

# CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA COM BAIXO CONSUMO DE AGLOMERANTES E ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIAMIDA OU LÃ-DE-ROCHA

Tobias Azevedo da Costa Pereira<sup>1</sup> & Jefferson Benedicto Libardi Liborio<sup>2</sup>

## Resumo

*Este trabalho apresenta concretos auto-adensáveis de alta resistência e com baixo consumo de aglomerantes, 5,1 kg por cada MPa de resistência à compressão obtido aos 28 dias. Para isso foram pesquisados métodos de empacotamento de partículas e estudada a dispersão dos materiais cimentícios através da ação do aditivo superplastificante. Também foram incorporadas fibras. A poliamida foi adicionada com o intuito de controlar o lascamento explosivo em temperaturas elevadas. A lã-de-rocha foi pesquisada porque se trata de um resíduo e os ensaios de resistência à abrasão indicaram uma boa aplicação para este tipo de fibra. Obteve-se um concreto estrutural auto-adensável com consumo de cimento de 325 kg/m<sup>3</sup> e 33 kg/m<sup>3</sup> de sílica amorfa, de alta resistência à compressão ( $f_{c28} = 71$  MPa) e alto módulo de elasticidade ( $E_{c28} = 43$  GPa). A absorção por imersão aos 91 dias foi igual a 1,3%, onde concretos com absorção inferior a 4,2% são considerados duráveis.*

*Palavras-chave: Concreto auto-adensável. Alta Resistência. Consumo de Aglomerantes. Poliamida. Lã-de-Rocha.*

## HIGH STRENGTH SELF-CONSOLIDATING CONCRETE WITH LOW BINDER CONTENT AND ADDITION OF POLYAMIDE OR ROCK WOOL FIBERS

### Abstract

*This work shows a high strength self-consolidating concrete with low binders content, 5,1 kg for each MPa of compressive strength at day 28. To achieve this condition, packing particles methods and binders dispersion by action of superplasticizers were researched. Fibres were added, the polyamide to control the explosive spalling and the rock wool fibers to study the viability to include a material that is a residue and the high abrasion resistance shows that this kind of fibre can be useful to pavement concrete. The self-consolidating concrete designed had low binders content, cement = 325 kg/m<sup>3</sup> and amorphous silica = 33 kg/m<sup>3</sup>. The tests showed low water absorption (1,3%), high average compressive strength (71 MPa at day 28) and high static modulus of elasticity (43 GPa at day 28).*

*Keywords: Self-consolidating concrete. High strength. Binder content. Polyamide. Rock Wool Fibers.*

## 1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas e a resistência ao ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto dependem do sistema de poros desse material. A dependência da resistência com a porosidade foi considerada desde os primórdios da tecnologia dos concretos estruturais conforme as equações estabelecidas por Ferret em 1896 e Abrams em 1919, que podem ser consultadas em NEVILLE, 1997. Da mesma forma, os clássicos estudos de POWERS et. al., 1959, relacionaram a porosidade capilar com a permeabilidade de pastas de cimento.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, tobiasacp@gmail.com

<sup>2</sup> Professor e Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento da EESC-USP, liborioj@sc.usp.br

Usualmente a porosidade é reduzida apenas através da redução da relação a/c, entretanto, este procedimento implica no aumento do consumo de cimento Portland, o que implica em maior calor de hidratação gerado e maior emissão de CO<sub>2</sub>, dado que, conforme MEHTA, 2009, para produzir 1 t de clínquer gera-se cerca de 1 t de CO<sub>2</sub>.

Para reduzir o consumo de clínquer, MEHTA, 2009, elenca diversas ações como a diminuição do consumo de concreto através da otimização dos projetos e do uso do concreto de alta durabilidade; redução do consumo de aglomerantes através do uso intensivo de aditivo superplastificante e das adições minerais em substituição do cimento Portland e redução do volume de pasta através de distribuição granulométrica dos agregados que propicie maior compacidade desses materiais.

A eficácia na obtenção desses concretos, cuja graduação dos agregados visa aumentar a compacidade, foi demonstrada por MELO e LIBORIO, 1995 e SILVA, V.M., 2002, que observaram, respectivamente, maior resistência ao ataque por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e menores profundidades de carbonatação.

O uso intensivo de aditivos superplastificantes combinado com a graduação adequada dos agregados, como citado acima, para obtenção de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento Portland, foi adotado por TIBONI, 2007, que produziu um concreto com abatimento igual a 120 mm, resistência à compressão igual a 58 MPa aos 28 dias, consumo de 269 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland e 47,5 kg/m<sup>3</sup> de cinza da casca do arroz.

Da mesma forma, LIBORIO et al., 2009, obtiveram um concreto auto-adensável (CAA), *slump-flow* igual a 665 mm, resistência à compressão igual a 59 MPa aos 28 dias e consumo de aglomerantes (cimento Portland e sílica ativa) igual a 319 kg/m<sup>3</sup>. Também CASTRO, LIBORIO e PANDOLFELLI, 2009, desenvolveram, a partir de conceitos de empacotamento e dispersão de partículas e com utilização de método computacional, um concreto com relação água/cimento = 0,76, água/aglomerante = 0,38 e água/sólidos = 0,23. Este concreto com 14,4 kg/m<sup>3</sup> de aditivo superplastificante, 205 kg/m<sup>3</sup> de cimento CP V ARI, 205 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa e 254 kg/m<sup>3</sup> de pó de quartzo, atingiu cerca de 115 MPa aos 28 dias.

