmo lote utilizado nesta pesquisa, cujas dimensões são medidas por meio de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Os resultados obtidos podem ser analisados na Tabela 11.

Tabela 11 – Verificação dimensional das fibras de aço

Fibras de aço	Dimensão média (mm)	Variação encontrada relativa ao valor especificado pelo fabricante, em %	Variação permitida, em %, pela ABNT NBR 15530:2007
Comprimento	59,40	1,00	± 5
Diâmetro da fibra	0,87	3,33	± 5
Fator de forma	68,70	4,61	± 5

Fonte: Adaptado de Vitor (2017)

Posteriormente foi feita uma verificação de defeitos utilizando 200 g de fibras de aço do único lote utilizado, na qual não foram constatados defeitos descritos na NBR 15530:2007 como fibras emendadas no topo ou fibras sem ancoragem.

As fibras de aço Dramix, fabricadas pela Belgo Bekaert Arames e disponíveis no mercado brasileiro, são utilizadas nesta pesquisa.

3.3.6 Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE).

3.4 Concretos estudados

Como mencionado anteriormente, o proporcionamento de materiais utilizado nesta pesquisa é baseado nos estudos de Vitor (2017) e Dias (2018).

A Tabela 12 apresenta o consumo de materiais, por m³ de concreto, das dosagens de referência para a série C25, com f_{ck} de 25 MPa e a série C50, com f_{ck} de 50 MPa.

Tabela 12 – Consumo de materiais para as séries C20 e C40

Material	Série C25	Série C50
	$f_{ck} = 20,0$ MPa	$f_{ck} = 40,0$ MPa
Cimento CP II 40 (kg/m ³)	300,30	447,00
Agregado miúdo - módulo de finura 0,93 (kg/m ³)	276,28	250,32
Agregado miúdo - módulo de finura 2,17 (kg/m ³)	516,52	464,88
Agregado graúdo - dimensão máx. 12,5 mm (kg/m ³)	252,25	268,20
Agregado graúdo - dimensão máx. 19,0 mm (kg/m ³)	757,76	804,60
Água (l/m ³)	198,20	179,80
Aditivo superplastificante (l/m ³)	0,86	2,34
Fator a/c	0,66	0,40
Proporção aglomerado/argamassa em massa	1:6	1:4

Fonte: Vitor (2017)

A partir do proporcionamento referência para o concreto simples das séries C25 e C50, foram formadas oito dosagens de CRFA, sendo quatro para cada série. O proporcionamento dos materiais está apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Proporcionamento dos materiais utilizados para produção do concreto

Material	Série C25			
	30 kg/m ³	40 kg/m ³	50 kg/m ³	60 kg/m ³
Cimento CP II 40 (kg/m ³)	300,30	300,30	300,30	300,30
Agregado miúdo - módulo de finura 0,93 (kg/m ³)	276,28	276,28	276,28	276,28
Agregado miúdo - módulo de finura 2,17 (kg/m ³)	516,52	516,52	516,52	516,52
Agregado graúdo - Ø máx. 12,5 mm (kg/m ³)	252,25	252,25	252,25	252,25
Agregado graúdo - Ø máx. 19,0 mm (kg/m ³)	757,76	757,76	757,76	757,76
Água (l/m ³)	198,20	198,20	198,20	198,20
Aditivo superplastificante (l/m ³)	0,86	0,86	1,06	1,14
Teor de ar (%)	2,00	2,00	2,00	2,00
Teor de fibra (kg/m ³)	30	40	50	60
Teor de fibra em volume (%)	0,37	0,50	0,64	0,77
Material	Série C50			
	30 kg/m ³	40 kg/m ³	50 kg/m ³	60 kg/m ³
Cimento CP II 40 (kg/m ³)	447,00	447,00	447,00	447,00
Agregado miúdo - módulo de finura 0,93 (kg/m ³)	250,32	250,32	250,32	250,32
Agregado miúdo - módulo de finura 2,17 (kg/m ³)	464,88	464,88	464,88	464,88
Agregado graúdo - Ø máx. 12,5 mm (kg/m ³)	268,20	268,20	268,20	268,20
Agregado graúdo - Ø máx. 19,0 mm (kg/m ³)	804,60	804,60	804,60	804,60
Água (l/m ³)	179,80	179,80	179,80	179,80
Aditivo superplastificante (l/m ³)	2,34	2,77	2,98	3,41
Teor de ar (%)	2,00	2,00	2,00	2,00
Teor de fibra (kg/m ³)	30	40	50	60
Teor de fibra em volume (%)	0,37	0,50	0,64	0,77

Fonte: Adaptado de Vitor (2017)

Devido ao baixo teor volumétrico de fibras de aço e a baixa quantidade de aditivo superplastificante não foi realizada correção na quantidade de agregados e água na dosagem para produção do CRFA.

3.5 Produção, moldagem, cura e preparação dos corpos de prova

O teor de umidade dos agregados foi determinado para correções do volume de água adicionado aos concretos.

O volume de concreto para cada dosagem foi de 0,035 m³, incluindo perda estimada de 25%. Na produção do concreto foi utilizada uma betoneira de capacidade de 400 l e os materiais foram medidos em balança com precisão de 0,01 kg.

A mistura do concreto seguiu a seguinte sequência para a execução de todas as dosagens:

- 1) imprimação da betoneira com a finalidade de reduzir a perda de água e finos da mistura, o excesso da imprimação foi descartado;
- 2) colocação na betoneira de toda a porção de agregado graúdo, metade da água de amassamento e a quantidade total do cimento, permanecendo em mistura por um tempo de 1 min aproximadamente;
- 3) posteriormente, colocação do agregado miúdo e mistura dos materiais por mais 1 min;
- 4) em seguida colocação do restante da água de amassamento em que estava disperso o aditivo superplastificante, com mistura dos materiais por mais 1 min.
- 5) por último, para as dosagens com fibras em sua composição, adição das fibras de aço de maneira lenta para que não ocorra a formação de ouriços. Manter em mistura por mais 5 min, totalizando tempo de mistura de 9 min aproximadamente.

As fibras de aço utilizadas na pesquisa são apresentadas na Figura 33. Estas fibras são agrupadas por meio químico. Quando elas são misturadas ao concreto, os pentes têm as suas colas dissolvidas, permitindo uma homogeneização facilitada para o compósito (FIGUEIREDO, 2011b; ACI 544.1R, 2009).

Figura 33 – Fibras de aço agrupadas em forma de pentes



Fonte: Autor (2019)

A consistência do concreto foi avaliada por meio do ensaio de tronco de cone normatizado pela NBR NM 67:1998, como mostra a Figura 34. A massa específica foi determinada conforme NBR 9833:2009.

Figura 34 – Determinação da consistência do concreto no estado fresco



Fonte: Autor (2019)

Os resultados encontrados para o abatimento de tronco de cone e massa específica são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone e massa específica

Série	Abatimento de tronco de cone (mm)	Massa específica (kg/m ³)
C25 - Ref. (sem fibra)	135	2353,7
C25 - 0,38% fibra	125	2358,5
C25 - 0,50% fibra	110	2359,1
C25 - 0,64% fibra	130	2363,4
C25 - 0,77% fibra	140	2365,3
C50 - Ref. (sem fibra)	100	2457,1
C50 - 0,38% fibra	165	2488,3
C50 - 0,50% fibra	140	2483,8
C50 - 0,64% fibra	175	2475,5
C50 - 0,77% fibra	170	2484,9

Fonte: Autor (2019)

Os resultados de abatimento de tronco de cone medidos permaneceram entre 25 mm e 175 mm, intervalo recomendado pela ACI 544.3R (2008). O aditivo superplastificante desempenhou função crucial na trabalhabilidade do CRFA no estado fresco, conforme o teor de fibras aumentou, o abatimento diminuía, sendo necessário uma adição maior do aditivo.

Após a produção do CRFA foram moldados os corpos de prova (Figura 35). Para tal moldagem foram utilizados moldes metálicos padronizados cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a realização dos ensaios de resistência à

compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e fluência.

Figura 35 – Corpos de prova moldados com CRFA



Fonte: Autor (2019)

O procedimento de moldagem foi realizado seguindo as recomendações da norma NBR 5738:2016, a qual indica a moldagem em duas camadas para abatimento inferior à 160 mm, com adensamento manual aplicando 12 golpes em cada camada, com haste apropriada.

Após a moldagem, adensamento, acabamento e identificação os corpos de prova foram colocados em câmara úmida. O tempo em câmara úmida foi de vinte e quatro horas, após este período, as amostras foram desinformadas e colocadas em cura submersa em água com cal até a data dos ensaios. A mudança no método de cura ocorreu devido a falta de espaço disponível na câmara úmida e a duração de cura dos concretos.

Finalizado o período de cura por imersão de 28 dias do concreto, os mesmos foram retirados do tanque de cura e levados à retífica elétrica para regularização das superfícies de ensaio, conforme Figura 36. O procedimento é recomendado pela norma NBR 5738:2016.

Figura 36 – Retificação das superfícies de ensaio dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019)

Concluído o processo de regularização das superfícies dos corpos de prova, os mesmos foram inseridos e mantidos em estufa, com temperatura controlada de 60 °C, por aproximadamente 52 horas para redução da umidade interna do concreto. Foi necessário um estudo prévio para determinação do tempo necessário para redução da umidade interna do concreto, sem prejuízos na estrutura do material.

Sabendo que o comportamento a fluência pode ser alterado pela umidade interna dos corpos de prova e pelas condições do ambiente, foi medida a umidade relativa da sala de ensaio e obteve-se média de 50%. Assim, foi necessário obter a curva de dessorção dos concretos estudados. Apenas o concreto com classe de resistência de 25 MPa foi analisado, sendo considerado como parâmetro para a classe C50. Foi escolhida uma dosagem com fibras como sendo representativa e uma sem fibras (Figura 37).

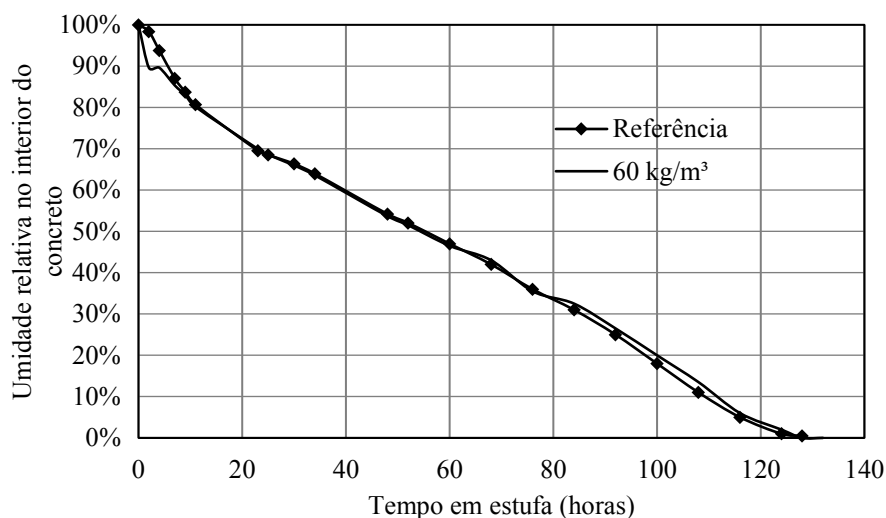
Foram moldados corpos de prova (Tabela 15) para a determinação da curva de dessorção do CRFA, com o objetivo de atingir uma umidade interna no concreto igual à do meio em que estava exposto, de aproximadamente 50%.

Tabela 15 – Quantidade de corpos de prova moldados para determinação da taxa de secagem da umidade interna

Dosagem	Quantidade de corpos de prova	Período em estufa (dias)	Temperatura (°C)
C25 - Ref. (sem fibras)	3	5	60
C25 - 60 kg/m ³	3	5	60

Fonte: Autor (2019)

Figura 37 – Curva de secagem de corpos de prova da série C25 à temperatura de 60 °C

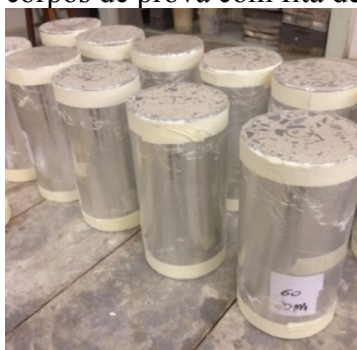


Fonte: Autor (2019)

A temperatura utilizada na realização do ensaio foi determinada levando em consideração que elevadas temperaturas poderiam alterar a microestrutura das amostras, desta forma utilizou-se um valor intermediário de 60° C, uma vez que nesta temperatura a degradação do C-S-H é menor (OLIVEIRA, 2015). A escolha do valor de umidade relativa interna do concreto se baseou nas recomendações da norma estadunidense ACI 209.2R (2008). Foram ensaiados apenas o concreto referência (sem fibras) e o CRFA com adição de 60 kg/m³ de fibras para obtenção de um valor médio de horas de permanência na estufa.

Após atingida a umidade relativa interna desejada (50%), os corpos de prova foram selados (Figura 38) com fita metálica de alumínio (5 camadas) e filme plástico (3 camadas) com intuito de evitar a perda de água do concreto para o meio ao qual se encontrava exposto, pois a movimentação de água nos poros interstícios do concreto é um fator de grande influência nas deformações por fluência (RILEM TC 107, 1998).

Figura 38 – Selagem dos corpos de prova com fita de alumínio e plástico filme



Fonte: Autor (2019)

Para garantir que não houvesse perda de água do concreto para o meio, as massas dos corpos de prova foram medidas antes e após a conclusão do ensaio de fluência, em balança com precisão de 0,1 g.

3.6 Ensaios de caracterização

São apresentados a seguir os métodos utilizados para a determinação das propriedades mecânicas do concreto simples e do CRFA, como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

3.6.1 Resistência à compressão (f_c)

O ensaio de resistência à compressão será realizado conforme as recomendações da NBR 5739:2018. Os corpos de prova ensaiados são cilíndricos e possuem diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. A idade adotada para a realização dos ensaios foi de 28 dias, correspondente a idade de teste para determinação da fluência adotada nesse trabalho. Foi utilizado equipamento com capacidade de 1000 kN para a execução desses ensaios.

Conforme citado anteriormente, as superfícies de ensaio dos corpos de prova haviam sido preparadas, prosseguiu-se com a limpeza e secagem dessas faces e dos pratos da máquina de ensaio. Em seguida, os corpos de prova foram posicionados no centro do prato inferior (Figura 39) e o carregamento de ensaio ocorreu de forma contínua e sem choques a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O carregamento cessou no instante em que uma queda na força aplicada indicou a ruptura do corpo de prova (NBR 5738, 2016).

