

Mix Design and Characterization of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement Composites

Dosagem e Caracterização de um Compósito Cimentício de Altíssimo Desempenho Armado com Fibras

S. FORMAGINI ^A
sidiclei@mail.uniderp.br

E. M. R. FAIRBAIRN ^B
eduardo@coc.ufrj.br

R. D. TOLEDO FILHO ^B
toledo@coc.ufrj.br

Abstract

This paper presents the Compressive Packing Model (CPM) for the mix design of a self-compacting ultra high performance fiber reinforced cement composites (UHPFRCC). The concrete was produced with CPIII 40 slag cement, silica fume, silica flour, wollastonite, steel fibers and superplasticizer. The particle size of the aggregates ranged from 150 to 600 μ m. The input parameters for the CPM were the granulometry, the density, and the virtual compacity of the grains, together with the compaction index that corresponds to the mixing and placing protocol. New production techniques were employed, for which the addition of the several materials to the mix follows a previously defined schedule determined by the energy consumption of the mixer. The developed concrete had self-compacting characteristics. It presented compressive strength of 162 MPa at 28 days, with tensile strength of 10 MPa and modulus of rupture of 35 MPa.

Keywords: scientific mix design, compressive packing model, ultra-high performance concrete, fiber reinforced concrete, self-compacting concrete.

Resumo

Este trabalho apresenta o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) para a dosagem de um compósito cimentício de altíssimo desempenho armado com fibras (CONADAF). O concreto foi produzido com cimento CPIII 40, sílica ativa, quartzo móido, areia natural, dispersante, microfibras de wollastonita e fibras de aço. A dimensão das partículas dos agregados variou entre 150 e 600 μ m. Propriedades dos materiais, como distribuição granulométrica dos grãos, massa específica e compacidade virtual, assim como o índice de compactação que corresponde ao protocolo de mistura e colocação do material foram utilizados como parâmetros de entrada do MEC. Novas técnicas de produção foram introduzidas, com adição dos líquidos à mistura em função da demanda de energia requerida pelo misturador. O concreto demonstrou ser auto-adensável e apresentou valores de resistência à compressão aos 28 dias de 162 MPa, com resistência à tração direta de 10 MPa e módulo de ruptura de 35 MPa.

Palavras-chave: dosagem científica, modelo de empacotamento compressível, concreto de altíssimo desempenho, concreto armado com fibras, concreto auto-adensável.

^a Adjoint Professor, Civil Engineering Course, UNIDERP, sidiclei@mail.uniderp.br, Cx. 2153, Campo Grande, MS, Brazil

^b Associate Professor, Civil Engineering Department COPPE/UFRJ, eduardo@coc.ufrj.br, toledo@coc.ufrj.br, Cx. 68506, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

1 Introdução

Recentes avanços na tecnologia de dosagem, aliados ao uso de materiais ultra-finos, têm permitido o desenvolvimento de compósitos cimentícios de altíssimo desempenho armados com fibras (CONADAF) que apresentam excelentes propriedades tanto no estado fresco (trabalhabilidade e capacidade auto-adensável) como no estado endurecido (altíssimas resistências à compressão e grande ductilidade na tração), além de durabilidade elevada (microestrutura densa, baixa porosidade, alta resistência a ataques químicos) [1]. O desenvolvimento do CONADAF tem sido possível graças à aplicação de métodos científicos de dosagem que induzem a uma otimização do empacotamento, à utilização de aditivos que afetam a reologia e à reatividade química dos constituintes [2]. O uso de fibras de aço como reforço aumenta a ductilidade do material, diminuindo a tendência ao desenvolvimento de rupturas frágeis, tendência esta que é verificada em materiais mais homogêneos como é o caso dos concretos de alto e altíssimo desempenho ([3],[4]).

Este trabalho apresenta uma metodologia para a dosagem de CONADAF, baseada no conceito de máximo empacotamento da mistura granular seca, utilizando o modelo de empacotamento compressível (MEC), desenvolvido por DE LARRARD e colaboradores ([5],[6],[7]). A dosagem através do MEC, além de levar em conta parâmetros tradicionais como abatimento do tronco de cone e resistência à compressão, possibilita uma caracterização mais completa do material através da utilização de um maior número de parâmetros que definem os fenômenos físico-químicos como: viscosidade cinemática e tensão de escoamento, considerando o compósito fresco como um fluido não-newtoniano; módulo de elasticidade, calor de hidratação e retração autógena para o concreto endurecido.

A mistura é processada por técnicas inovadoras, totalmen-

te diferentes das tradicionais, por ser um compósito produzido com quantidades elevadas de cimento, altos teores de dispersantes, agregados com dimensão máxima de 600 μm e relação água/cimento (a/c) de 0,19 [8].

2 O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)

2.1 Conceituação inicial

Um dos conceitos mais importantes para o desenvolvimento do MEC é o da compacidade virtual de empacotamento (β) de uma mistura granular monodispersa (mistura cujos grãos podem ser considerados de diâmetro constante), definida como a máxima compacidade que seria possível de ser obtida através do empilhamento dos grãos um a um e/ou com a utilização de uma grande quantidade de energia (mas sem quebra dos grãos) [5]. Um exemplo teórico, mas elucidativo, é o caso de cubos iguais que teriam uma compacidade virtual de empacotamento $\beta=1$ se fossem empilhados um a um (Figura 1a). Outro exemplo, é o caso do empacotamento de esferas de tamanhos iguais, para as quais a compacidade virtual é $\beta=0,74$, que corresponde ao arranjo CFC (cúbico de face centrada), encontrado na natureza, por exemplo, em átomos de cobre e ouro (Figura 1b).

A compacidade virtual β de uma determinada classe de grãos é uma propriedade intrínseca desta classe e não depende do protocolo de empacotamento real a que ela foi submetida, já que β é definida segundo um protocolo de empacotamento ideal (virtual). O conceito de empacotamento virtual acima descrito, pode ser estendido a uma mistura de grãos de diversas classes granulométricas diferentes. Neste caso, a compacidade virtual da mistura é denominada pela letra grega γ .

Outro conceito importante para a elaboração do MEC é o de classe de grãos dominante. Assim, se for estabelecido