Figura 39 – Ensaio para determinação da resistência à compressão



Fonte: Autor (2019)

A resistência à compressão é calculada conforme a Equação (38).

$$f_c = \frac{4 \times F_{cr}}{\pi \times D^2} \quad (38)$$

Em que:

f_c é a resistência à compressão ou tensão de compressão, em MPa;

F_{cr} é a força máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

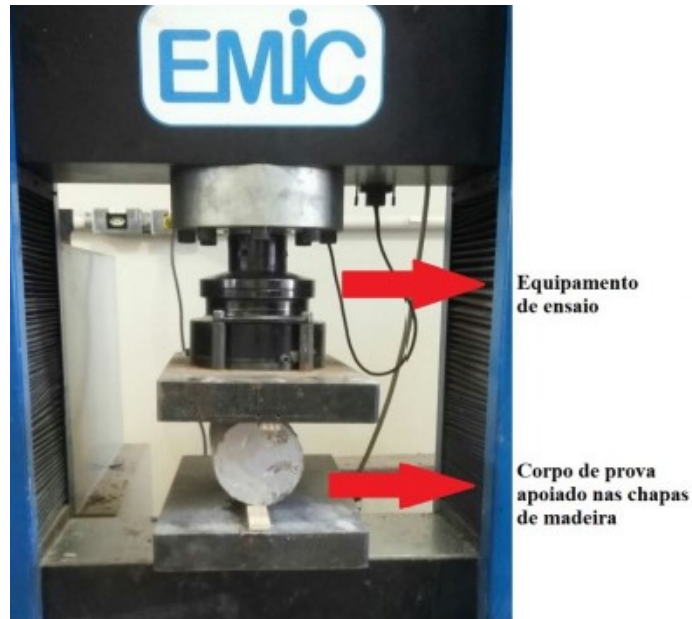
3.6.2 Resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$)

A norma brasileira NBR 7222:2011 prescreve as recomendações para execução do ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Para a realização do ensaio admite-se a utilização de corpos de prova com relação comprimento/diâmetro entre 1 e 2. Dessa forma, para realização deste ensaio foram moldados corpos de prova para cada dosagem com diâmetro de 100 mm e comprimento de 200 mm. Foi utilizado equipamento com capacidade 600 kN para a realização dos ensaios.

Conforme a NBR 7222:2011, tiras de chapa dura de fibra de madeira ou aglomerado devem ser colocadas entre os pratos da máquina e os corpos de prova (Figura 40). O procedimento de ensaio consistiu em aplicar cargas de compressão ao longo das geratrizes diametralmente opostas dos corpos de prova. A carga é aplicada continuamente e sem choques a uma velocidade constante de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A Figura 40 apresenta uma representação esquemática do ensaio de tração por compressão diametral.

Figura 40 – Ensaio para determinação da resistência à tração



Fonte: Dias (2018)

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. Dessa forma, a resistência à tração por compressão diametral é obtida pela Equação (39).

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F_{cr}}{\pi \times D \times l_{cp}} \quad (39)$$

Em que:

$f_{t,D}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F_{cr} é a carga máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

l_{cp} é o comprimento do corpo de prova, em mm.

3.6.3 Módulo de elasticidade longitudinal (E_{ci})

A realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade ocorreu de acordo com as prescrições da NBR 8522:2017. Previamente ao ensaio dos corpos de prova, as superfícies de contato foram preparadas conforme citado anteriormente.

A norma permite o uso de corpos de prova com o comprimento duas vezes maior que o diâmetro, a fim de satisfazer este requisito, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. Foi utilizado equipamento com capacidade 600 kN para a realização dos ensaios.

Para a determinação do módulo de elasticidade, faz-se necessário a prévia obtenção dos resultados de resistência à compressão de no mínimo dois corpos de prova similares aos empregados no ensaio de módulo. A norma NBR 8522:2008 especifica que no mínimo três corpos de prova devem ser ensaiados para a determinação do módulo de elasticidade, assim, devido à grande influência desta propriedade mecânica nos resultados de ensaios à fluência, foram ensaiados seis corpos de prova.

O ensaio consistiu em centralizar os corpos de prova nos pratos da máquina de ensaio, aplicar carregamentos e descarregamentos a uma velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s e realizar leituras de deformações com emprego de LVDTs, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade longitudinal



Fonte: Autor (2019)

Após a realização do ensaio, o módulo de elasticidade é obtido por meio da Equação (40).

$$E_{ci} = \left(\frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \times 10^{-3} \quad (40)$$

Em que:

$\sigma_b = 0,3 \times f_c$, em MPa;

f_c é a resistência à compressão ou tensão de compressão, em MPa;

ε_b é a deformação específica média do corpo de prova sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica médias dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

3.7 Fluência

A norma brasileira NBR 8224:2012 prescreve as recomendações experimentais do método de ensaio para determinação da fluência do concreto, com utilização de extensômetros internos ao concreto para medição das deformações ao longo do tempo.

O aparato desenvolvido nesta pesquisa foi utilizado com o objetivo de determinar a deformação por fluência de modo simplificado, por meio de leituras de carga observadas em diferentes dosagens de CRFA ao longo do tempo, descartando o uso de extensômetros e aparatos sofisticados. A análise feita dos resultados foi comparativa, portanto foi necessário que todos os aparatos e corpos de prova fossem submetidos às mesmas condições mecânicas e ambientais.

Conhecendo as limitações laboratoriais existentes e com base na literatura (RANAIVOMANANA; MULTON; TURATSINZE, 2012; ROSSI; TAILHAN; LE MAOU, 2013; SAJE *et al*, 2013; SALES, 2006), conforme a Figura 42, foi dimensionado um aparato, capaz de sustentar uma carga aplicada durante o período do ensaio.

Figura 42 – Aparatos utilizados para ensaio de fluência à compressão



(a) Ranaivomanana, Multon e Turatsinze (2012)



(b) Rossi, Tailhan, Le Maou (2013)

(c) Saje *et al.* (2013)

(d) Sales (2006)

Fonte: Autor (2019)

Inicialmente, buscando verificar a funcionalidade do aparato, foi fabricado um aparato experimental em escala reduzida, com capacidade para um único corpo de prova e uma célula de carga (Figura 43). O objetivo foi analisar se o mecanismo do aparato, composto por barras roscadas, porcas e chapas metálicas, seria capaz de manter um determinado nível de carga aplicada por um período de tempo sem que houvesse grandes deformação no aparato. O ensaio teve duração de 24 horas e apresentou redução de carga de 3,05%, comprovando a capacidade de sustentar carga do aparato.

Figura 43 – Aparato em escala reduzida



Fonte: Autor (2019)

Segundo a Rilem TC 107 (1998), a qualidade do teste, consequentemente, depende principalmente da capacidade do aparato de manter a carga aplicada, particularmente no início do teste.

O aço-carbono utilizado para fabricação das barras roscadas, porcas e chapas metálicas foi o Gerdau-1045 (equivalente ao SAE 1045), produzido e comercializado pela Gerdau®. Realizou-se o ensaio de tração do aço (Figura 44) de três corpos de prova moldados a partir de barras roscadas, conforme prescrito pela NBR ISO 6892-1:2015, para determinação das propriedades mecânicas do aço (Tabela 16). Nas extremidades das barras roscadas foram soldadas chapas metálicas para possibilitar a fixação dos corpos de prova no equipamento de ensaio.

Figura 44 – Ensaio de módulo de elasticidade da barra roscada



(a) Corpo de prova moldado a partir da barra roscada



(b) Aplicação de tensão de tração

Fonte: Autor (2019)

Tabela 16 – Propriedades mecânicas do aço-carbono SAE 1045

Propriedade	Gerdau®	FECIV/UFU	Norma brasileira
Resistência à tração (MPa)	630-780	670	NBR ISO 6892-1:2015
Limite de escoamento (MPa)	400	500	
Módulo de elasticidade (GPa)	210	200	

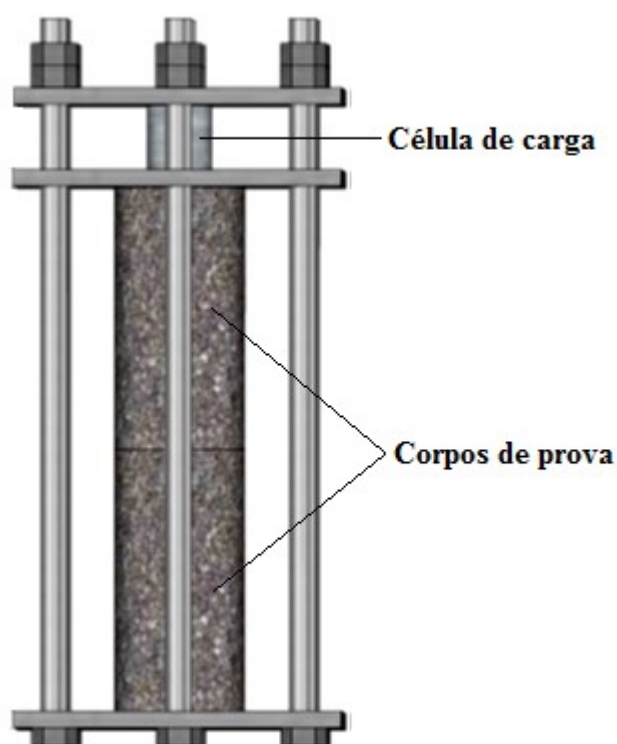
Fonte: Autor (2019)

Comparando-se o resultado médio de módulo de elasticidade do aço-carbono de aproximadamente 200 GPa com o módulo do concreto simples, de resistência característica à compressão de 50 MPa, de 40 GPa (NBR 6118, 2014), notou-se que a rigidez do aço-carbono é várias vezes superior à do concreto, portanto admitiu-se que as deformações do aparato experimental, provenientes do carregamento de ensaio, eram desprezíveis.

A fim de ampliar a amostragem e aumentar a rigidez do aparato experimental, para garantir maior confiabilidade aos resultados, a altura útil do aparato foi otimizada para ensaiar dois corpos de prova de concreto (10x20 cm), a quantidade das barras roscadas aumentou de

quatro para oito, assim como o diâmetro das mesmas, que passou de 15,9 mm para 19,1 mm. Para evitar deformações excessivas nas chapas metálicas, a espessura aumentou de 9,5 mm para 12,7 mm. A alteração na quantidade e diâmetro das barras e a espessura das chapas ocorreu com base nas deformações observadas durante o ensaio piloto do aparato experimental em escala reduzida. A Figura 45 apresenta os elementos constituintes do aparato experimental e o Apêndice B o projeto detalhado.

Figura 45 – Aparato experimental



Fonte: Autor (2019)

Para leitura das cargas aplicadas, foram fabricadas dez células de carga no Laboratório de Materiais e Estruturas da FECIV/UFU. Para confecção das células foram utilizados cilindros de aço, de mesma especificação dos componentes do aparato experimental, de dimensões 50x50 mm, e extensômetros elétricos fixados em sua superfície, sendo quatro em cada cilindro, configurando leitura em ponte completa. As células de carga foram calibradas com capacidade de 200 kN.

Com o objetivo de verificar a variação de cada célula de carga, realizou-se um teste de carga nos aparatos experimentais dotados de anéis dinamômetros (Figura 46). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17.

Figura 46 – Validação das leituras das células de carga



Fonte: Autor (2019)

Tabela 17 – Variação das leituras das células de carga de acordo com leitura do anel dinamométrico

Leitura do anel dinamométrico (kN)						
Anel din.	Inicial	Após 2 dias	Após 6 dias	Redução		Célula de carga
				(kN)	(%)	
Anel 1	84,26	83,83	83,4	0,86	1,02	CC 1, 2, 3
Anel 2	90,21	89,79	89,36	0,85	0,94	CC 4, 5, 6
Anel 3	82,98	82,55	82,12	0,86	1,04	CC 7, 8, 9, 10
Leitura da célula de carga (kN)						
Célula de carga	Inicial	Após 2 dias	Após 6 dias	Redução		Erro (%)
				(kN)	(%)	
CC 1	81,24	78,67	78,02	3,22	3,97	3,97
CC 2	75,88	75,14	74,74	1,14	1,50	1,50
CC 3	82,38	80,64	79,99	2,39	2,91	2,91
CC 4	74,14	72,22	71,82	2,32	3,14	3,14
CC 5	78,73	78,09	77,70	1,03	1,30	1,30
CC 6	84,38	83,13	82,47	1,91	2,26	2,26
CC 7	76,91	76,10	75,70	1,21	1,57	1,57
CC 8	76,25	74,30	73,63	2,63	3,44	3,44
CC 9	90,90	88,88	88,81	2,09	2,30	2,30
CC 10	75,88	75,41	74,96	0,92	1,21	1,21

Fonte: Autor (2019)

Após o período de 6 dias, os dados tenderam a convergir, portanto o ensaio foi finalizado. Notam-se dois fatores a partir dos resultados apresentados, primeiro que a redução de carga medida pelos anéis dinamométricos (maior precisão) permitem concluir que as deformações nos aparatos experimentais foram praticamente iguais. Segundo, que a maior dispersão de

resultado observada, da célula de carga CC 1 (2,95%), é um valor considerado aceitável para ensaios experimentais, além de permanecer dentro da distribuição normal (Gaussiana), para uma certeza de 95%.

Com a fundamentação do aparato, por meio da caracterização dos materiais constituintes e a validação da leitura das células de carga, foram preparadas dez unidades, sendo destinados dois aparatos para cada dosagem de concreto, contendo uma célula de carga cada. Portanto a amostragem para cada dosagem ensaiada foi de quatro corpos de prova.

Após o preparo dos corpos de prova e a montagem dos aparatos, iniciou-se os preparativos para a aplicação da carga de ensaio. Segundo a NBR 8224:2012, a carga aplicada recomendada para ensaio de fluência deve ser equivalente a 40% da tensão de resistência à compressão do concreto, na mesma idade a qual se iniciar o ensaio.

A velocidade de carregamento é um fator de grande influência no ensaio de fluência, portanto foi controlada para que fosse aplicada de forma contínua e não excedendo o intervalo de 30 segundos, conforme recomendações da NBR 8224:2012.

Para aplicação da carga de ensaio utilizou-se um cilindro hidráulico, com capacidade de carga de 500 kN e bomba hidráulica manual com capacidade de pressão de 700 bar.

O deslocamento total foi medido por meio de LVDTs acoplados na base das chapas metálicas intermediárias, conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47 – Medição dos deslocamentos por meio de LVDTs



Fonte: Autor (2019)

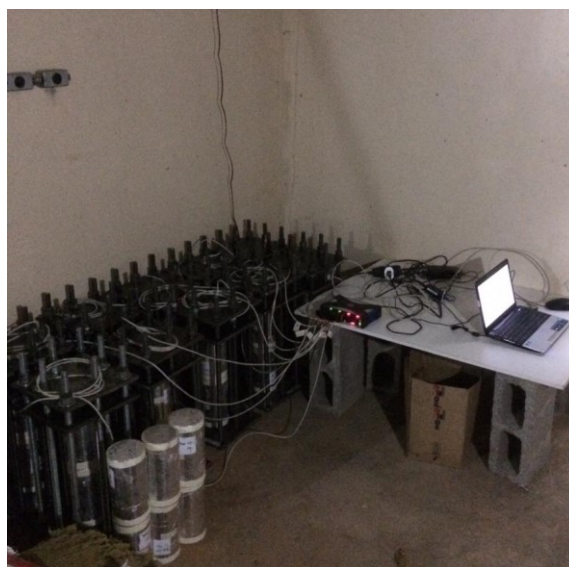
Para garantir homogeneidade nas condições, todos os aparatos experimentais foram carregados no mesmo dia (Figura 48). Logo após encerrar a etapa de carregamento, foram transportados para a sala de armazenagem, com temperatura e umidade relativa controladas, conforme Figura 49.

Figura 48 – Aparatos experimentais carregados em mesmas condições



Fonte: Autor (2019)

Figura 49 – Armazenamento dos aparatos em câmara fechada



Fonte: Autor (2019)

A coleta dos dados se iniciou a partir das leituras de deslocamento e seguiu as recomendações da NBR 8224:2012, conforme elencado a seguir:

- 30 segundos após o carregamento;

- 5, 10 e 30 minutos após o carregamento;
- 1, 2 e 5 horas após o carregamento;
- diariamente durante uma semana;
- duas vezes por semana até completar um mês;
- semanalmente até finalizar o ensaio.

Para o armazenamento dos dados de ensaio, utilizou-se o programa computacional e aparelho para aquisição de dados ligados diretamente nos aparatos experimentais.

Além das leituras das células de carga, foram monitoradas a temperatura e umidade relativa da câmara em que foram mantidos os aparatos experimentais. A medição é feita por meio de termo-hidrômetro digital, com precisão de 0,1 °C e 0,1%, para temperatura e umidade relativa, respectivamente.

Recomendações feitas por Hubler, Wendner e Bažant (2015) são adotadas neste trabalho, para padronizar os ensaios de determinação da fluência no concreto:

- a taxa ou duração de aplicação da carga no início do ensaio experimental sempre deve ser reportada;
- todas as medições de dados devem ser realizadas após o carregamento, incluindo a deformação imediata ocasionada pelo carregamento;
- se a relação tensão aplicada e resistência última forem informadas, o valor da resistência última de referência também deve ser especificado. Se as deformações são normalizados pela resistência última, a resistência no momento da aplicação da carga deve ser usada e relatada;
- as dimensões das amostras, uma descrição detalhada da configuração do teste e o procedimento de teste devem ser especificados. O tipo de sensor, a localização e o comprimento do medidor devem ser sempre informados;
- as condições ambientais durante a cura das amostras devem ser reportadas;
- para amostras ensaiadas em condições seladas, a qualidade do selo deve ser verificada. Quaisquer variações abruptas de leituras do ensaio podem ser causadas pela degradação do selo. Recomenda-se o uso de fitas metálicas devido ao melhor desempenho a longo prazo;

- a temperatura e a umidade relativa do ambiente devem ser monitoradas durante toda a duração do ensaio. Essas informações podem servir para uma caracterização estatística das condições do ensaio e podem fornecer explicações para ocorrências inesperadas. Convencionalmente, a temperatura e umidade relativa do meio são mantidos a 20 ± 1 °C e $50 \pm 5\%$ (Europa) ou 25 ± 1 °C e $65 \pm 3\%$ (América), respectivamente (RILEM TC 107, 1998).
- quanto maior a amostragem de espécies melhor, devendo ser plotadas curvas médias dos respectivos ensaios individuais. Caso algum resultado individual apresente desvio considerável, o mesmo deverá ser apresentado separadamente;
- a composição do concreto deve ser especificada com precisão, além da classe de cimento, as proporções de misturas, a dosagem de aditivos e o tipo do agregado também devem ser especificados. A curva granulométrica e a composição mineralógica são úteis. Testes complementares de resistência e do módulo de elasticidade devem ser relatados.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para caracterização do comportamento mecânico do material compósito CRFA e do concreto referência. São analisados os resultados dos testes de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, ambos aos 28 dias.

São apresentadas as deformações imediatas e redução de carga de cada célula de carga referente ao ensaio de fluência das séries de resistência de 25 e 50 MPa. As curvas que descrevem a deformação por fluência de cada aparato experimental também são apresentadas.

4.2 Resistência à compressão

Na Tabela 18 são apresentados os valores de resistência à compressão média, determinada conforme a NBR 5739:2018, desvio padrão (Sd) e coeficiente de variação (CV) para os concretos testados aos 28 dias.

Tabela 18 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias		
	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
C25 - Ref.	26,40	0,76	2,88
C25 - 0,38%	29,12	1,33	4,55
C25 - 0,50%	27,78	1,41	5,07
C25 - 0,64%	27,93	2,06	7,37
C25 - 0,77%	25,27	2,38	9,42
C50 - Ref.	49,36	3,98	8,07
C50 - 0,38%	50,43	2,31	4,58
C50 - 0,50%	54,49	3,78	6,94
C50 - 0,64%	51,63	3,08	5,96
C50 - 0,77%	51,60	3,19	6,17

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 19 apresenta o aumento ou redução da resistência à compressão média do CRFA em comparação ao concreto referência, assim como a porcentagem de variação dos valores para cada dosagem das respectivas classes de resistência.

Tabela 19 – Aumento ou redução na resistência à compressão média aos 28 dias

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias	
	Aumento/redução (MPa)	Porcentagem (%)
C25 - Ref.	-	-
C25 - 0,38%	+2,72	+10,30
C25 - 0,50%	+1,38	+5,24
C25 - 0,64%	+1,53	+5,78
C25 - 0,77%	-1,13	-4,27
C50 - Ref.	-	-
C50 - 0,38%	+1,08	+2,19
C50 - 0,50%	+5,13	+10,40
C50 - 0,64%	+2,27	+4,59
C50 - 0,77%	+2,24	+4,54

Fonte: Autor (2019)

Para a classe de resistência à compressão de 25 MPa, a dosagem C25-0,38% apresentou um maior aumento na resistência, na ordem de 10,30%. No entanto a dosagem C25-0,77% apresentou decréscimo na resistência, na ordem de 4,27%.

Quanto a classe de resistência de 50 MPa, notou-se que a dosagem C50-0,50% apresentou um acréscimo superior ao dos demais teores de fibras, na ordem de 10,40%. Já a dosagem C40-0,38% apresentou um menor aumento na resistência à compressão, na ordem de 2,19%.

A adição das fibras resulta no incremento de ar incorporado no concreto, desta forma a redução de resistência causada pela porosidade da matriz se torna superior ao ganho de resistência obtido pela adição da fibra.

A média dos resultados aos 28 dias atende à média desejada para cada dosagem e o desvio padrão dos resultados estão dentro do limite de controle da norma NBR ABNT 12655:2006 de 4 MPa, adotado de acordo com o modo de preparo utilizado.

No Apêndice C são apresentados os valores individuais dos corpos de prova do ensaio de determinação da resistência à compressão.

4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 20 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral média, determinada conforme a NBR 7222:2010, desvio padrão (Sd) e coeficiente de variação (CV) para os concretos testados aos 28 dias.

Tabela 20 – Valores de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Série	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias		
	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
C25 - Ref. (sem fibra)	3,05	0,03	1,00
C25 - 0,38 % fibra	3,77	0,27	7,14
C25 - 0,50 % fibra	4,18	0,37	8,82
C25 - 0,64 % fibra	3,75	0,33	8,74
C25 - 0,77 % fibra	4,39	0,42	9,63
C50 - Ref. (sem fibra)	3,51	0,33	9,36
C50 - 0,38 % fibra	4,77	0,27	5,61
C50 - 0,50 % fibra	6,07	0,59	9,75
C50 - 0,64 % fibra	7,38	0,44	5,97
C50 - 0,77 % fibra	8,20	0,14	1,72

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 21 apresenta o aumento da resistência à tração por compressão diametral média do CRFA em comparação ao concreto referência, assim como a porcentagem de variação dos valores para cada dosagem das respectivas classes de resistência.

Tabela 21 – Aumento na resistência à tração por compressão diametral média

Série	Resistência à compressão aos 28 dias	
	Aumento ou redução (MPa)	Porcentagem (%)
C25 - Ref. (sem fibra)	-	-
C25 - 0,38 % fibra	+0,72	+23,61
C25 - 0,50 % fibra	+1,13	+37,05
C25 - 0,64 % fibra	+0,70	+22,95
C25 - 0,77 % fibra	+1,34	+43,93
C40 - Ref. (sem fibra)	-	-
C50 - 0,38 % fibra	+1,26	+35,90
C50 - 0,50 % fibra	+2,56	+72,93
C50 - 0,64 % fibra	+3,87	+110,26
C50 - 0,77 % fibra	+4,69	+133,62

Fonte: Autor (2019)

De maneira geral observou-se um aumento na resistência à tração por compressão diametral, conforme aumentou-se os teores de fibras nos concretos.

Para a classe de resistência à compressão de 25 MPa a dosagem com maior volume de fibras (C25-0,77%) apresentou um maior aumento na resistência à tração, na ordem de 43,93 %, já a dosagem com menor volume (C25-0,38%) apresentou o menor crescimento, na ordem de 23,61%.

Já para os concretos da classe de resistência à compressão de 50 MPa houve um crescimento proporcionalmente maior da resistência à tração, devido ao proporcionamento dos componentes resultar em um material compósito com menor porosidade, aumentando assim a eficiência da ligação fibra-matriz. A maior resistência à compressão da matriz do concreto confere maior aderência entre matriz e as fibras de aço. Portanto, as solicitações impostas ao compósito são transferidas às fibras de maneira mais eficaz.

A dosagem que apresentou maior crescimento na resistência à tração foi a C40-0,77%, na ordem de 133,62%, e a dosagem que apresentou menor crescimento foi a C40-0,38%, na ordem de 35,90%.

No Apêndice D são apresentados os valores individuais dos corpos de prova do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral.

4.4 Módulo de elasticidade

Na Tabela 22 são apresentados os valores de módulo de elasticidade médio, determinado conforme a NBR 8522:2017, desvio padrão (Sd) e coeficiente de variação (CV) para os concretos ensaiados aos 28 dias.

Tabela 22 – Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias		
	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
C25 - Ref.	27,91	0,98	3,53
C25 - 0,38%	29,52	1,27	4,31
C25 - 0,50%	29,32	1,35	4,60
C25 - 0,64%	27,55	1,65	5,99
C25 - 0,77%	26,63	1,19	4,48

C50 - Ref.	39,90	2,03	5,08
C50 - 0,38%	40,98	1,12	2,74
C50 - 0,50%	48,38	0,69	1,43
C50 - 0,64%	41,40	0,75	1,82
C50 - 0,77%	43,36	2,06	4,75

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 23 apresenta o aumento e redução do módulo de elasticidade médio do CRFA em comparação ao concreto referência, assim como a porcentagem de variação dos valores para cada dosagem das respectivas classes de resistência.

Tabela 23 – Aumento ou redução do módulo de elasticidade médio

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias	
	Aumento ou redução (GPa)	Porcentagem (%)
C25 - Ref.	-	-
C25 - 0,38%	+1,61	+5,77
C25 - 0,50%	+1,41	+5,06
C25 - 0,64%	-0,36	-1,30
C25 - 0,77%	-1,28	-4,59
C50 - Ref.	-	-
C50 - 0,38%	+1,08	+2,72
C50 - 0,50%	+8,48	+21,25
C50 - 0,64%	+1,50	+3,77
C50 - 0,77%	+3,47	+8,68

Fonte: Autor (2019)

Para a classe de resistência de 25 MPa, observou-se um aumento no módulo de elasticidade para as dosagens C25-0,38% e C25-0,50%, de respectivamente 5,77% e 5,06%. No entanto, para as dosagens C25-0,64% e C25-0,77% houve um decréscimo de 1,30% e 4,59%, respectivamente.

Já para a classe de resistência de 50 MPa, houve acréscimo do módulo de elasticidade em todos os teores de fibras adicionados, em que o melhor desempenho foi observado na dosagem C50-0,50%, com aumento de 21,25% do módulo de elasticidade comparado ao concreto referência.

No Apêndice E são apresentados os valores individuais dos corpos de prova do ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

4.5 Fluência

A temperatura média e umidade relativa média do ambiente em que foram realizados os ensaios foram registrados durante a série C25 e C50, referente as classes de resistência de 25 e 50 MPa, respectivamente. Durante o ensaio de fluência da série C25, a temperatura média registrada foi de $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa média de $40\pm 5\%$, durante 90 dias. Foram registradas temperatura média de $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa média de $55\pm 5\%$, durante 90 dias, para a série C50.

4.5.1 Qualidade do selo

A qualidade do selo dos corpos de prova foi verificada com o objetivo de evitar a perda de água do concreto para o meio ao qual estava exposto, tendo em vista que um dos principais mecanismos da fluência é a movimentação de água adsorvida nos poros capilares no interior do concreto.

A verificação foi realizada comparando-se a massa medida antes e após o ensaio para cada corpo de prova. A massa de água total considerada (corpo de prova saturado) foi obtida no ensaio de dessorção de água realizado em etapa preliminar de ensaios. A massa total de água média da série C25 foi de 329 gramas e da série C50 de 205 gramas. A Tabela 24 apresenta a diferença entre as massas dos corpos de prova.