Figura 1 – Arranjos de empacotamentos

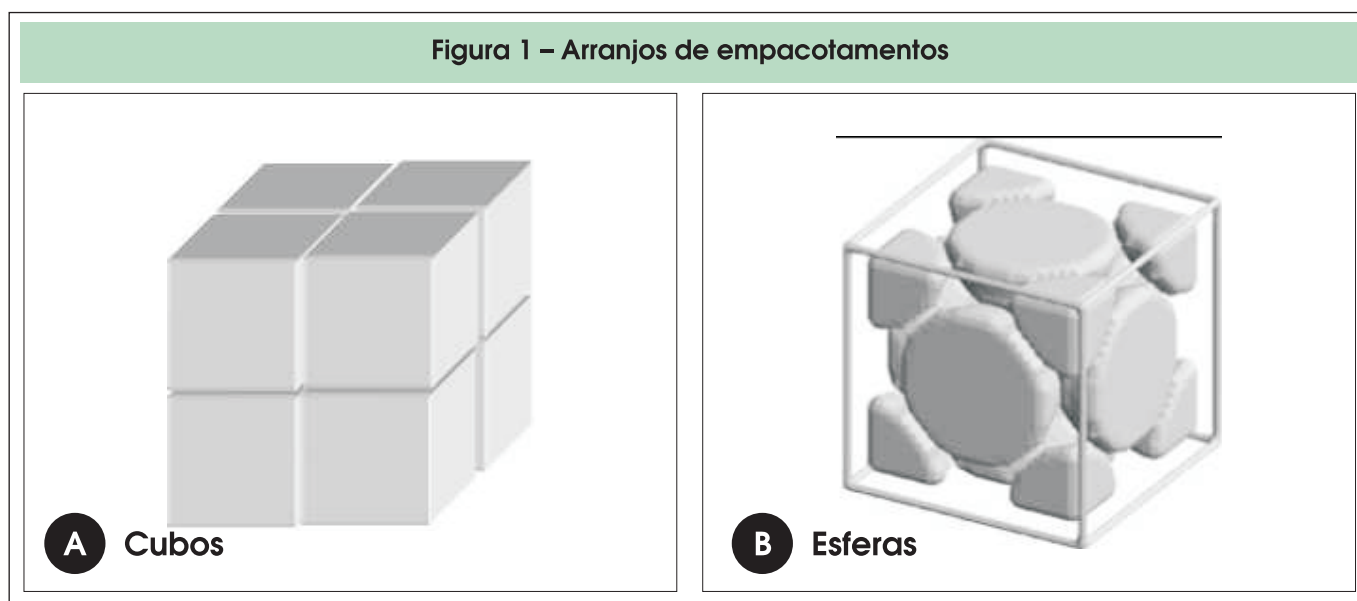
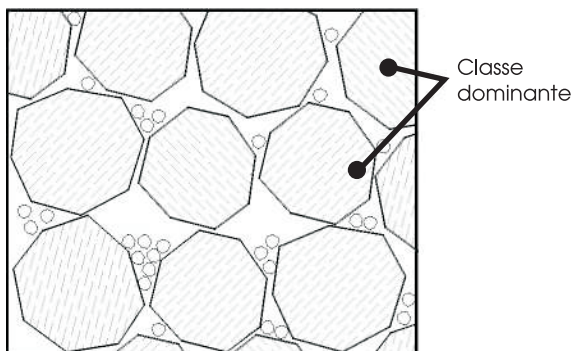


Figura 2 – Conceito de classe dominante (6)



que os diâmetros das classes granulares são ordenados na seqüência $d_1 > \dots > d_i > \dots > d_n$, e se não houver segregação, diz-se que a classe granular i é dominante se ela assegurar a continuidade sólida do corpo granular, como mostra a Figura 2. Neste exemplo de mistura binária ($d_1 > d_2$), a continuidade sólida é garantida pelos grãos da classe 1, sendo que os grãos da classe de menor dimensão, apenas ocupam parte dos vazios produzidos pelo empacotamento dos grãos da classe de maior dimensão.

O MEC pode ser entendido como sendo um modelo construído em dois módulos:

No primeiro módulo, é estabelecida uma álgebra que deduz as relações para o empacotamento virtual.

No segundo módulo, são estabelecidas as relações (principalmente físicas e experimentais) que ligam as propriedades virtuais (principalmente heurísticas que caracterizam a capacidade do material empacotar) às propriedades reais da mistura granular submetida a um procedimento de empacotamento. Por exemplo, se for considerado um recipiente com um grande número de partículas esféricas, elas não atingiriam nunca uma compactação de 0,74.

O MEC relaciona então o empacotamento virtual ao empacotamento real através de um parâmetro intrínseco ao procedimento real de empacotamento adotado, chamado

Tabela 1 – Valores do índice de compactação para diversas condições de lançamento e adensamento

Protocolo de empacotamento		K
seco	Lançamento simples	4,1
	Aplonamento	4,5
	Vibração	4,75
	Vibração + compressão 10kPa	9
úmido	Demanda de água	6,7
virtual	(um a um manualmente (γ))	∞

índice de compactação. Este índice é um escalar, denominado K , e correlaciona a compactidade virtual (γ) com a compactidade real (ϕ). Este escalar depende do protocolo de lançamento e adensamento requerido para a dosagem. Quando o valor de K tende a infinito, a compactidade ϕ tende a compactidade virtual γ .

O valor do índice K é deduzido a partir de misturas binárias, de acordo com o protocolo de lançamento adotado. Valores do índice K para diversos tipos de protocolos, utilizados para a caracterização dos materiais, são apresentados na Tabela 1 [6].

2.2 Formulação

A equação geral que representa a compactidade virtual ($\gamma^{(m,i)}$) de uma mistura granular composta por m materiais divididos em n classes, quando a classe i é dominante, é dada por [7]:

$$\gamma^{(m,i)} = \frac{\beta_{mi}}{1 - \sum_{k=1}^M [\delta_1 + \delta_2]} \quad (1)$$

sendo:

$$\delta_1 = \sum_{j=1}^i \left[1 - \beta_{mi} + b_{ij} \beta_{mi} \left(1 - \frac{1}{\beta_{kj}} \right) \right] p_k y_{kj}$$

e

$$\delta_2 = \sum_{j=i+1}^N \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_{mi}}{\beta_{kj}} \right] p_k y_{kj}$$

Onde:

p_k é a fração volumétrica do material m ;

y_{mi} é a fração volumétrica da classe i do material m ;

β_{mi} é a compactidade virtual da classe i do material m .

Os coeficientes a_{ij} e b_{ij} representam, respectivamente, os efeitos de afastamento e de parede exercidos pelos grãos ao serem empacotados.

A equação geral, para uma mistura de m materiais divididos em n classes, que relaciona a compactidade virtual à compactidade real através do índice de compactação (K), é dada por [7]:

$$K = \sum_{i=1}^M \frac{\sum_{m=1}^M p_m y_{mi} \beta_{mi}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} \quad (2)$$

Como pode ser observado, a equação (2) é implícita em ϕ e demanda, a partir de uma mistura ternária, um procedimento numérico para sua solução. No entanto, o espaço

de busca é limitado, e procedimentos robustos de solução podem ser utilizados.

A equação (2), se particularizada para uma classe granular monodispersa. Permite a determinação da compacidade virtual (β) a partir da compacidade real (ϕ), que pode ser determinada através de um ensaio experimental que corresponda a um determinado protocolo de empacotamento que tenha o índice de compactação K conhecido. Assim, a compacidade virtual pode ser determinada pela fórmula:

$$\beta = \phi \left(\frac{1}{K} + 1 \right) \quad (3)$$

A operacionalização do MEC, para que possa ser realizado o cálculo da compacidade de uma mistura granular, demanda a determinação experimental das diversas propriedades de cada material, como a distribuição granulométrica, a massa específica e a compacidade experimental, além do conhecimento do valor do índice K para o protocolo de empacotamento utilizado.

De posse de tais valores e das equações (1) a (3), é possível, através de um procedimento de otimização, determinar qual a composição dos diversos materiais que fornece a maior compacidade para os materiais empregados.

Além da determinação desta mistura ótima que corresponde à compacidade máxima, o MEC, através de modelos específicos, pode também ser utilizado para a predição de algumas propriedades do compósito tanto no estado fresco como endurecido. Tais modelos serão apresentados a seguir.

2.3 Determinação das propriedades do compósito fresco

Dentro do quadro do MEC, o modelo de fluido utilizado para o compósito é de Bingham, para o qual até ser atingida uma tensão cisalhante de escoamento τ_0 , o material se comporta como sólido, sendo que em seguida existe uma relação linear entre tensão cisalhante τ e velocidade

de deformação angular $\dot{\gamma}$. Este modelo é representado pela equação:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

onde μ é a viscosidade plástica. A Figura 3 indica, esquematicamente, que a tensão de escoamento τ_0 é originada pelo contato entre os grãos, e que a viscosidade cinemática está relacionada à dissipação viscosa do líquido.

Sendo assim, no modelo proposto pelo MEC, a viscosidade plástica (μ) é associada à concentração normalizada de sólidos (ϕ_i / ϕ_i^*), onde ϕ é o volume de sólidos da classe e ϕ_i^* é o máximo volume que a classe pode ocupar na presença de outras classes:

$$\mu = \exp \left[26,75 \left(\frac{\phi}{\phi^*} - 0,7448 \right) \right] \quad (5)$$

Para a tensão cisalhante de escoamento τ_0 , o MEC propõe a seguinte expressão:

$$\tau_0 = \exp \left(2,537 + \sum_{i=1}^N a_i \frac{\phi_i / \phi_i^*}{1 - \phi_i / \phi_i^*} \right) \quad (6)$$

onde: o somatório $i = 1, N$ refere-se às diversas classes granulares, sendo o índice 1 referente ao cimento e os índices subsequentes aos agregados; o coeficiente a_i , dependente do teor de dispersante na mistura sendo dado por:

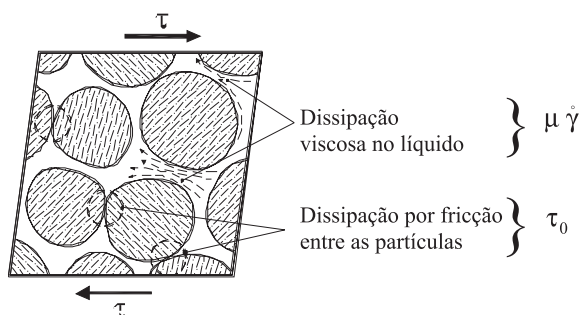
$$a_i = 0,224 + 0,910 \left(1 - S_p / S_p^* \right) \quad (7)$$

sendo: S_p e S_p^* , respectivamente, a dosagem de dispersante e seu ponto de saturação; os coeficientes a_i , com $i \geq 2$, são relacionados à dimensão dos grãos e determinados pela relação:

$$a_i = 0,736 - 0,216 \log(d_i) \quad (8)$$

onde d_i (mm) é o diâmetro médio dos agregados da classe granular i .

Figura 3 – Comportamento do compósito no estado fresco (6)



2.4 Determinação das propriedades do compósito endurecido

A resistência à compressão da matriz cimentícia, em função da idade t , é determinada pela expressão [6]:

$$f_{cm}(t) = 13,4 R_{c_{28}} MEP^{-0,13} \times \left[d(t) + \left(\frac{v_c}{v_c + v_w + v_{ar}} \right)^{2,85} \right] \quad (9)$$

onde: $R_{c_{28}}$ é a resistência à compressão do cimento aos 28 dias (MPa); v_c , v_w e v_{ar} representam, respectivamente, os volumes de cimento, água e ar em um volume unitário de compósito; $d(t)$ é um **parâmetro cinético adimensional**, que representa a contribuição que o cimento pode fornecer na resistência do compósito a uma idade t , determinada por:

$$d(t) = 0,0522 \left(\frac{R_{c_t}}{R_{c_{28}}} - 1 \right) \quad (10)$$

Sendo: R_{c_t} a resistência à compressão do cimento na idade t ; **MEP a máxima espessura de pasta** (distância média entre os agregados imersos na matriz como mostrado na Figura 4), determinada pela expressão:

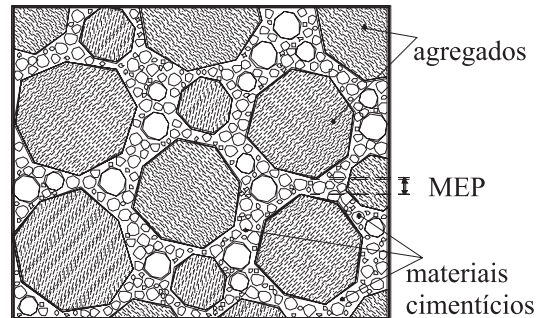
$$MEP = D \left[\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right] \quad (11)$$

onde: D é a dimensão do agregado referente a 90% do percentual passante na peneira previamente definida; g é o volume real dos agregados num volume unitário de compósito; e g^* é a **compacidade real dos agregados** determinada com índice $K = 9$.

O módulo de elasticidade da matriz cimentícia E_m (GPa), em função da idade t , é dado por [6]:

$$E_m(t) = 226 f_{cm}(t) \quad (12)$$

Figura 4 – Máxima espessura de pasta em uma mistura granular seca (6)



A resistência à tração da matriz cimentícia, correspondendo ao ensaio de tração direta é obtida por [6]:

$$f_t(t) = 0,468 f_{cm}(t)^{0,57} \quad (13)$$

2.5 Simulador computacional

Com base nos conceitos apresentados nos itens 2.1 a 2.4 e representados de forma esquemática pelas equações (1) a (13), foi desenvolvido um simulador computacional de misturas que permite realizar a otimização da compactidade e o cálculo das propriedades do material nos estados fresco e endurecido. O simulador, denominado MECFOR, é descrito em detalhes na referência [1].

Figura 5 – Distribuição granulométrica

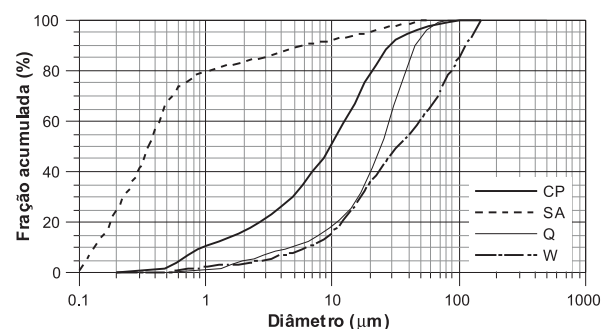


Tabela 2 – Massa específica dos materiais (g/cm³)

CP	SA	Q	C1	C2	W	FA
2,99	2,22	2,65	2,67	2,67	2,9	7,9

Tabela 3 – Composição química

Composto	CP	SA	Q	W
Fe ₂ O ₃	2,62	0,70	0,10	0,40
CaO	52,14	1,10	0,30	47,5
K ₂ O	0,51	0,44	—	—
Al ₂ O ₃	7,50	0,10	0,20	0,20
SiO ₂	24,94	91,00	98,80	51,00
MgO	5,34	1,50	0,20	0,10
SO ₃	2,57	—	—	—
CO ₂	1,51	—	—	—
Na ₂ O	0,09	0,39	—	—
Perdas	2,63	—	0,40	0,68

3 Caracterização experimental dos componentes do CONADAF

3.1 Materiais empregados

Os materiais cimentícios utilizados foram o cimento composto com escória CP III 40 (CP) e a sílica ativa (SA). Três tipos de agregados, a saber: pó de quartzo (Q) com dimensão média de 18 µm; e duas classes mono-tamanho de areia natural (peneiradas), com dimensão dos grãos entre 150 µm e 300 µm (C1) e entre 425 µm e 600 µm (C2), respectivamente. Foi usado um dispersante (sp) a base de policarboxilatos com 32,5% de sólidos. Um volume de 2% de fibras de aço (FA)

Tabela 4 – Características do dispersante

Tipo	densidade	pH	% sólidos
Policarboxilatos	1,04-1,11	6-7	32,0-33,1

(12 mm de comprimento e 0,18 mm de diâmetro) e 2,6% de micro-fibras de wollastonita (W) (com dimensão transversal variando de 5 µm a 100 µm e a longitudinal de 50 µm a 2 mm), foram usados como reforço sem que houvesse formação de novelos, satisfazendo critérios de auto-adsensamento estabelecidos para o compósito. A relação a/c foi de 0,19.