Tabela 24 – Quantidade de água perdida para o ambiente

C25-Ref.	1	3.519,8	3.514,8	5,0	1,5%	1,1%
	2	3.567,2	3.565,3	1,9	0,6%	
	3	3.541,9	3.540,1	1,8	0,5%	
	4	3.585,1	3.578,8	6,3	1,9%	
C25-0,38%	1	3.597,5	3.595,6	1,9	0,6%	0,8%
	2	3.612,3	3.606,5	5,8	1,8%	
	3	3.584,9	3.582,4	2,5	0,8%	
	4	3.620,9	3.620,1	0,8	0,2%	
C25-0,50%	1	3.570,9	3.569,4	1,5	0,5%	0,5%
	2	3.608,2	3.606,1	2,1	0,6%	
	3	3.658,8	3.657,6	1,2	0,4%	
	4	3.620,8	3.618,8	2,0	0,6%	
C25-0,64%	1	3.584,0	3.581,2	2,8	0,9%	1,3%
	2	3.625,8	3.623,5	2,3	0,7%	
	3	3.580,2	3.574,1	6,1	1,9%	
	4	3.605,6	3.600,1	5,5	1,7%	

C25-0,77%	1	3.648,6	3.645,1	3,5	1,1%	0,6%
	2	3.648,9	3.647,4	1,5	0,5%	
	3	3.560,5	3.558,7	1,8	0,5%	
	4	3.636,4	3.634,8	1,6	0,5%	
C50-Ref.	1	3.754,1	3.752,9	1,2	0,4%	0,3%
	2	3.799,4	3.798,6	0,8	0,2%	
	3	3.750,3	3.749,0	1,3	0,4%	
	4	3.794,4	3.793,9	0,5	0,2%	
C50-0,38%	1	3.829,1	3.828,1	1,0	0,3%	0,3%
	2	3.848,7	3.847,7	1,0	0,3%	
	3	3.837,5	3.836,5	1,0	0,3%	
	4	3.799,5	3.798,8	0,7	0,2%	
C50-0,50%	1	3.961,8	3.961,3	0,5	0,2%	0,1%
	2	3.948,2	3.948,1	0,1	0,0%	
	3	3.987,2	3.986,9	0,3	0,1%	
	4	3.923,5	3.923,2	0,3	0,1%	
C50-0,64%	1	3.803,4	3.802,9	0,5	0,2%	0,2%
	2	3.862,7	3.861,8	0,9	0,3%	
	3	3.904,6	3.903,9	0,7	0,2%	
	4	3.900,4	3.899,9	0,5	0,2%	
C50-0,77%	1	3.856,3	3.855,6	0,7	0,2%	0,2%
	2	3.902,2	3.901,7	0,5	0,2%	
	3	3.807,0	3.806,7	0,3	0,1%	
	4	3.885,2	3.884,7	0,5	0,2%	

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que houve perda de água adsorvida para o meio ao qual estavam expostos os corpos de prova, portanto a fita de alumínio e o filme plástico não foram perfeitamente eficazes. No entanto, a quantidade de água adsorvida perdida para o meio foi ínfima, minimizando interferências nos resultados do ensaio de fluência.

O selo aplicado não foi o único fator interveniente responsável por evitar a perda de água para o meio, a redução da umidade relativa interna do concreto para aproximadamente 50% antes do ensaio teve influência decisiva.

4.5.2 Níveis de tensão

A carga aplicada em cada aparato experimental foi diferente para cada unidade, dosagem e classe de resistência, devido a alguns fatores, como o erro de leitura das células de carga, a precisão do próprio aparato, o método de aplicação da carga (bomba hidráulica manual) e a respectiva resistência à compressão aos 28 dias de cada dosagem. Segundo a NBR 8224:2012, a carga recomendada a ser aplicada em ensaios de fluência deve ser equivalente a 40 % da resistência à compressão aos 28 dias. A Tabela 25 apresenta a porcentagem aproximada da carga aplicada nos aparatos experimentais durante o ensaio.

Tabela 25 – Carga aplicada no ensaio de fluência

Dosagem	Resist. média comp. aos 28 dias (MPa)	Carga de ruptura (kN)	Célula de carga (CC)	Carga aplicada no ensaio (kN)	Média da carga aplicada (kN)	Porcentual
C25-Ref.	26,40	211,20	2	78,14	76,16	36%
			4	74,17		
C25-0,38%	29,12	232,96	6	79,43	80,57	35%
			8	81,70		
C25-0,50%	27,78	222,24	5	83,73	81,32	37%
			7	78,91		
C25-0,64%	27,93	223,44	3	80,02	81,40	36%
			9	82,78		
C25-0,77%	25,27	202,16	1	77,97	79,02	39%
			10	80,07		
C50-Ref.	49,36	394,88	2	136,85	132,17	33%
			4	127,49		
C50-0,38%	50,43	403,44	6	129,91	124,47	31%
			8	119,02		
C50-0,50%	54,49	435,92	5	138,09	132,22	30%
			7	126,35		
C50-0,64%	51,63	413,04	3	132,49	132,43	32%
			9	132,37		
C50-0,77%	51,60	412,80	1	135,48	139,72	34%
			10	143,96		

Fonte: Autor (2019)

Foi possível atingir um percentual médio de carga aplicada de aproximadamente 37% na série C25, devido aos menores níveis de tensão a serem aplicados. Já para a série C50, o percentual médio de carga aplicada foi de apenas 32%, pois os níveis de tensão eram superiores ao da classe de resistência inferior.

4.5.3 Deformação imediata

Durante o carregamento dos aparatos experimentais foram medidas as deformações imediatas de cada elemento, utilizando dois LVDTs acoplados a chapa intermediária do aparato, próximos aos corpos de prova de concreto. O carregamento de cada aparato não excedeu a duração de 30 segundos.

A Tabela 26 apresenta os deslocamentos individuais e médios medidos pelos LVDTs e a deformação imediata de cada dosagem das séries C25 e C50, assim como a deformação imediata calculada pela Equação (2).

Tabela 26 – Valores de deformação imediata referente ao início do carregamento

Série	Carga (kN)	Deslocamento (mm)			Média final (mm)	Deformação imediata	$\epsilon_{\text{calculado}}$
		LVDT 1	LVDT 2	Média			
C25-Ref.	78,14	0,656	0,678	0,667	0,695	$1,74 \times 10^{-3}$	$3,47 \times 10^{-4}$
	74,17	0,660	0,785	0,722			
C25-0,38%	79,43	0,881	0,463	0,672	0,772	$1,93 \times 10^{-3}$	$3,47 \times 10^{-4}$
	81,70	0,829	0,916	0,872			
C25-0,50%	78,91	0,298	1,041	0,670	0,774	$1,93 \times 10^{-3}$	$3,53 \times 10^{-4}$
	83,73	0,868	0,888	0,878			
C25-0,64%	80,02	0,919	0,840	0,880	0,836	$2,09 \times 10^{-3}$	$3,76 \times 10^{-4}$
	82,78	0,688	0,897	0,793			
C25-0,77%	77,97	1,005	0,681	0,843	0,869	$2,17 \times 10^{-3}$	$3,78 \times 10^{-4}$
	80,07	0,458	1,332	0,895			
C50-Ref.	144,25	-	-	-	1,1762	$2,94 \times 10^{-3}$	$4,82 \times 10^{-4}$
	157,90	0,6803	1,6720	1,1762			
C50-0,38%	157,78	0,993	1,1249	1,0590	1,0159	$2,54 \times 10^{-3}$	$4,83 \times 10^{-4}$
	153,13	0,6347	1,3109	0,9728			

C50-0,50%	170,91	0,0607	2,5643	1,3125	1,0481	$2,62 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-4}$
	176,80	0,8869	0,6804	0,7837			
C50-0,64%	164,98	2,5059	0,3526	1,4293	1,4495	$3,62 \times 10^{-3}$	$5,06 \times 10^{-4}$
	164,38	2,6863	0,2530	1,4697			
C50-0,77%	156,41	1,1567	0,4237	0,7902	0,8825	$2,21 \times 10^{-3}$	$4,67 \times 10^{-4}$
	161,40	1,0732	0,8764	0,9748			

Fonte: Autor (2019)

A deformação imediata experimental foi calculada por meio da relação entre o deslocamento médio para cada dosagem e o comprimento total dos corpos de prova (400 mm).

Para determinação da deformação imediata calculada, utilizou-se o valor experimental do módulo de elasticidade e a tensão aplicada nos corpos de prova no início do ensaio.

Observou-se que o deslocamento medido pelo LVDT 1 divergiu consideravelmente do medido pelo LVDT 2, nos aparatos experimentais referentes a algumas dosagens da série C25 e em todos da série C50. Isto ocorreu devido a dois fatores principalmente:

- a rigidez do aparato experimental, pois o mesmo é concebido pela fixação de componentes por meio de barras roscadas e roscas nas extremidades. No entanto a chapa intermediária fica livre para se movimentar de acordo as deformações dos corpos de prova.
- a planicidade e o paralelismo entre as superfícies de ensaio dos corpos de prova. Embora a regularização tenha sido realizado por meio de retífica com disco circular diamantado, o mínimo de desvio no ângulo de regularização pode resultar em deformações não simétricas.

Devido a variação das leituras de deslocamentos observadas durante o ensaio experimental para determinação da deformação imediata, optou-se por considerar a deformação imediata calculada, para comparação dos resultados desta pesquisa com os resultados presentes na literatura.

Durante o carregamento de um dos aparatos experimentais referentes a dosagem C50-Ref., os dados coletados pelo programa computacional relativos ao deslocamento foram corrompidos, impossibilitando a plotagem dos resultados para análise. Desta forma, para a dosagem C50-Ref. foi apresentado apenas um resultado de deslocamento.

Na série C50 as variações entre as leituras do LVDT 1 e 2 foram superiores as da série C25. Além dos fatores apresentados anteriormente, nesta ocasião soma-se o fato dos níveis de tensão serem consideravelmente superiores.

4.5.4 Deformação por fluência

Após a leitura dos deslocamentos devido ao carregamento de cada aparato experimental, iniciou-se a leitura dos dados referentes a carga aplicada mantida ao longo do tempo nos corpos de prova de concreto. As leituras foram corrigidas de acordo com o erro individual de cada célula de carga, determinados anteriormente em ensaio preliminar.

As leituras de carga dos aparatos experimentais para as classes de resistência C25 e C50 são apresentados no Apêndice F.

Para cálculo da deformação por fluência do CRFA considerou-se a relação entre a redução de carga na célula de carga e a deformação dos corpos de prova, em que a variação medida na célula de carga é equivalente a relaxação do concreto devido ao carregamento.

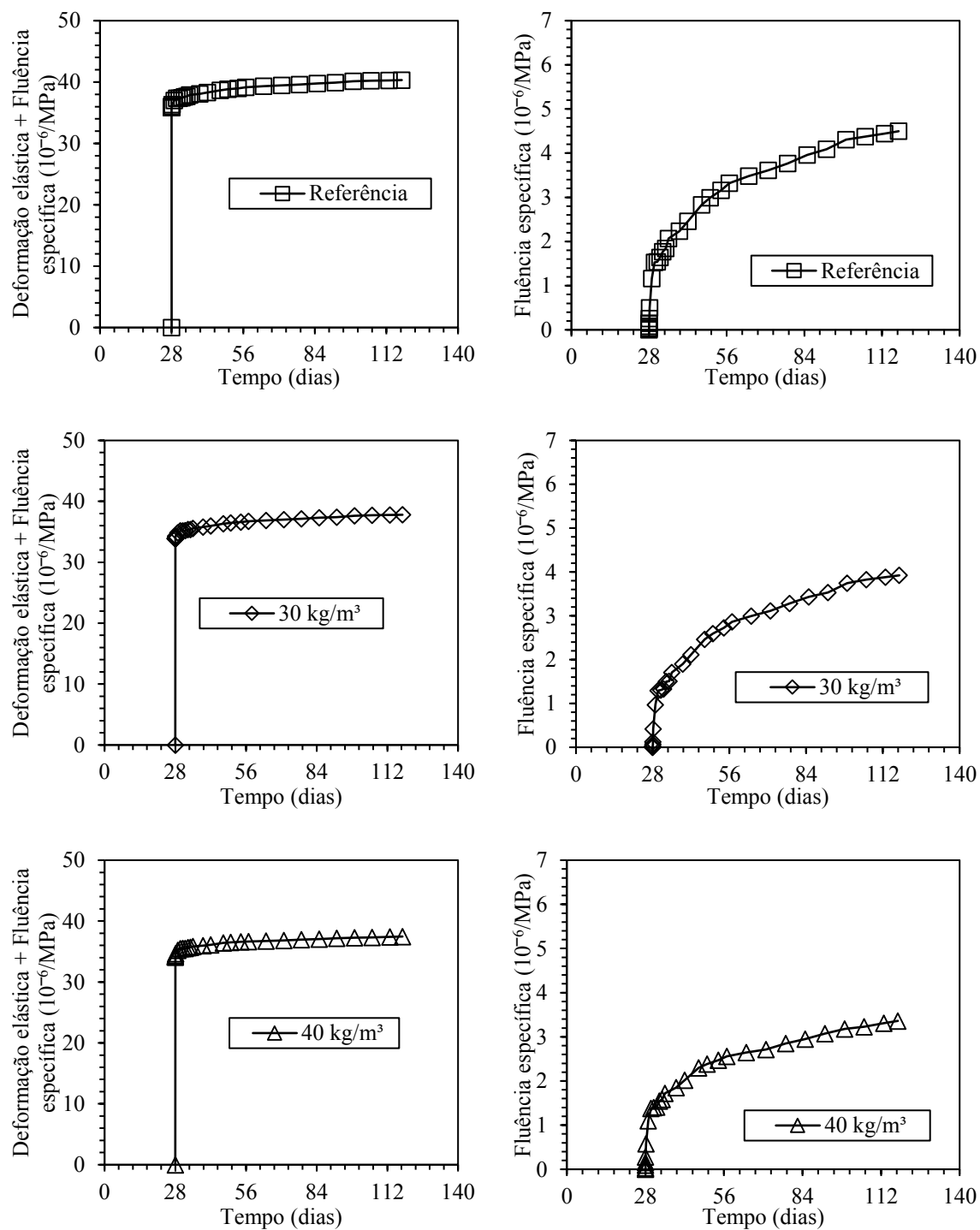
Assim calculou-se a tensão de compressão aplicada ao concreto durante o ensaio, adotando a leitura da carga obtida pela célula de carga e dividindo a mesma pela área da superfície de ensaio do corpo de prova.