3.2 Caracterização experimental

3.2.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do CP, do Q e da W foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser. Para a SA foi utilizada a técnica de sedigrafia. A granulometria dos materiais é mostrada na Figura 5.

3.2.2 Massa específica

Os valores da massa específica do CP, da SA e da Q foram determinados por meio do frasco de Le Chatelier de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 23 [9]. A massa específica de cada classe de areia foi determinada por meio do frasco de Chapman de acordo com a NBR 9776 [10]. A massa específica da W foi fornecida pelo fabricante. Os valores assim obtidos são apresentados na Tabela 2.

3.2.3 Composição química

As composições químicas dos materiais cimentícios, do Q e da W, fornecidos pelos respectivos fabricantes, são apresentadas na Tabela 3.

Figura 6 – Ponto de saturação do dispersante com o CP, SA e Q

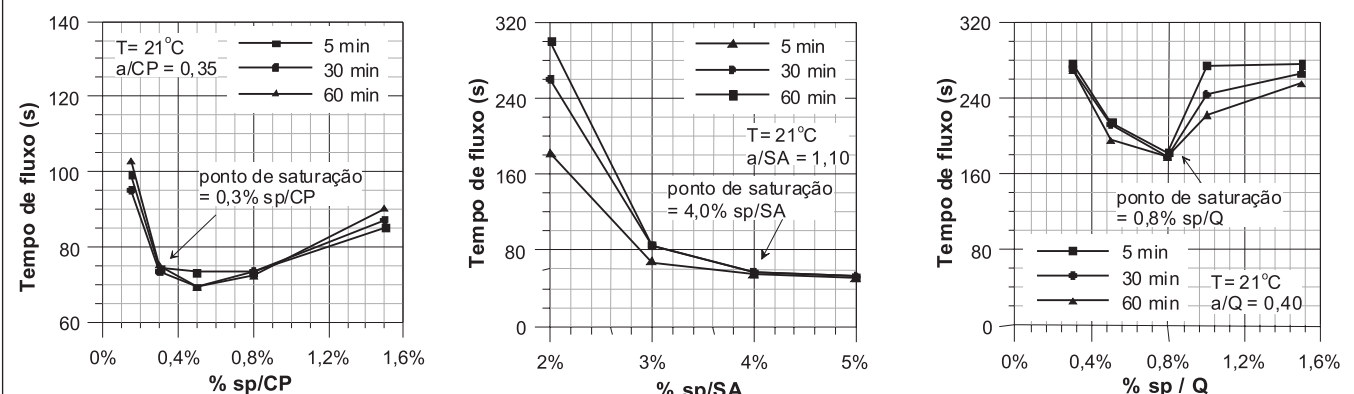


Figura 7 – Ensaio de demanda de água

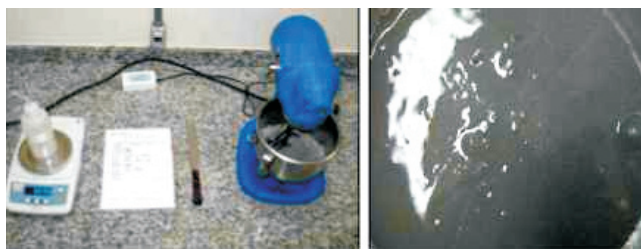


Figura 8 – Ensaio de vibração mais pressão de 10 kPa (K=9)



3.2.4 Dispersante

As características do dispersante utilizado foram determinadas experimentalmente e são apresentadas na Tabela 4. Sua compatibilidade e ponto de saturação com os materiais cimentícios, foi determinada por meio do ensaio de fluidez de pastas, utilizando o funil de Marsh com abertura de 5mm [11]. Os resultados são apresentados na Figura 6.

3.2.5 Compacidade

A compacidade experimental dos materiais finos ($d < 100 \mu\text{m}$) foi determinada pelo ensaio de demanda de água (índice $K=6,7$, Tabela 1) [6]. Este ensaio, conduzido em um

Tabela 5 – Compacidade experimental

Material	K	% sp	ϕ
CP	6,7	0,3	0,636
SA	6,7	4,0	0,438
Q	6,7	0,8	0,680
W	6,7	0,8	0,438
C1	9	—	0,593
C2	9	—	0,594

Tabela 6 – Especificação para um CONADAF

Critério	Valor
Espalhamento	$\geq 600 \text{ mm}$
Viscosidade plástica (μ)	$\leq 200 \text{ Pa.s}$
Volume de agregados	$\geq 30\%$
Resistência à compressão	máxima

misturador de bancada (Figura 7), consiste em adicionar água numa amostra padrão de pós secos até que eles se apresentem sob a forma de uma pasta homogênea com propriedades de fluidez, indicando qualitativamente o preenchimento de todos os vazios com água.

A compacidade experimental dos materiais com dimensão superior a $100 \mu\text{m}$ é determinada pelo protocolo de vibração mais compressão de 10 kPa (índice de compactação $K=9$, Tabela 1). O ensaio, conduzido em um cilindro vazado dotado de um pistão e acoplado a uma mesa vibratória (Figura 8), consiste em aplicar pressão e vibração a uma massa pré-definida de material gerando o máximo empacotamento real da mistura [12]. A altura do pistão é então medida sendo relacionada à compacidade da mistura granular seca.

Os valores experimentais de compacidade, obtidos segundo os procedimentos acima descritos, são apresentados na Tabela 5.

4 Dosagem e produção

4.1 Determinação do traço

Para garantir propriedades de altíssimo desempenho ao CONADAF nos estados fresco e endurecido, foram considerados os seguintes princípios para a elaboração do traço [2]:

- Utilização de agregados de dimensões reduzidas para garantir a homogeneidade macroscópica da mistura granular;
- Otimização da compacidade da mistura granular utilizando as ferramentas apresentadas no item 2;
- Aumento da ductilidade através da adição de reforço fibroso multi-escala, a saber, FA e W;

O traço do CONADAF foi determinado pelo programa MECFOR [1], com a fração volumétrica dos materiais otimizada em função da máxima compacidade proporcionada pelos constituintes da mistura granular para uma resistência à compressão superior a 150 MPa. Na elaboração do traço, foram adotadas as especificações apresentadas na Tabela 6 [6]. A dosagem de dispersante correspondeu ao ponto de saturação da mistura cimentícia. As frações volumétricas das fibras de wollastonita e de aço foram estipuladas em, respectivamente, 2,63% e 2,0%, mantendo-se as propriedades da mistura, no estado fresco, adequadas ao lançamento sem formação de novelos.

Tabela 7 – Traço otimizado para o CONADAF

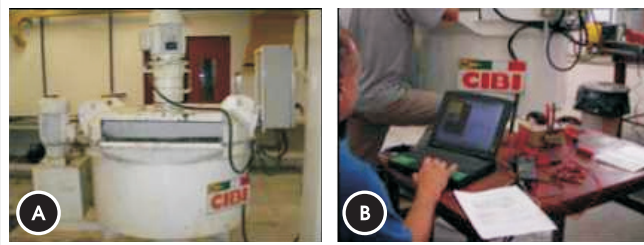
Material	Fração vol.	Consumo (kg/m ³)
CP	0,3381	1011
SA	0,0261	58
Q	0,0301	79
C1	0,0225	60
C2	0,3082	823
W	0,0263	76
FA	0,0200	158
Dispersante	0,0450	50
Água	0,1626	162
Ar aprisionado		3,75
Relação água/cimento		0,19
Relação água/(C+SA)		0,17
Compacidade (ϕ)		0,7555
Compacidade (ϕ^*)		0,7737
Volume de agregados (g)		0,3327
Volume de agregados (g [*])		0,6069
MEP (mm)		0,1292
Viscosidade plástica (μ) (Pa.s)		200
Tensão de cisalhamento (τ_c) (Pa)		434 Pa
Lançamento e adensamento (K [*])		7,475
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)		154,9
Resistência à tração direta (28 dias) (MPa)		8,29
Módulo de elasticidade E _m (28 dias) (GPa)		35,0

O traço otimizado para o CONADAF, assim como algumas propriedades nos estados fresco e endurecido, para o qual foi dosado, são apresentados na Tabela 7.

4.2 Critérios adotados para a mistura

A cinética de transformação de uma mistura cimentícia (materiais secos e água) em uma pasta homogênea é influenciada por três fatores: tipo, força e velocidade do misturador; temperatura do meio ambiente e dos materiais utilizados; e tempo de adição dos líquidos e das fibras à mistura. O misturador deve ser do tipo planetário, pois fornece maior grau de homogeneidade, facilitando a dispersão dos grãos durante a mistura, uma vez que ela se processa com pouquíssima água e materiais com dimensão inferior a 600 μ m. Além disso, a cinética de transformação é fortemente influenciada pelo surgimento de forças nas superfícies das partículas finas ao entrarem em contato com a água. Os materiais, antes de serem colocados no misturador, devem, preferencialmente, permanecer a uma temperatura inferior a 21°C para que, durante a mistura, a tempera-

Figura 9 – Controle de energia do misturador



tura não seja elevada excessivamente, o que favoreceria o fenômeno de dessecação da superfície.

A ordem de adição dos materiais no misturador também é de grande importância. Os líquidos e as fibras de aço devem ser adicionados de acordo com a seqüência apresentada no subitem 4.3.

A operação de mistura deve ser conduzida de tal forma que ocorra uma ótima dispersão dos constituintes, sem que ocorra a elevação excessiva da temperatura da mistura nem a formação de novelos de fibras de aço, comprometendo suas propriedades no estado fresco e endurecido.

4.3 Produção

Para produzir CONADAF são adotadas técnicas diferentes daquelas usadas na produção de concretos convencionais, exigindo cuidados especiais durante a mistura.

O instante de adição dos líquidos e das fibras de aço à mistura, foi monitorado e controlado através do consumo de energia requerida pelo misturador planetário (Figura 9a) para processar a mistura. Este procedimento foi implementado na COPPE/UFRJ por BRANDÃO [8], com objetivo de padronizar o tempo exato de adição dos líquidos e das fibras de aço, assim como o

Figura 10 – Fases da mistura relacionadas ao consumo de energia do misturador



instante do seu término. A potência requerida pelo misturador foi medida por um wattímetro digital, ligado à alimentação do misturador e conectado a um computador (Figura 9b), cujos sinais são processados por um sistema de aquisição de dados e apresentados em tempo real sob forma gráfica.

A Figura 10 indica os momentos em que foram realizadas adições dos líquidos e das fibras de aço na mistura.

Os materiais secos e as microfibras de wollastonita, previamente pesados, foram primeiramente adicionados ao misturador planetário (Figura 11a). Em seguida, o misturador foi ligado deixando a mistura homogeneizar durante 1 minuto, procurando evitar a projeção dos pós para fora do mistura-

Figura 11 – Etapas da mistura do CONADAF



Figura 12 – Ensaio de auto-adensamento

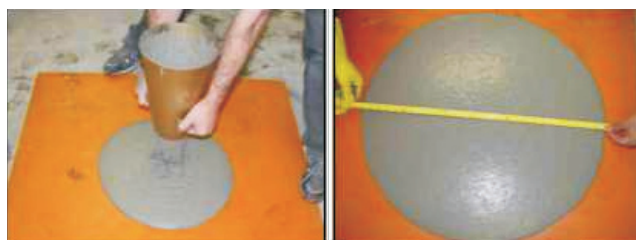


dor (Figura 11b). Na seqüência, os líquidos e as fibras de aço foram adicionados obedecendo a seguinte ordem: (i) metade do dispersante diluído em metade da água de amassamento; (ii) outra metade da água de amassamento; (iii) outra metade do dispersante; (iv) fibras de aço.

Após a seqüência (i), houve a formação dos primeiros aglomerados de partículas (Figura 11b) e, ao passar por este estágio, a mistura apresentou aspecto de "terra úmida" (Figura 11c). A segunda parte da água foi então introduzida (Figura 11d). Neste instante, observou-se claramente o surgimento de aglomerados de partículas com maiores dimensões. Conforme estes aglomerados de partículas aumentavam de tamanho, eles foram quebrados pela pá rotatória do misturador. A água, antes aprisionada em seu interior, começou a ser liberada para a mistura, provocando um aumento acentuado na demanda de energia do misturador. Após o pico na demanda de energia mostrar-se bem definido, a segunda parte do dispersante foi introduzida (Figura 11e). A mistura começou a assumir o aspecto de uma pasta rija atingindo o ponto de reversão (pico de demanda de energia, Figura 10). Após o ponto de reversão (Figura 11f), a mistura tornou-se cada vez mais fluida e, ao formar um platô horizontal (Figura 10), as fibras de aço foram adicionadas continuamente à mistura em movimento (Figura 11g). Deve-se evitar prolongar a mistura além deste ponto para não ocorrer aumento excessivo na temperatura da pasta (ou evaporação local) e ser evitado o risco de acelerar a secagem da superfície ou a dessecação do compósito.

Depois de desligado o misturador, o compósito foi colocado em recipientes (Figura 11h) para ser transportado até os diferentes equipamentos para sua ampla caracteriza-

Figura 13 – Ensaio de abatimento



ção no estado fresco e para ser lançado nos moldes para caracterização no estado endurecido.

5 Ensaios para caracterização do CONADAF

Nos subitens que se seguem são apresentadas brevemente as metodologias dos diversos ensaios realizados para caracterização mecânica do CONADAF.

5.1 Estado fresco

As propriedades no estado fresco foram avaliadas a partir dos ensaios de auto-adensamento utilizando uma caixa em forma de L e espalhamento através do ensaio de tronco de cone invertido.