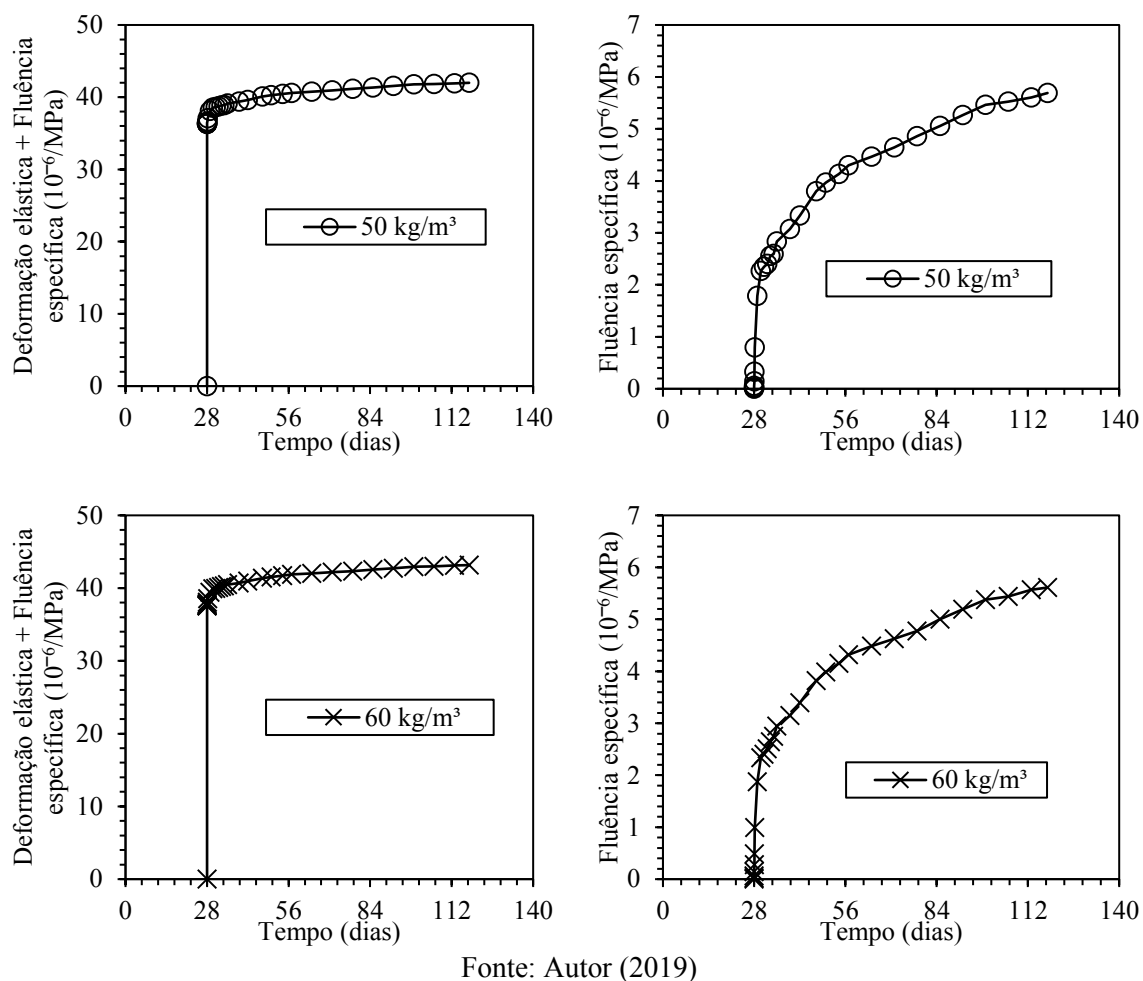
Por meio da Lei de Hooke determinou-se a deformação do concreto por fluência durante o ensaio.

Devido a baixa dispersão de dados entre os pares de aparatos para cada dosagem, os resultados foram plotados utilizando os valores experimentais médios. A deformação por fluência foi expressa em fluência específica para facilitar a comparação de resultados com outras pesquisas presentes na literatura.

São apresentados na Figura 50, a curva média referente a soma da deformação imediata e a fluência específica, assim como a fluência específica isolada para cada dosagem da série C25.

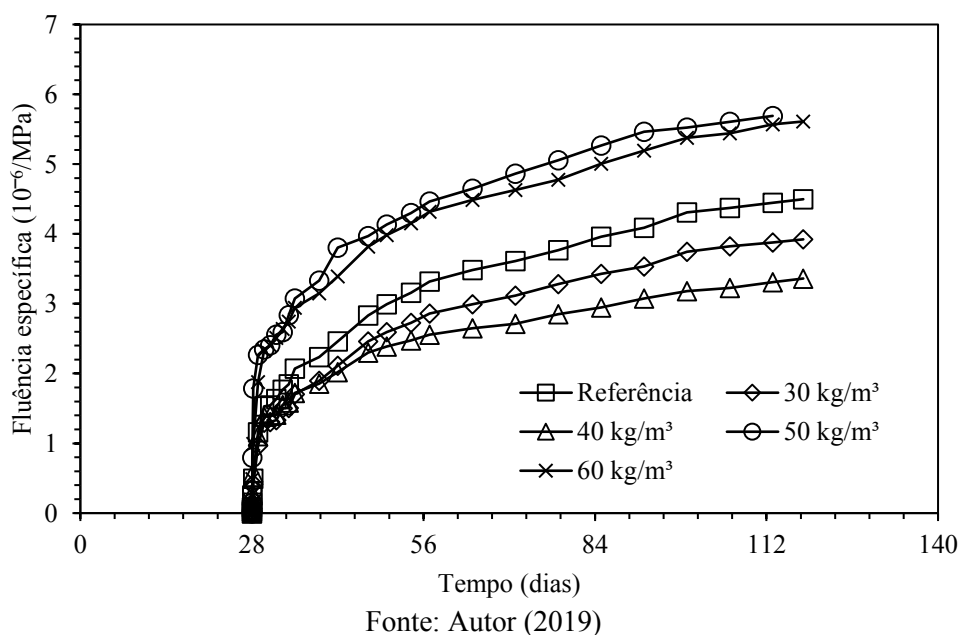
Figura 50 – Deformação imediata e fluência específica referente a série C25





A Figura 51 apresenta a comparação da fluência específica das dosagens da série C25.

Figura 51 – Fluência específica das dosagens da série C25

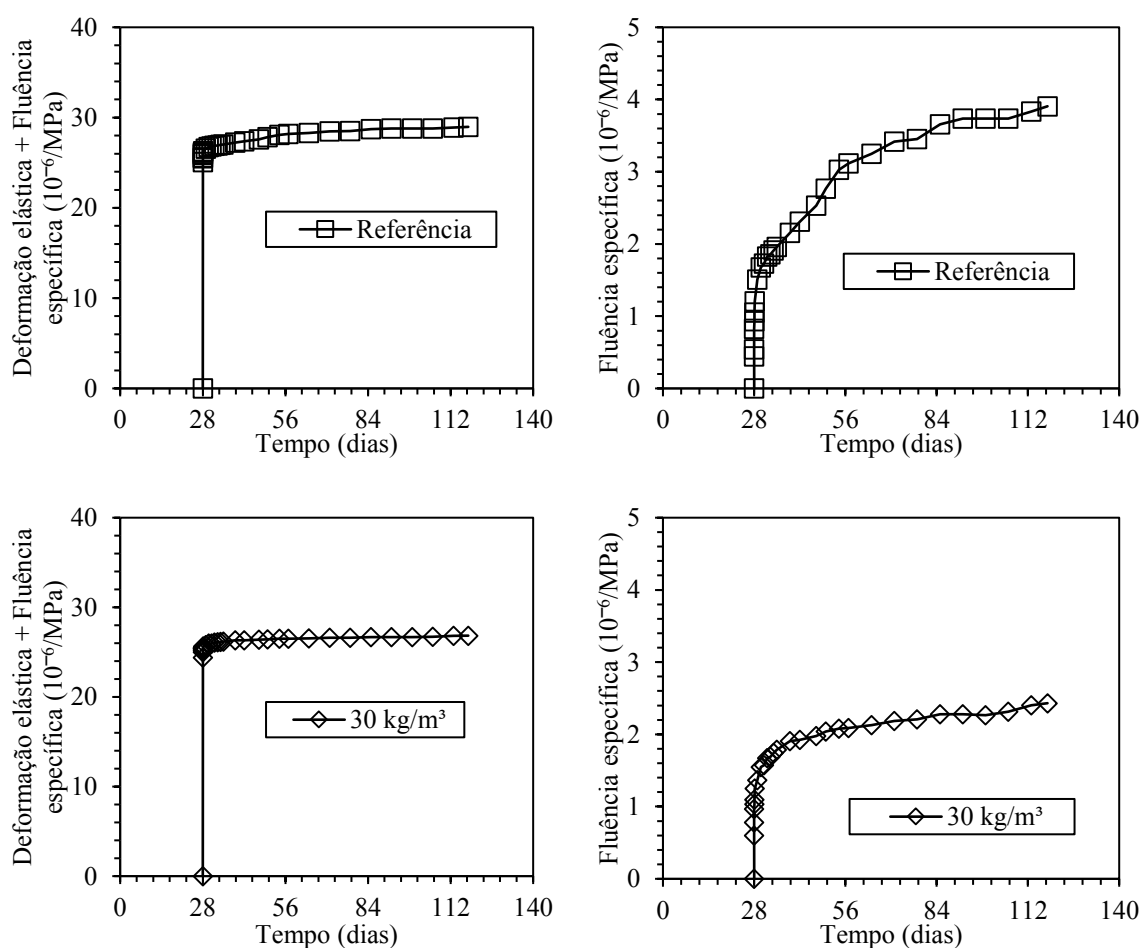


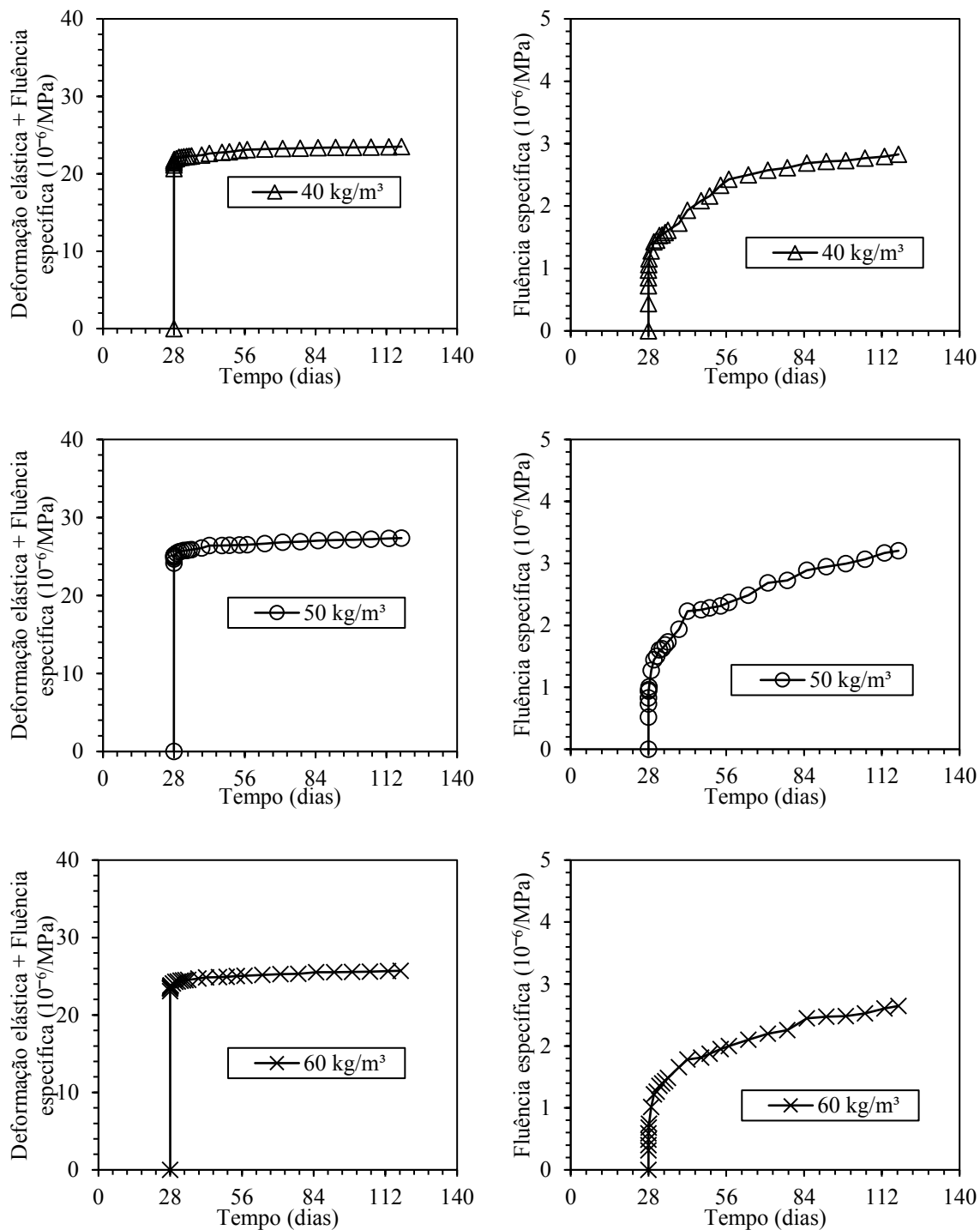
A fluência específica das dosagens foi semelhante nas primeiras horas de ensaio. A partir dos primeiros dias, as dosagens C25-0,64% e C25-0,77% já apresentaram maiores deformações comparadas ao concreto referência. O acréscimo final na deformação foi de 26,7% e 24,4%, respectivamente.

As dosagens C25-0,38% e C25-0,50% apresentaram menores deformações por fluência quando comparadas ao concreto referência, com redução de 13,3% e 24,4%, respectivamente.

São apresentados na Figura 52, a curva média referente a soma da deformação imediata e a fluência específica, assim como a fluência específica isolada para cada dosagem da série C25.