5.1.1 Auto-adensamento

A verificação ao auto-adensamento foi realizada pelo ensaio de fluxo, utilizando uma caixa de seção retangular na forma de "L" (Figura 12), com seção horizontal e vertical separadas por uma tampa removível. O ensaio consiste em medir o tempo médio de escoamento do compósito através da abertura inferior e verificar seu nivelamento no fundo da caixa.

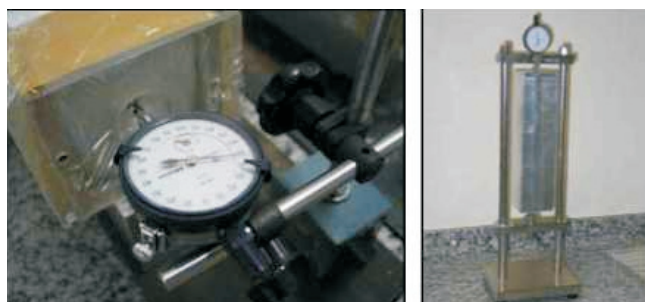
5.1.2 Abatimento

O diâmetro médio de espalhamento do compósito é de-

Figura 14 – Medição da retração autógena



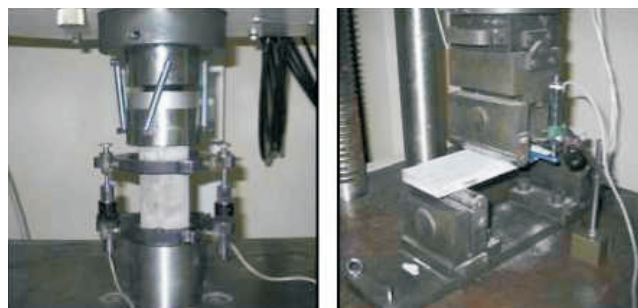
A Monitoramento da variação da temperatura interna



B Dentro do molde

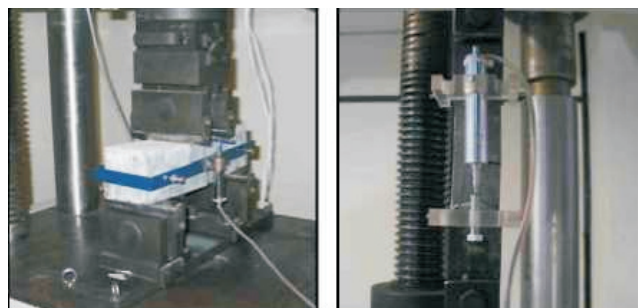
C Fora do molde

Figura 15 – Ensaios realizados para caracterização mecânica do CONADAF



A Compressão

B Flexão em placas



C Flexão em prismas

D Tração direta

terminado através do ensaio de tronco de cone de Marsh, posicionado invertido sobre uma base metálica, conforme mostra a Figura 13.

5.2 Estado endurecido

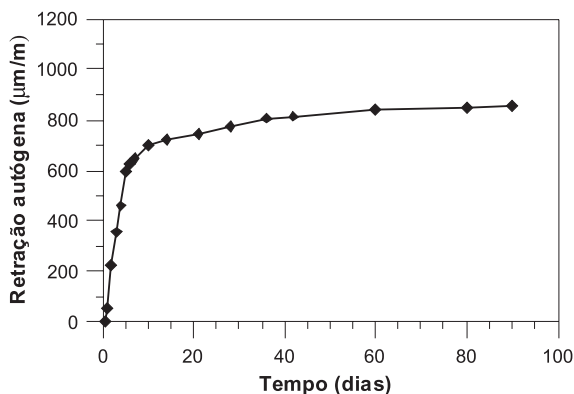
No estado endurecido foram avaliados a retração autógena, o módulo de elasticidade, as resistências à compressão, à tração direta e à flexão.

5.2.1 Retração autógena

A retração autógena foi avaliada através do ensaio de dez elementos prismáticos com dimensões de 71 x 73 x 276 mm. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a metodologia proposta por TAZAWA e EI-ICHI [13]. Para reduzir a fricção entre o compósito e as paredes do molde, foi adicionada uma película de teflon com espessura de 2 mm antes da moldagem. Dois termopares ferro-constantan tipo J foram adicionados aos elementos para controlar a variação na temperatura desde o início do ensaio. A temperatura foi medida continuamente por meio de um sistema de aquisição de dados durante as primeiras 120 horas.

Foram previstos dois pinos em cada extremidade do corpo-de-prova, que ficaram embutidos após a concretagem, servindo de base para a realização das medidas de dimensão longitudinal. Os moldes, após o preenchimento, foram isolados externamente com filme plástico e

Figura 16 – Curva média de retração autóloga



fitas adesivas para evitar qualquer perda de umidade para o ambiente (Figura 14a). Os corpos-de-prova permaneceram em uma sala climatizada a uma umidade relativa de $52 \pm 4\%$ e temperatura de $19,5 \pm 1^\circ\text{C}$ até o término do ensaio.

Dois relógios micrômetros (Figura 14b) foram utilizados para a realização das medições de dimensão longitudinal, enquanto o corpo-de-prova permaneceu dentro do molde (primeiros 5 dias). A primeira leitura foi realizada após 16 horas do fim da moldagem. Após 5 dias de idade, os corpos-de-prova foram removidos dos moldes e selados com fita alumínio, prevenindo a perda de água por evaporação para o ambiente. A partir desta data, a retração autóloga foi medida com o corpo-de-prova encaixado num pórtico vertical, conforme mostra a Figura 14c. A deformação foi lida num intervalo de 60 minutos, durante as primeiras 120 horas e, a cada 12 horas, em idades mais avançadas.

Figura 17 – Curvas típicas do comportamento tensão-deformação sob compressão uniaxial

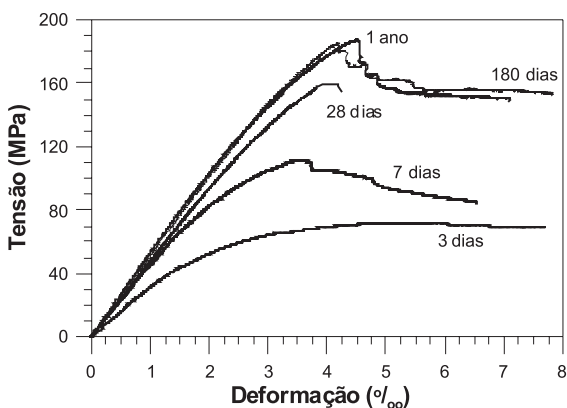
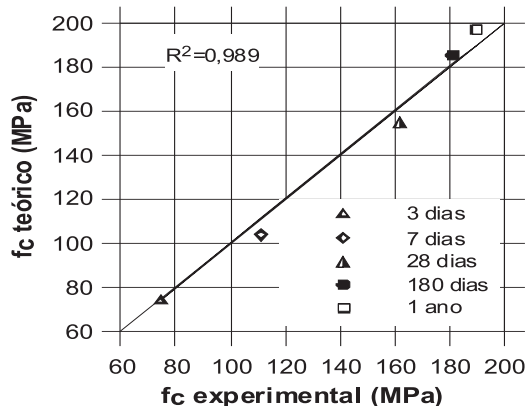


Tabela 8 – Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

Idade (dias)	Número de cps	f_{cm} (MPa)	DP (MPa)	E_m (GPa)	DP (GPa)
3	5	74,3	1,8	35,6	2,2
7	4	111,0	3,8	43,0	1,4
28	4	162,1	3,1	47,7	1,4
180	3	181,3	5,2	51,6	0,9
365	3	190,0	3,0	53,7	0,3

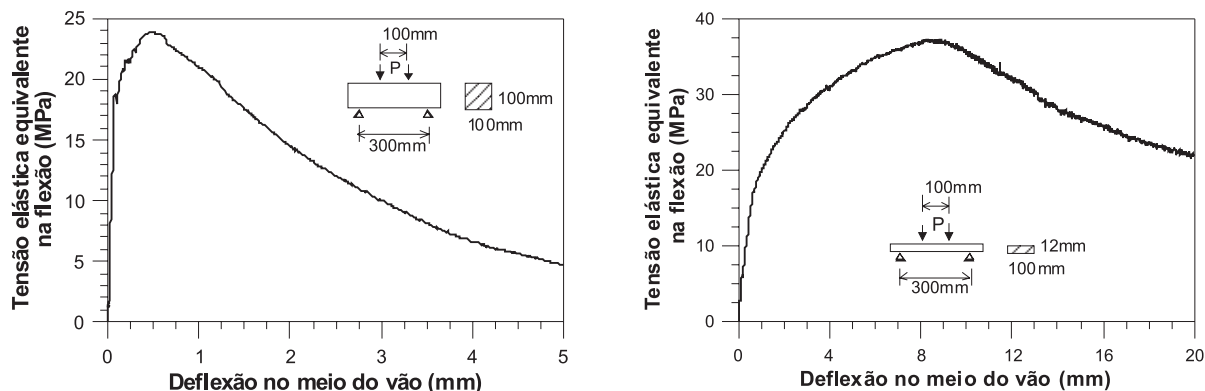
As propriedades avaliadas foram: resistência à compressão e módulo de elasticidade (Figura 7a) através do ensaio de corpos-de-prova cilíndricos (50 x 100 mm); resistência à tração (Figura 7b-c) através do ensaio de flexão em quatro pontos em placas (100 x 20 x 400 mm) e prismas (100 x 100 x 400 mm); e resistência à tração (Figura 7d) através do ensaio de tração direta em placas (12 x 50 x 200 mm). Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina Shimadzu, servo-controlada, com capacidade de carga de 1000 kN. O ensaio de resistência à compressão uniaxial foi executado com controle de deformação axial a uma taxa de 0,005 mm/min. A deformação axial do corpo-de-prova foi lida a partir da média fornecida por dois transdutores elétricos de deslocamento (LVDT), acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo-de-prova. O ensaio de flexão em quatro pontos foi executado com controle do deslocamento do travessão a uma taxa de 0,1 mm/min. A deflexão no meio do vão foi medida por um LVDT preso a um suporte metálico. O ensaio de tração direta também foi executado com controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,1 mm/min. O alongamento foi medido através de dois LVDTs posicionados em lados opostos do corpo-de-prova.

Figura 18 – Comparação teórico versus experimental de resistência à compressão



5.2.2 Resistências e módulo de elasticidade

Figura 19 – Curvas típicas de tensão equivalente elástica na flexão versus deflexão no meio do vão

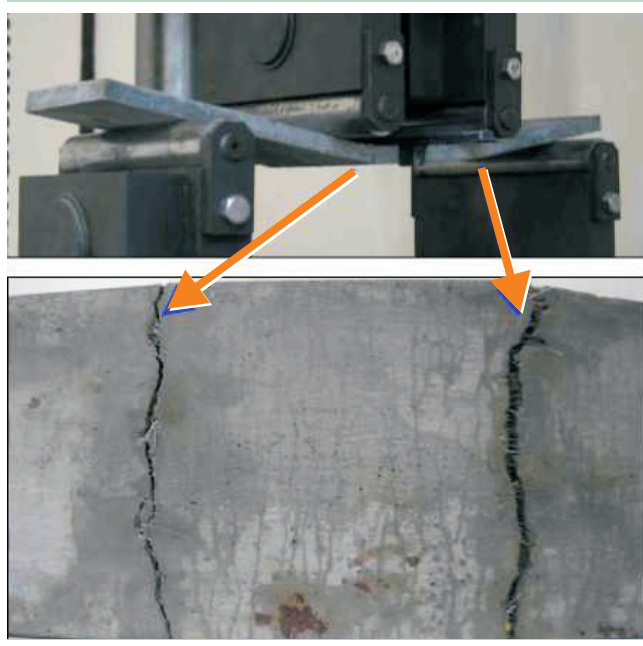


6 Apresentação e análise dos resultados experimentais

6.1 Propriedades no estado fresco

O resultado do ensaio utilizando a caixa em forma de "L" mostrou que o compósito é auto-adensável. O tempo médio de escoamento através da abertura inferior para se auto nivelar no fundo da caixa foi de 30 segundos. Após o ensaio, observou-se que todo o compósito ficou nivelado na parte inferior da caixa. O diâmetro médio de espalhamento do compósito no ensaio de tronco de cone de Marsh foi de 73 cm.

Figura 20 – Múltipla fissuração típica observada na placa na região de máximo momento fletor



6.2 Retração autógena

Os resultados de retração autógena são mostrados na Figura 16, de onde pode-se observar a rapidez do fenômeno nas primeiras idades. Os resultados apresentados correspondem ao valor médio, que teve coeficiente de variação de 10,5%. A perda de massa dos elementos medida durante os ensaios foi menor que 0,08%, indicando que a selagem dos corpos-de-prova foi eficaz.

6.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Curvas típicas do comportamento tensão-deformação sob compressão para diferentes idades (3, 7, 28, 180 e 365 dias) em condições de cura úmida, são mostradas na Figura 17. A Tabela 8 apresenta a média dos resultados experimentais de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Analisando as curvas tensão-deformação, observa-se maior não linearidade nas primeiras idades (3 e 7 dias) do que em idades mais avançadas (28 a 365 dias).

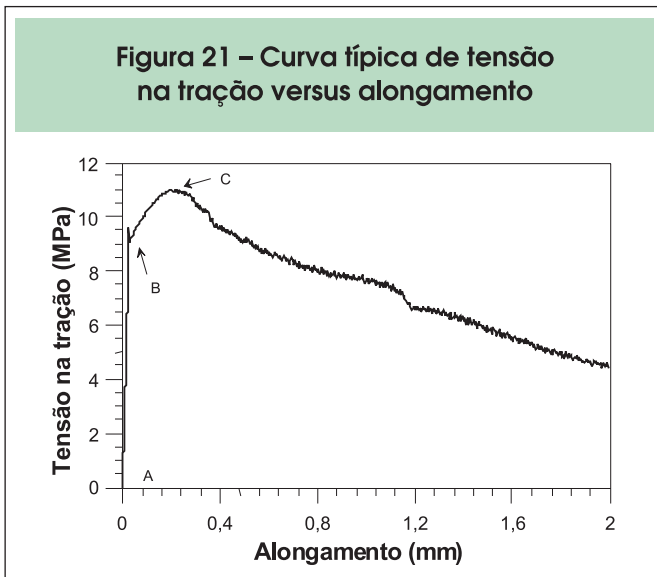
A Figura 18 apresenta um comparativo entre resultados fornecidos pelo MEC e experimentais de resistência à compressão do compósito para as idades de 3, 7, 28, 180 e 365 dias. Para o compósito produzido, o coeficiente de correlação referente à resistência à compressão apresentou o valor de $R^2 = 0,989$ indicando boa precisão do modelo. Em relação ao módulo de elasticidade, o modelo não apresentou boa correlação.