Figura 52 – Deformação imediata e fluência específica referente a série C05

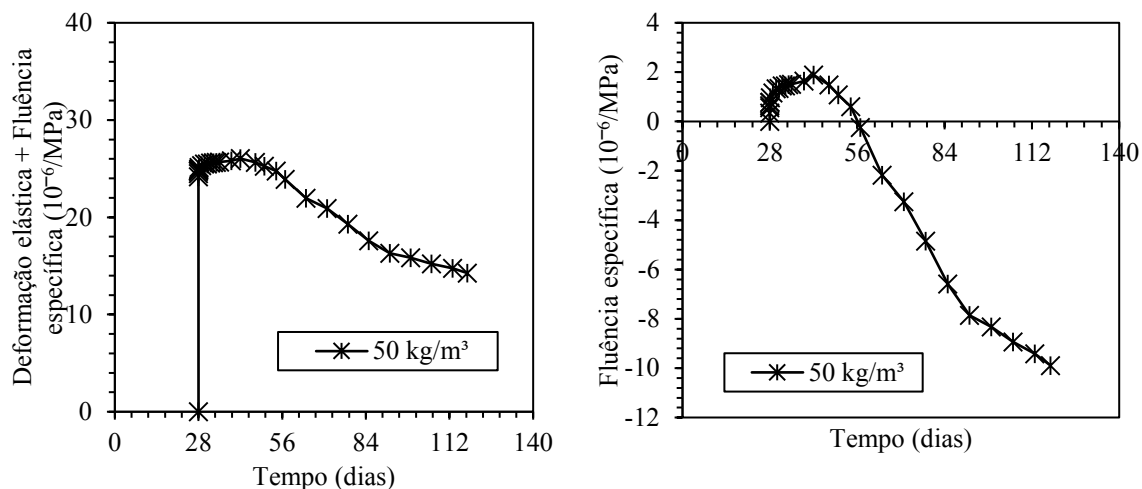




Fonte: Autor (2019)

A célula de carga de um dos aparatos experimentais referentes a dosagem C50-0,64% apresentou resultados divergentes dos demais a partir do 14º dia de ensaio se estendendo até o final do ensaio. A Figura 54 apresenta a evolução das curvas de deformação do concreto para esta dosagem.

Figura 53 – Evolução da deformação divergente da dosagem C50-0,64%

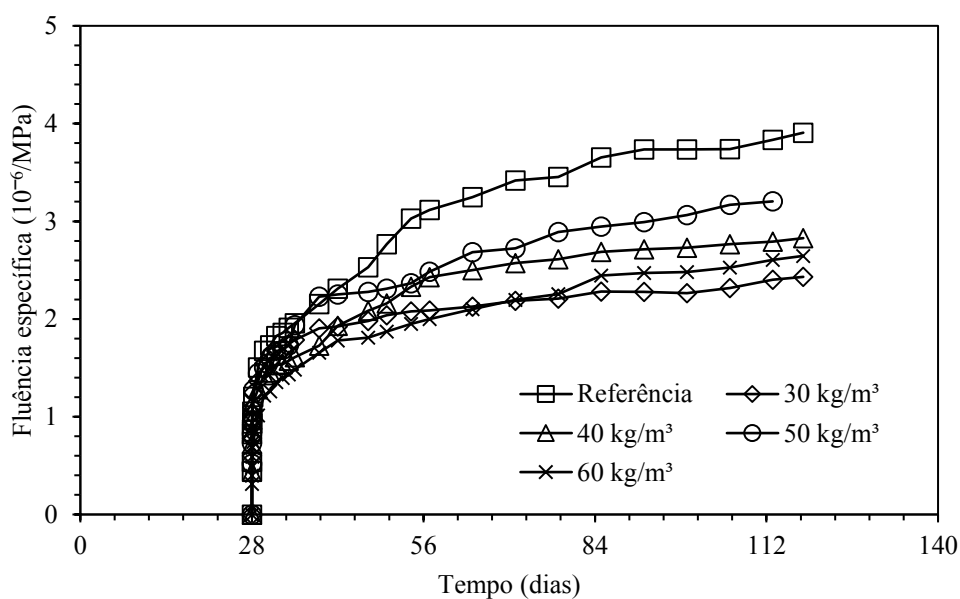


Fonte: Autor (2019)

Devido aos resultados representarem esforços de tração nos corpos de prova, pois a deformação nos mesmos reduziu consideravelmente ao longo do tempo, estes dados foram descartados para a análise média entre as dosagens. A hipótese do surgimento de microfissuras nos corpos de prova foi descartada pois tal fenômeno aumentaria a deformação por fluência em grande escala.

A Figura 54 apresenta a comparação da fluência específica das dosagens da série C50.

Figura 54 – Fluência específica das dosagens da série C50



Fonte: Autor (2019)

A fluência específica das dosagens apresentou valores semelhantes nas primeiras horas de ensaio. A partir dos primeiros dias o concreto referência apresentou maiores deformações por fluência.

Todas as dosagens com fibras de aço apresentaram redução na deformação por fluência quando comparadas ao concreto referência. A dosagem C50-0,38% apresentou a maior redução de deformação por fluência, de 41,7%.

As dosagens C50-0,50% e C50-0,77% apresentaram resultados finais próximos, de 28,2% e 33,3%, respectivamente. Já a dosagem C50-0,64% foi a que apresentou menor redução, de 17,9%.

Nesta pesquisa foram atingidos níveis de fluência específica de até 5×10^{-6} /MPa, para as duas classes de resistência, pois não houve acréscimo de carga nos aparatos experimentais durante a execução do ensaio.

Ao comparar os resultados desta pesquisa com os de Velasco (2008) observa-se um comportamento contrário quanto a influência da adição das fibras de aço. Velasco (2008) concluiu em sua pesquisa que a adição de fibras de aço nos teores volumétricos de 1,0%, 1,5% e 2,0% aumentou a fluência do concreto de classe de resistência de 40 MPa carregado aos 28 dias. O concreto sem fibras apresentou fluência específica de 12×10^{-6} /MPa, por outro lado os concretos fibrosos apresentaram fluência específica de até 16×10^{-6} /MPa, aproximadamente 33% maior. Nesta pesquisa, apesar dos teores de fibras de aço serem inferiores, notou-se uma redução na deformação, em que os concretos fibrosos apresentaram fluência específica de 2 a 3×10^{-6} /MPa e o concreto sem fibras fluência específica de 4×10^{-6} /MPa, redução de até 37% na fluência à compressão. Apenas a série C25 apresentou acréscimo na fluência, para os teores de 0,64% e 0,77%, de aproximadamente 24% para ambos os teores.

Os resultados de Saje *et al.* (2013) apresentaram níveis de fluência específica de 30 a 40×10^{-6} /MPa, no entanto a idade de carregamento foi de 7 dias, aumentando a susceptibilidade do concreto a deformação. Foram adicionados teores de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2% de fibras de aço ao concreto, sendo que apenas o teor volumétrico de 0,5% apresentou redução de 15% da fluência quando comparado ao concreto sem fibras. A dosagem C50-0,50% desta pesquisa, apresentou redução de 28% de fluência comparada ao concreto sem fibras.

Zhao *et al.* (2016) analisaram a influência da adição de fibras de aço no concreto nos teores de 1%, 2% e 3%, obtendo reduções de fluência de 10%, 23% e 17%, respectivamente, quando comparados ao concreto sem fibras. A classe de resistência C50 também apresentou redução na fluência para todos os teores de fibras de aço adicionados ao concreto, na ordem de 38%, 28%, 18% e 33% para os teores volumétricos de 0,38%, 0,50%, 0,64% e 0,77%, respectivamente.

obtiveram reduções na deformação por fluência devido à adição de fibras de aço nos teores de 1%, 2% e 3% quando comparadas ao concreto sem fibras.

A ABNT NBR 6118:2014 apresenta o cálculo teórico do coeficiente de fluência do concreto simples, por meio das equações apresentadas no item 2.8.1. A Tabela 27 apresenta os valores teóricos estimados pela norma e os valores experimentais obtidos nesta pesquisa.

Tabela 27 – Valores teóricos e experimentais de coeficiente de fluência do concreto

Dosagem	Coeficiente de fluência	
	ABNT NBR 6118	Aparato experimental
C25-Ref.	2,60	1,27
C25-0,38%	2,60	1,18
C25-0,50%	2,60	0,99
C25-0,64%	2,60	1,57
C25-0,77%	2,60	1,48
C50-Ref.	1,48	1,16
C50-0,38%	1,48	1,10
C50-0,50%	1,48	1,14
C50-0,64%	1,48	1,13
C50-0,77%	1,48	1,11

Fonte: Autor (2019)

O coeficiente de fluência previsto pela norma é superior ao coeficiente determinado durante o ensaio de fluência desta pesquisa, pois a carga aplicada de ensaio não foi constante conforme recomendado por norma.

As equações propostas pela norma se adequaram mais a concreto de classe de resistência de 50 MPa, devido a maior proximidade entre os coeficientes.

A Tabela 28 apresenta os valores teóricos estimados pela norma e os valores experimentais obtidos nesta pesquisa da deformação imediata somada à fluência.

Tabela 28 – Valores teóricos e experimentais de deformação imediata e fluência

Dosagem	Deformação imediata e fluência	
	ABNT NBR 6118	Aparato experimental
C25-Ref.	$9,02 \times 10^{-4}$	$3,91 \times 10^{-4}$
C25-0,38%	$9,02 \times 10^{-4}$	$3,88 \times 10^{-4}$
C25-0,50%	$9,18 \times 10^{-4}$	$3,88 \times 10^{-4}$
C25-0,64%	$9,78 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-4}$
C25-0,77%	$9,83 \times 10^{-4}$	$4,34 \times 10^{-4}$
C50-Ref.	$6,25 \times 10^{-4}$	$4,88 \times 10^{-4}$
C50-0,38%	$5,73 \times 10^{-4}$	$4,25 \times 10^{-4}$
C50-0,50%	$5,15 \times 10^{-4}$	$3,96 \times 10^{-4}$
C50-0,64%	$6,02 \times 10^{-4}$	$4,61 \times 10^{-4}$
C50-0,77%	$6,07 \times 10^{-4}$	$4,57 \times 10^{-4}$

Fonte: Autor (2019)

A deformação imediata somada a fluência estimada pela norma e a determinada nesta pesquisa variam na mesma proporção do coeficiente de fluência.

Após a apresentação e análise de todos os resultados, foi elaborada uma tabela contendo o resultado de ensaios de caracterização, deformação imediata e fluência para cada dosagem e classe de resistência. A Tabela 29 correlaciona as propriedades do material possibilitando assim uma análise mais aprofundada.

Tabela 29 – Correlação das propriedades do concreto

Série	Resist. à tração p/comp. diametral (MPa)	Resist. à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação imediate calculada	Fluência específica (10^{-6} /MPa)
C20-Ref.	3,0	26,4	27,9	$3,47 \times 10^{-4}$	4,5
C20-0,38%	3,8	29,1	29,5	$3,47 \times 10^{-4}$	3,9
C20-0,50%	4,2	27,8	29,3	$3,53 \times 10^{-4}$	3,4
C20-0,64%	3,7	27,9	27,5	$3,76 \times 10^{-4}$	5,7
C20-0,77%	4,4	25,3	26,6	$3,78 \times 10^{-4}$	5,6
C40-Ref.	3,5	49,4	39,9	$4,22 \times 10^{-4}$	3,9
C40-0,38%	4,8	50,4	41,0	$3,87 \times 10^{-4}$	2,4
C40-0,50%	6,1	54,5	48,4	$3,48 \times 10^{-4}$	2,8
C40-0,64%	7,4	51,6	41,4	$4,07 \times 10^{-4}$	3,2
C40-0,77%	8,2	51,6	43,4	$4,10 \times 10^{-4}$	2,6

Fonte: Autor (2019)

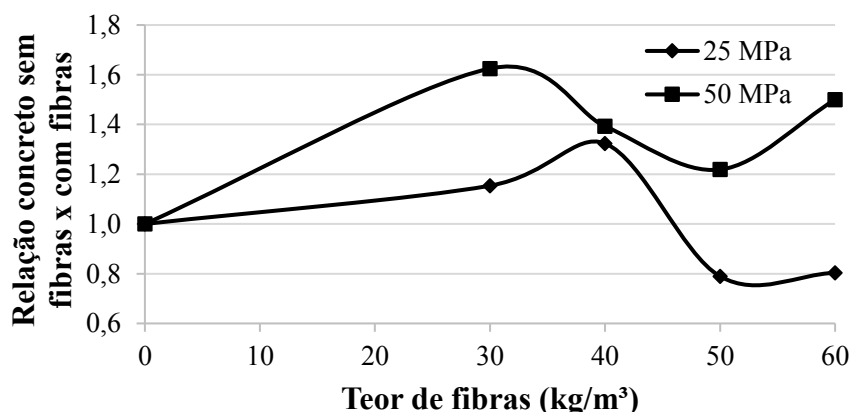
Nota-se que a resistência à tração do concreto não influenciou no desempenho quanto a deformação imediata e a deformação por fluência, as dosagens de concreto que apresentaram maiores resistência à tração não foram as mesmas que apresentaram menores deformações imediatas e reduções de carga, para ambas as classes de resistência.

A resistência à compressão e módulo de elasticidade se mostraram diretamente interligadas, pois as dosagens com melhores desempenhos foram as mesmas para as duas propriedades. Segundo a literatura (CALLISTER, 2008, MEHTA; MONTEIRO, 2014), teoricamente quanto maior o módulo de elasticidade menores serão as deformações, no entanto os resultados obtidos não confirmaram esta hipótese. Uma justificativa para tal comportamento é a adição de fibras no concreto, tornando o material mais heterogêneo, ou seja, com mais zonas de interfaces entre os elementos constituintes do CRFA.

Devido ao fato de a deformação imediata utilizada ser a calculada, não é possível realizar análises com estes valores, pois são obtidos através de resultados experimentais como o módulo de elasticidade.

A Figura 55 apresenta a comparação da influência da adição de fibras de aço no concreto quanto a fluência na compressão para as duas classes de resistência analisadas. Os valores foram obtidos pela relação entre a fluência específica do concreto referência e das dosagens com fibras de aço. Desta forma, valores acima de 1,0 representam redução na deformação por fluência e valores inferiores a 1,0 aumento na deformação.

Figura 55 – Comparação de fluência para as classes de resistência de 25 e 50 MPa



Fonte: Autor (2019)

Para as duas classes de resistência a adição de 30 e 40 kg/m³ de fibras de aço no concreto apresentaram efeitos positivos, pois houve redução na deformação por fluência quando

comparadas ao concreto sem fibras. O teor de fibra que apresentou melhor efetividade quanto à fluência na série C25 foi o de 40 kg/m³, já para a série C50 o melhor desempenho foi atingido com o teor de 30 kg/m³.

A adição dos teores de fibra de 50 e 60 kg/m³ apresentaram efeitos contrários quanto à fluência de acordo com as classes de resistência. Para a série C25 ao adicionar fibras nestes teores o concreto apresentou maiores deformações quando comparadas ao concreto sem fibras. Já na série C50 as adições nestes teores de fibras apresentaram efeitos positivos quanto à fluência, no entanto com eficácia inferior aos obtidos pelos teores de 30 e 40 kg/m³ de fibra.

Tal comportamento pode ser justificado pela microestrutura do CRFA, em que a porosidade na região de transição interfacial fibra-matriz do concreto de resistência de 50 MPa é menor do que de resistência de 25 MPa. Quanto menor a quantidade de imperfeições nesta região de interface, maior é a eficiência do reforço das fibras de aço no concreto (BENTUR; MINDESS, 2007).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da adição de fibras de aço no concreto quanto a deformação por fluência na compressão.

Desta forma, primeiramente foram analisados o efeito da adição das fibras de aço nas propriedades mecânicas do CRFA, como resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Posteriormente os resultados experimentais de deformação imediata e redução de carga devido à deformação por fluência do concreto foram expostos e discutidos.

Com base nos resultados dos ensaios e nas análises desenvolvidas no capítulo 5 pode-se chegar nas seguintes conclusões:

- a adição de fibras ao concreto apresentou efeito positivo na resistência à tração por compressão diametral. Quanto maior o teor de fibras adicionado e maior a resistência à compressão da matriz cimentícia, maiores foram as resistências à tração, atingindo até 133,62% de acréscimo.
- a adição de fibras no concreto não apresentou influência significativa na resistência à compressão do concreto. A variação dos resultados permaneceu no intervalo do desvio padrão e coeficiente de variação, desta forma não é possível concluir que a adição de fibras nestes teores influenciou na resistência à compressão;
- a adição de fibras no concreto não apresentou influência significativa no módulo de elasticidade à compressão do concreto. Do mesmo modo que na resistência à compressão, a variação dos resultados permaneceu no intervalo do desvio padrão e coeficiente de variação, desta forma não é possível concluir que a adição de fibras nestes teores influenciou no módulo de elasticidade à compressão;

- as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade à compressão do concreto apresentaram desempenhos correlacionados, ou seja, conforme houve variação em uma propriedade a outra variou proporcionalmente. Não houve correlação direta destas propriedades com a fluência;
- o aparato experimental utilizado para determinação da fluência do concreto apresentou reprodutividade e repetibilidade, pois apresentou baixas dispersões de dados entre as séries de ensaios e resultados satisfatórios, de acordo com outras pesquisas presentes na literatura;
- os pares de aparatos experimentais com corpos de prova de CRFA de mesma dosagem apresentaram deformações com menores dispersões do que os pares de aparatos com corpos de prova de concreto simples, pois as fibras realizaram a distribuição das tensões internas ao concreto de forma mais homogênea na matriz;
- a adição de fibras de aço no concreto nos teores de 30 e 40 kg/m³ foram efetivas quanto a fluência para as duas classes de resistência. Apenas para a classe de resistência de 50 MPa, as dosagens de 50 e 60 kg/m³ se mostraram eficazes para redução da fluência.
- as fibras foram mais eficazes nos concretos de classe de resistência de 50 MPa, em que todas as dosagens apresentaram menores reduções de carga devido à fluência quando comparadas ao concreto sem fibras. A menor porosidade na zona interfacial fibra-matriz do concreto de classe de resistência de 50 MPa quando comparada ao concreto de classe de resistência de 25 MPa é responsável por este comportamento;
- após 60 dias de ensaio, as leituras das células de carga dos aparatos experimentais indicaram a tendência de estabilização das deformações do concreto;
- os selos aplicados nos corpos de prova previamente aos ensaios apresentaram bom desempenho, apesar de não serem impermeáveis, pois evitaram a perda de grandes quantidades de água do concreto para o meio, fator influente na determinação da fluência.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se:

- análise da influência de adição de fibras de aço em diferentes tensões, como na tração ou flexão, assim como em diferentes teores de fibras de aço;

- execução do ensaio conforme NBR 8224:2012, com utilização de extensômetros internos ao concreto e aplicação de carga constante ao longo do tempo, para comparação com os resultados desta pesquisa;
- aplicação de diferentes níveis de carga de ensaio nos corpos de prova em idades de carregamento diferentes, assim como variação na duração do ensaio;
- adição de fibras de materiais e dimensões distintas, preferencialmente com módulos de elasticidade mais elevados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTOUBAT, S. A.; LANGE, D. A. Creep, Shrinkage and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 4, p. 323-331, 2001.
<https://doi.org/10.14359/10401>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.2R**: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. ACI Committee, 2008, 44 p.

_____. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014. 524 p.

_____. **ACI 544.1R**: State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI committee, 1996. Reapproved 2009, 66 p.

_____. **ACI 544.3R**: Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete. ACI committee, 2008, 16 p.

_____. **ACI 544.4R**: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. ACI committee, 1988. Reapproved 2009. 22 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), 9 p. Pennsylvania, 2012.

ARAUZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado reforçado com fibras de aço**. 156 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 156 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ASLANI, F.; NEJADI, S. Bond characteristics of steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 39, n. 4, p. 834-848, 2012.
<https://doi.org/10.1139/l2012-069>

ASLANI, F.; NEJADI, S. Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete with and without Fibers. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 11, p. 251-265, 2013.
<https://doi.org/10.3151/jact.11.251>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009, 6 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009, 8 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 8 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016, 9 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018, 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 239 p.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2015, 70 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009, 9 p.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011, 5 p.

_____. **NBR 8224**: Concreto endurecido – Determinação da Fluência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012, 9 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017, 20 p.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009, 7 p.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013, 4 p.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2007, 7 p.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017, 4 p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018, 12 p.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. Concrete reinforced with deformed steel fibers - Part II: Toughness Characterization. **ACI Materials Journal**, Detroit, USA, v. 92, n. 2, p. 146-154, 1995. <https://doi.org/10.14359/9765>

BAŽANT, Z.P. **Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete**, 459 p. John Wiley & Sons Ltda, 1988

BAŽANT, Z.P.; CHERN, J.C. Concrete creep at variable humidity. **Materials and Structures** v.18, p.1-20, 1985.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 601 p. 2 ed. United Kingdom: Elsevier, 2

BISSONNETTE, B.; PIGEON, M. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 5, p. 1075-1085, 1995.

BISSONNETTE, B.; PIGEON, M.; VAYSBURD, A. M. Tensile creep of concrete: study of its sensitivity to basic parameters. **ACI Materials Journal**, v.104, n. 4, p. 360-368, 2007. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00102-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00102-1)

BLYSZKO, J. Comparative analysis of creep in standard and fibre reinforced concretes under different load conditions. **Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures – Procedia Engineering**, n. 193, p. 478-485, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.240>

BOSHOF, W. P. **Time-Dependant Behaviour of Engineered Cement-Based Composites**, 168 p. Dissertation for Doctor of Philosophy in Engineering. University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2007.

BOSHOF, W. P.; VAN ZIJL, G. P. A. G. Time-dependent response of ECC: Characterisation of creep and rate dependence. **Cement and Concrete Research**, n. 37, p. 725-734, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.001>

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 705 p. 7 ed. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 817 p. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHENG, M-Y.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections - Part I: Monotonically Increased Load. **ACI Structural Journal**. v.107, n.1, p. 101-109, 2010. <https://doi.org/10.14359/51663394>

CHERN, J. C.; YOUNGT, C. H. Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n. 4, p. 205-214, 1989. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(89\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0958-9465(89)90017-6)

DIAS, R. F. **Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609**. 129 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, London, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010**: First Complete Draft. v. 1, Switzerland, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v. 2, p. 1327-1365, 2011a.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 247 p. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011b.

FILHO, L. C. P. S.; HELENE, P. **Análise de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v. 2, cap. 32, 2011.

GARCEZ, E. O. A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto**. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HUBLER, M. H.; WENDNER, R.; BAŽANT, Z. P. Comprehensive Database for Concrete Creep and Shrinkage: Analysis and Recommendations for Testing and Recording. **ACI Materials Journal**, n. 112, p. 547-558, 2015. <https://doi.org/10.14359/51687453>

JOHNSTON, C. D. **Fiber-Reinforced Cements and Concrete (Advances in Concrete technology) – Volume 3**. 261 p. International Center for Sustainable Development of Cement and Concrete (ICON). Canada, Ontario, Ottawa, 2001.

KHOURI, M. E. **Contribuição ao Projeto de Pilares de Pontes de Concreto Armado com Consideração das Não-linearidades Física e Geométrica e Interação Solo – estrutura**. 231 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LONG, W. J.; KHAYAT, K. H. Creep of prestressed self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, n. 108, p. 476-484, 2011. <https://doi.org/10.14359/51683256>

MANGAT, P. S.; MOTAMED AZARI, M. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement matrices under compression. **Journal of Materials Science**, Aberdeen, Reino Unido, v. 20, p. 1119-1133, 1985. <https://doi.org/10.1007/BF00585757>

MANGAT, P. S.; MOTAMED AZARI, M. Compression creep behaviour of steel fibre reinforced cement composites. **Matériaux et Constructions**, Aberdeen, Reino Unido, v. 19, n. 113, p. 361-369, 1986. <https://doi.org/10.1007/BF02472126>

MARANGON, E. **Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**, 309 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 675 p. 4 ed. The McGraw-Hill Companies, 2014.

MILLER, K. P. **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura**, 305 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MONTEDOR, L.C. **Desenvolvimento de compósito a ser utilizado como almofada de apoio nas ligações entre elementos pré-moldados**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Japan Concrete Institute, v. 1, n. 9, p. 241-252, 2003. <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2016.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 253 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, N. L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto**. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, A. M. **Fluência a altas temperaturas, aderência fibra-matriz e comportamento mecânico sob ações higrotérmicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA**, 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, L.A. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análise estática e dinâmica**. 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. 130 p. Dissertação (Mestrado Engenharia) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

PEREIRA, M. M. **Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras**, 153 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PERUMAL, R. Correlation of Compressive Strength and Other Engineering Properties of High-Performance Steel Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 1, 2015.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RANAIVOMANANA, N.; MULTON, S.; TURATSINZE, A. Basic creep of concrete under compression, tension and bending. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 173-180, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.024>

RILEM TC 107-CSP **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Vol. 31, October 1998. CREEP AND SHRINKAGE PREDICTION MODELS: PRINCIPLES OF THEIR FORMATION. Recommendation. Measurement of time-dependent strains of concrete, 1998.

ROSSI, P.; TAILHAN, J. L.; MAOU, F. Comparison of concrete creep in tension and in compression: Influence of concrete age at loading and drying conditions. **Cement and Concrete Research**, n. 51, p. 78-84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.001>

SAJE, D.; BANDELJ, B.; SUSTERSIC, J.; LOPATIC, J.; SAJE, F. Shrinkage and Creep os Steel Fiber Reinforced Normal Strength Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 41, n. 6, p. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1520/JTE20120134>

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SALVADOR, R.P.; FIGUEIREDO, A.D. 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. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200003>

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTOS, A. C. **Ensaio para análise da interface entre o concreto e polímero reforçado com fibra**. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, M. A. **Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos auto adensáveis contendo seixo de rio e fibras de aço**. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SOBRAL, E. S. **Propriedades do concreto fresco**. 471 p. 5 ed. In.: Luiz Alfredo Falcão Bauer (Org.) *Materiais de construção*. Revisão Técnica: João Fernando Dias. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SUDANO, A. L. **Desenvolvimento de estratégias híbridas de reforços de pilares de concreto armado por encamisamento de pilares com compósitos de alto desempenho**. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TAN, K. H.; PARAMASIVAM, P.; TAN, K. C. Creep and shrinkage deflections of RC beams with steel fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 6, n. 4, p. 474-494, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1994\)6:4\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1994)6:4(474))

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 349 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VITOR, P. C. P. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço**. 217 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300280>

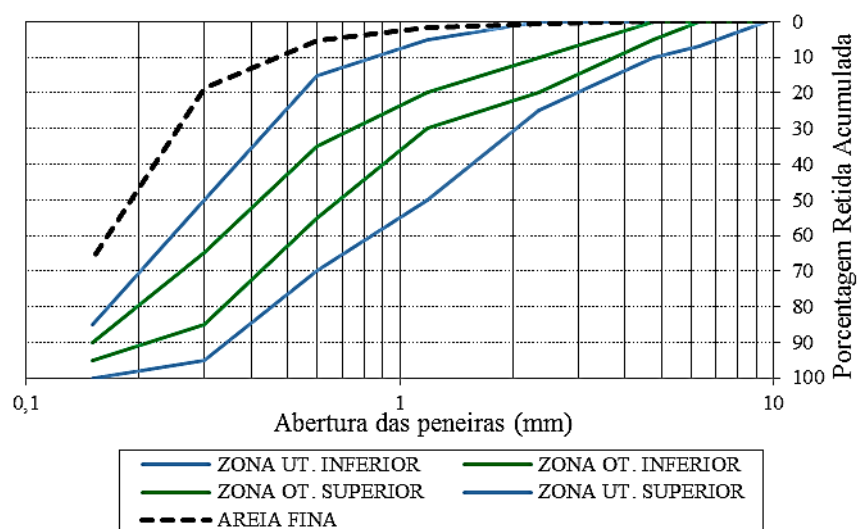
WITTMAN, F. H. Heresies on shrinkage and creep mechanisms. **CONCREEP 2008, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, v.1, pp. 3-9, 2008. <https://doi.org/10.1680/stco.2008.9.1.3>

ZHAO, Q.; YU, J.; GENG, G.; JIANG, J.; LIU, X. Effect of fiber types on creep behavior of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 416-422, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.149>

APÊNDICE A

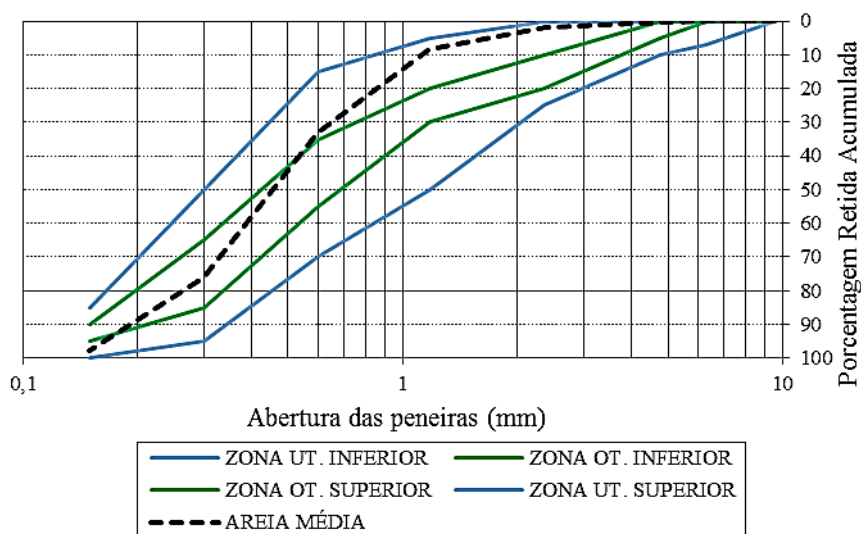
CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