6.4 Ensaio de flexão por quatro pontos

Curvas típicas de tensão equivalente elástica ($\sigma = 6M/bd^2$) de tração na flexão versus deflexão no meio do vão obtidas aos 28 dias para os prismas e para as placas são mostradas na Figura 19.

Ambas as figuras relevam a natureza dúctil do CONADAF. Para os prismas, foi obtida uma tensão média de primeira fissura de 18,2 MPa (com CV de 4,3%) a uma deflexão

Figura 21 – Curva típica de tensão na tração versus alongamento



de aproximadamente 0,08 mm ao passo que a máxima tensão pós-fissuração de 23,0 MPa (com CV de 3,0%) foi obtida a uma deflexão de aproximadamente 0,4 mm. Para as placas, foi obtida uma tensão média de primeira fissura de 17,3 MPa (com CV de 3,3%) a uma deflexão de aproximadamente 0,6 mm ao passo que, a máxima tensão pós-fissuração de 35 MPa (com CV de 9,7%), correspondeu a uma deflexão de aproximadamente 7,9 mm, devido à múltipla fissuração na região de máximo momento fletor (Figura 20). Em ambos os casos, após a carga de pico, ocorreu a localização e o prolongamento de uma fissura principal, podendo ser verificada a ocorrência de um comportamento com amolecimento ("strain-softening") da curva carga-deflexão. Observa-se um efeito escala pronunciado entre os resultados obtidos para o prisma e para a placa, tanto no que se refere à carga última, como no que se refere à ductilidade dos corpos-de-prova ensaiados. Tal efeito está em acordo com experiências previamente realizadas e relatadas na literatura técnica [14].

6.5 Resistência à tração direta

Uma curva típica do comportamento tensão na tração versus alongamento no CONADAF é mostrada na Figura 21. Observa-se uma tensão média de primeira fissura, indicada pelo ponto B, de 10,2 MPa (com CV de 15,1%) correspondendo a um alongamento de 0,026 mm enquanto que, a máxima tensão pós-fissuração (ponto C da Figura 21), de aproximadamente 11,1 MPa (com CV de 7,3%), correspondeu a um alongamento de 0,213 mm. O alongamento na máxima tensão é 8 vezes maior que aquele observado na primeira fissura. A partir do ponto C, devido à localização de uma fissura principal, foi observado um comportamento com amolecimento ("strain-softening"). Vale a pena mencionar que, mesmo com um alongamento tão elevado como 0,4-0,5 mm (15-20 vezes o alongamento de primeira fissura), o CONADAF ainda resistiu a esforços equivalentes ao de formação da primeira fissura.

A forma de ruptura e a distribuição interna das fibras de aço na matriz na região de ruptura dos elementos ensaiados, são mostradas na Figura 22. Observa-se uma distribuição homogênea ao longo da seção transversal. Os resultados experimentais de resistência à tração superestimaram os resultados previstos pelo modelo em cerca de 23%.

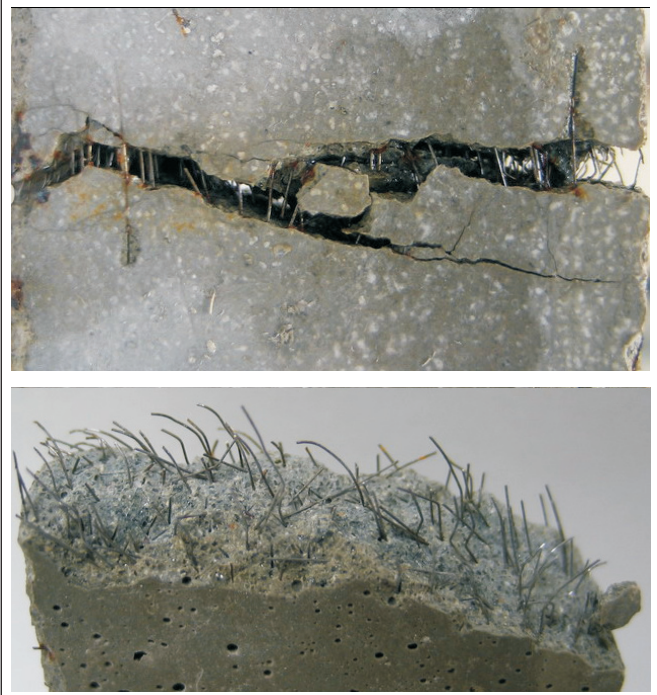
7 Conclusões

O presente artigo apresentou a dosagem, produção e caracterização mecânica de um compósito cimentício auto-adensável, de altíssimo desempenho, armado com fibras, aqui denominado CONADAF.

Para a dosagem, foi utilizado um modelo desenvolvido dentro de um quadro científico teórico e experimental, que permite calcular com precisão a compacidade de uma mistura granular. O modelo daí derivado, denominado de Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), pode ser implementado computacionalmente, permitindo a realização de procedimentos de otimização da mistura. O MEC também permite que sejam correlacionadas propriedades do empacotamento de partículas com propriedades do compósito nos estados fresco e endurecido.

Sendo assim, em vista dos resultados apresentados, pode-se concluir que o MEC demonstrou ser operacional e preciso, tendo permitido dosar um material de altíssimo desempenho.

Figura 22 – Forma de ruptura e distribuição interna das fibras



8 Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS, à CAPES e ao CNPq por verbas e bolsas de estudo para o desenvolvimento da presente pesquisa.

9 Referências bibliográficas

- [01] Formagini, S., Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005, 284 p.
- [02] Richard, P and Cheyrezy, M., Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, N° 7, 1995, p. 1501-1511.
- [03] Orange, G., Dugat, J. and Acker, P., Ductal: New Ultra High Performance Concretes. Damage Resistance and Micromechanical Analysis. Fifth RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, September 2000, p. 781-790.
- [04] Formagini, S., Toledo-Filho, R. D., Fairbairn, E. M. R., Mix design and mechanical characterization of an ultra high performance fiber reinforced cement composites (UHPRCC), in International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, Honolulu, USA, (RILEM, 2005).
- [05] de Larrard, F., Formulation et Propriétés des Bétons à Très Hautes Performances. Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC N° 149, March 1988, Paris.
- [06] de Larrard, F., Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, E&FN SPON, London, 1999, 448 p.
- [07] Sedran, T., Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants. Doctoral Thesis of Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1999, 220 p.
- [08] Brandão, J. H., Projeto, Análise Experimental e Numérica de Cascas de Concretos de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005, 144 p.
- [09] NBR NM 23, Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação de Massa Específica. ABNT. Março, 2001.
- [10] NBR 9776, Agregados - Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman. ABNT, Março, 1987.
- [11] Aïtcin, P. C., High-Performance Concrete. E&FN SPON, Thomas Telford, London, 1998, 591 p.
- [12] Silva, A. S. M., Dosagem De Concreto Pelos Métodos De Empacotamento Compressível E Aïtcin-Faury Modificado. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004, 152 p.
- [13] Tazawa, Ei-Ichi, Autogenous Shrinkage of Concrete. E & FN Spon, London, 1999, 424 p.
- [14] Bazant, Zdenek P. and Planas, Jaime. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. CRC Press, 1997, New York, 640 p.