Curva granulométrica da areia fina e as zonas limites de utilização



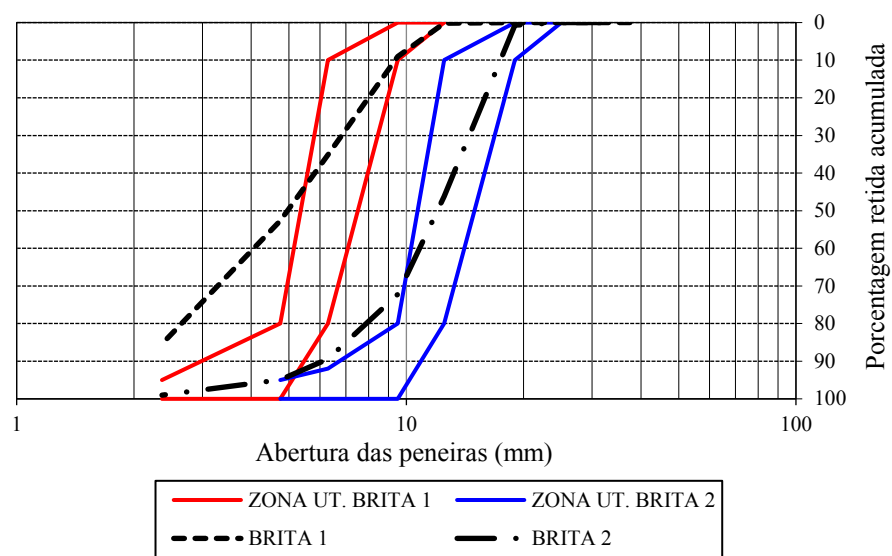
Fonte: Autor (2019)

Curva granulométrica da areia média e as zonas limites de utilização



Fonte: Autor (2019)

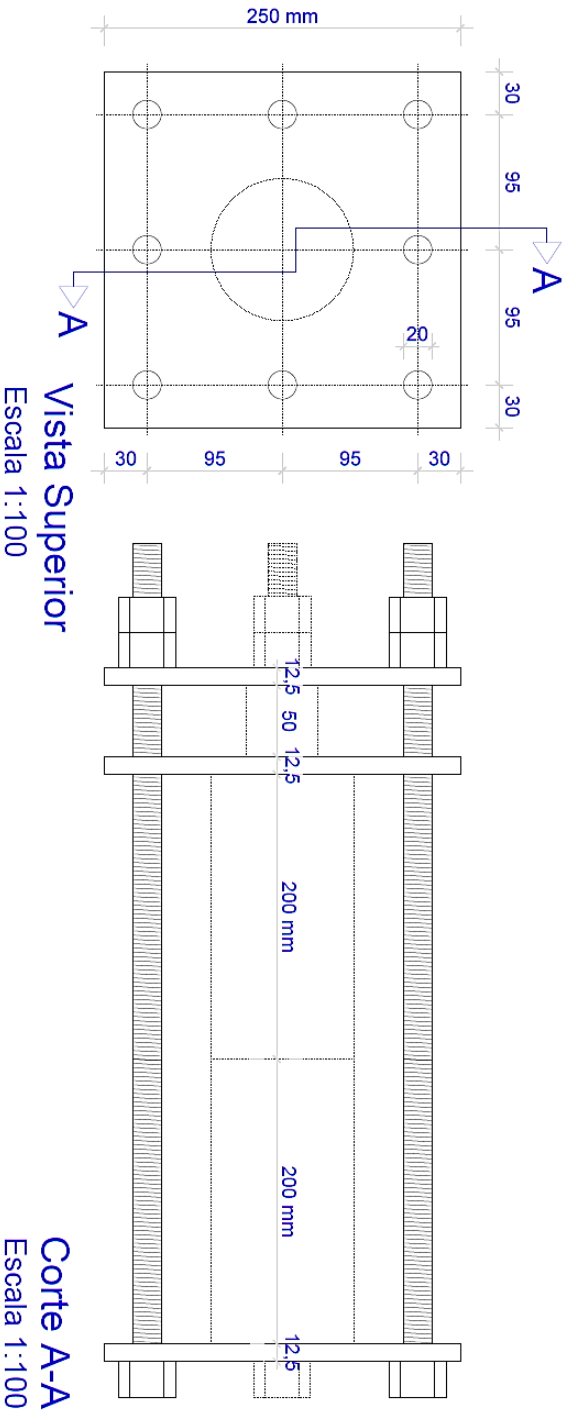
Granulometrias das britas 1 e 2 e suas respectivas zonas limites de utilização



Fonte: Autor (2019)

APÊNDICE B

PROJETO DE PRODUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL



APÊNDICE C

RESULTADOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Série	Resistência à compressão aos 28 dias				
	CP I (MPa)	CP II (MPa)	CP III (MPa)	Média (MPa)	D. padrão (MPa)
C25 - Ref. (sem fibra)	26,63	25,55	27,02	26,40	0,76
C25 - 0,38% fibra	29,52	27,64	30,20	29,12	1,33
C25 - 0,50% fibra	26,21	28,21	28,93	27,78	1,41
C25 - 0,64% fibra	25,63	28,55	29,60	27,93	2,06
C25 - 0,77% fibra	25,98	22,62	27,22	25,27	2,38
C50 - Ref. (sem fibra)	47,57	46,58	53,92	49,36	3,98
C50 - 0,38% fibra	49,20	49,00	53,10	50,43	2,31
C50 - 0,50% fibra	50,84	58,39	54,25	54,49	3,78
C50 - 0,64% fibra	50,18	49,54	55,16	51,63	3,08
C50 - 0,77% fibra	54,13	48,02	52,64	51,60	3,19

APÊNDICE D

RESULTADOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Série	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias				
	CP I (MPa)	CP II (MPa)	CP III (MPa)	Média (MPa)	D. padrão (MPa)
C25 - Ref. (sem fibra)	3,04	3,08	3,02	3,05	0,03
C25 - 0,38% fibra	3,47	3,85	3,99	3,77	0,27
C25 - 0,50% fibra	3,77	4,30	4,48	4,18	0,37
C25 - 0,64% fibra	3,85	3,38	4,01	3,75	0,33
C25 - 0,77% fibra	3,92	4,51	4,74	4,39	0,42
C50 - Ref. (sem fibra)	3,14	3,76	3,64	3,51	0,33
C50 - 0,38% fibra	4,95	4,46	4,89	4,77	0,27
C50 - 0,50% fibra	6,47	5,39	6,35	6,07	0,59
C50 - 0,64% fibra	7,87	7,01	7,27	7,38	0,44
C50 - 0,77% fibra	8,35	8,18	8,07	8,20	0,14

APÊNDICE E

RESULTADOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Série	Módulo de elasticidade aos 28 dias		
	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
C25 - Ref. (sem fibra)	27,91	0,98	3,53
C25 - 0,38% fibra	29,52	1,27	4,31
C25 - 0,50% fibra	29,32	1,35	4,60
C25 - 0,64% fibra	27,55	1,65	5,99
C25 - 0,77% fibra	26,63	1,19	4,48
C50 - Ref. (sem fibra)	39,90	2,03	5,08
C50 - 0,38% fibra	40,98	1,12	2,74
C50 - 0,50% fibra	48,38	0,69	1,43
C50 - 0,64% fibra	41,40	0,75	1,82
C50 - 0,77% fibra	43,36	2,06	4,75

APÊNDICE F

LEITURA DE CARGA AO LONGO DO TEMPO DEVIDO A DEFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA DO CONCRETO

NBR 8224	Série C25 - Carga corrigida (kN) de acordo com o erro (e)									
	e=3,97%	e=1,5%	e=2,91%	e=3,14%	e=1,30%	e=2,26%	e=1,57%	e=3,44%	e=2,3%	e=1,21%
Tempo	CC 1	CC 2	CC 3	CC 4	CC 5	CC 6	CC 7	CC 8	CC 9	CC 10
30 seg.	77,97	78,14	80,02	74,17	83,73	79,43	78,91	81,70	82,78	80,07
5 min.	77,94	78,13	80,02	74,09	83,67	79,40	78,86	81,69	82,70	80,00
10 min.	77,92	78,08	80,01	74,03	83,65	79,37	78,83	81,70	82,70	79,86
30 min.	77,89	78,06	79,94	73,91	83,52	79,35	78,67	81,66	82,62	79,56
1 hora	77,67	77,92	79,78	73,76	83,37	79,30	78,52	81,52	82,38	79,20
2 horas	77,31	77,76	79,47	73,46	83,06	79,24	78,24	81,30	81,86	78,68
5 horas	76,08	77,58	78,59	72,63	82,30	78,69	77,57	80,46	80,64	77,77
1 dia	73,59	77,00	76,53	70,38	80,96	77,48	76,42	79,06	78,25	76,55
2 dias	72,53	76,37	75,59	69,45	80,28	76,78	75,77	78,20	77,05	75,68
3 dias	72,43	76,34	75,43	69,42	80,24	76,73	75,73	78,20	76,86	75,50
4 dias	72,34	76,13	75,30	69,23	80,21	76,68	75,70	78,11	76,72	75,14
5 dias	72,26	75,78	75,18	69,02	79,92	76,34	75,34	77,66	76,16	74,66
6 dias	71,81	75,63	75,06	68,84	79,92	76,30	75,15	77,67	76,12	74,67
7 dias	71,48	75,21	74,52	68,30	79,55	75,88	74,88	77,15	75,57	74,18
11 dias	71,11	75,05	73,99	67,76	79,19	75,46	74,61	76,64	75,02	73,69
14 dias	70,57	74,62	73,41	67,24	78,85	74,96	74,16	76,12	74,45	73,19
19 dias	69,44	74,05	72,37	66,23	78,18	74,16	73,50	75,26	73,37	72,54
22 dias	69,06	73,78	71,96	65,81	78,00	73,85	73,26	74,94	73,05	72,22
26 dias	68,67	73,50	71,55	65,39	77,82	73,54	73,03	74,62	72,72	71,90
29 dias	68,29	73,22	71,13	64,97	77,65	73,23	72,79	74,30	72,39	71,58
36 dias	67,90	72,96	70,71	64,55	77,46	72,91	72,55	73,98	72,06	71,26
43 dias	67,75	72,66	70,33	64,30	77,32	72,57	72,38	73,74	71,63	70,81
50 dias	67,42	72,48	69,98	63,81	77,07	72,15	71,97	73,38	71,02	70,53
57 dias	66,77	72,03	69,36	63,45	76,77	71,88	71,81	72,94	70,77	70,21
64 dias	66,36	71,74	68,96	63,19	76,61	71,62	71,36	72,71	70,24	69,83
71 dias	65,80	71,41	68,38	62,59	76,22	71,19	71,25	72,14	69,91	69,61
78 dias	65,67	71,30	68,25	62,42	76,19	70,98	71,07	71,97	69,78	69,48
85 dias	65,31	71,16	68,05	62,25	75,93	70,85	70,93	71,83	69,61	69,29
90 dias	65,22	71,09	67,95	62,11	75,84	70,77	70,77	71,71	69,33	69,20

NBR 8224	Série C50 - Carga corrigida (kN) de acordo com o erro (e)									
	e=3,97%	e=1,5%	e=2,91%	e=3,14%	e=1,30%	e=2,26%	e=1,57%	e=3,44%	e=2,3%	e=1,21%
Tempo	CC 1	CC 2	CC 3	CC 4	CC 5	CC 6	CC 7	CC 8	CC 9	CC 10
30 seg.	135,48	136,85	132,49	127,49	138,09	129,91	126,35	119,02	132,37	143,96
5 min.	133,27	134,51	129,64	125,15	135,18	126,68	123,68	116,12	130,52	142,37
10 min.	132,85	133,84	128,49	124,81	134,05	125,49	121,17	115,46	129,33	141,76
30 min.	132,41	132,41	127,95	123,23	132,86	125,03	120,69	114,05	128,86	141,16
1 hora	131,69	132,00	127,34	122,50	131,79	124,57	120,21	113,83	128,16	140,61
2 horas	131,14	131,54	127,21	121,71	130,72	124,47	120,17	113,27	128,11	140,03
5 horas	131,07	130,98	126,98	120,66	129,65	123,96	120,07	112,22	127,06	139,38
1 dia	128,63	129,90	125,51	118,56	129,13	123,31	118,91	111,69	126,06	138,53
2 dias	127,53	129,14	124,56	117,53	128,16	122,43	118,02	110,73	125,11	137,15
3 dias	127,49	128,90	124,26	117,19	127,96	122,25	117,91	110,63	125,01	136,68
4 dias	126,83	128,54	123,69	116,54	127,45	121,77	117,45	110,10	124,48	136,20
5 dias	126,66	128,33	123,59	116,42	127,37	121,66	117,42	110,04	124,44	135,87
6 dias	126,49	128,16	123,25	116,04	127,12	121,43	117,18	109,72	124,20	135,60
7 dias	126,28	127,91	122,99	115,78	126,89	121,20	116,97	109,50	124,08	135,21
11 dias	125,07	127,22	121,87	114,41	126,11	121,02	116,24	108,49	123,36	134,30
14 dias	124,91	127,16	120,27	112,82	124,91	120,85	114,84	108,47	122,04	132,95
19 dias	124,59	127,13	120,14	110,52	123,31	120,76	114,48	107,99	124,21	132,91
22 dias	123,88	126,97	119,98	108,21	121,70	120,63	114,13	107,51	126,44	132,87
26 dias	123,54	126,92	119,80	105,49	120,77	120,56	112,27	107,17	129,10	132,28
29 dias	123,25	126,82	119,50	104,65	121,22	120,53	111,26	107,10	133,68	131,97
36 dias	122,60	126,52	118,85	103,56	121,53	120,36	110,54	106,86	144,32	131,39
43 dias	121,87	126,12	117,77	102,19	121,11	120,24	109,73	106,40	150,21	130,95
50 dias	121,71	126,08	117,55	101,84	121,08	120,23	109,36	106,18	158,96	130,40
57 dias	120,56	125,36	116,64	100,44	121,18	120,20	108,47	105,47	168,47	129,24
64 dias	120,33	125,26	116,33	99,69	121,55	120,27	108,29	105,42	175,44	129,18
71 dias	120,23	125,26	116,07	99,67	121,72	120,35	108,20	105,48	178,00	129,14
78 dias	119,86	125,72	115,67	99,20	121,50	120,11	107,94	105,19	177,45	128,97
85 dias	119,15	125,09	115,11	98,81	121,18	119,71	107,63	104,70	177,10	128,70
90 dias	118,79	124,59	114,91	98,55	120,96	119,59	107,31	104,54	176,81	128,59