BRETON, 1996, desenvolveu um concreto denominado de LHHPC (*Low-heat high performance concrete*) com relação água/cimento=0,95, onde o consumo total dos aglomerantes foi de apenas 194 kg/m<sup>3</sup> (97 kg/m<sup>3</sup> de Cimento Portland tipo V ASTM e 97 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa). Este concreto continha 193,8 kg/m<sup>3</sup> de pó de quartzo com Ø<50µm e 10,3 kg/m<sup>3</sup> de aditivo superplastificante. Obteve-se consistência de 170 mm. Ocorreu forte retardo do início de hidratação e a resistência à compressão foi ensaiada apenas após o 3º dia, onde se obteve 20 MPa que evoluiu para 87 MPa aos 28 dias e 105 MPa aos 90 dias. Para a resistência final os resultados correspondem a uma relação de 0,92 kg de cimento e 1,85 kg de aglomerantes para cada MPa obtido.

Esse exemplo extremo do LHHPC traz duas informações importantes: ao introduzir um fíler que preencha os espaços vazios da pasta é possível produzir concretos de alta resistência mesmo com relações água/cimento altas; esses concretos com alto teor de sólidos precisam de altas dosagens de aditivos superplastificantes, o que combinado ao baixo consumo de cimento Portland, apresentam resistências muito baixas nos primeiros dias.

Devido à importância da compacidade, que permite obter os concretos citados acima, é interessante observar alguns modelos matemáticos que expressam a distribuição granulométrica de um material granular através da percentagem de partículas menores do que determinado tamanho. Conforme notação de OLIVEIRA et. al., 2000, define-se: D<sub>p</sub> - diâmetro da partícula; D<sub>L</sub> - diâmetro da maior partícula; D<sub>S</sub> - diâmetro da menor partícula; CPFT - porcentagem de partículas menores do que D<sub>p</sub> ou porcentagem passante em determinada peneira; q - módulo ou coeficiente de distribuição de partículas. A Eq. (1) abaixo é conhecida como modelo de Alfred.

$$CPFT = \frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} 100 \quad (1)$$

Com a distribuição para  $q = 0,37$  e  $D_s$  nulo se consegue a máxima densidade essa distribuição teórica é conhecida como de Andreassen, OLIVEIRA et. al., 2000. É possível construir uma distribuição granulométrica a mais próxima possível de uma determinada distribuição a partir dos agregados disponíveis. Obtida a granulometria de cada agregado, a granulometria da mistura é resultante da média ponderada das distribuições, onde os fatores de multiplicação são os percentuais em volume de cada material na mistura. O método dos mínimos quadrados pode então ser utilizado para verificar a mistura que menos se distancie da mistura ideal. Essa distância é medida pela soma dos quadrados dos desvios em cada peneira. Ainda que seja possível resolver esse problema analiticamente, como descrito por PETRUCCI, 1981, um processo numérico é mais simples. Com a facilidade das planilhas eletrônicas, que tem recursos de otimização, pode-se encontrar a melhor mistura que minimize esse desvio.

Para  $n$  peneiras ou diâmetros e  $m$  agregados, define-se:  $pe_i$  – porcentagem retida acumulada especificada para a peneira “i”;  $pa_{j,i}$  – porcentagem retida acumulada na peneira “i” para o agregado  $a_j$ ;  $pc_i$  – porcentagem retida acumulada na peneira “i” para uma combinação de agregados ;  $\Delta_i$  – desvio da mistura em relação à especificação na peneira “i”;  $\beta_j$  – percentual do agregado  $a_j$  na combinação; DM – desvio máximo, soma dos quadrados dos desvios individuais. Onde:  $i$  varia de 1 a  $n$  e  $j$  varia de 1 a  $m$ . A Eq. (2) e a Tabela 1 complementam as informações necessárias.

$$pc_i = \sum_{j=1}^m \beta_j pa_{j,i} \quad (2)$$

Tabela 1 – Planilha eletrônica para otimizar a mistura de agregados

$\Phi$	pe (%)	pa <sub>1</sub> (%)	pa <sub>2</sub> (%)	...	pa <sub>m</sub> (%)	pc (%)	$\Delta$
$\Phi_1$	pe <sub>1</sub>	pa <sub>1,1</sub>	pa <sub>2,1</sub>	...	pa <sub>m,1</sub>	pc <sub>1</sub>	$\Delta_1 = pc_1 - pe_1$
$\Phi_2$	pe <sub>2</sub>	pa <sub>1,2</sub>	pa <sub>2,2</sub>	...	pa <sub>m,2</sub>	pc <sub>2</sub>	$\Delta_2 = pc_2 - pe_2$
...	...	...	...	...	...	...	...
$\Phi_n$	pe <sub>n</sub>	pa <sub>1,n</sub>	pa <sub>2,n</sub>	...	pa <sub>m,n</sub>	pc <sub>n</sub>	$\Delta_n = pc_n - pe_n$
DM =							$\sum \Delta_i^2$

A otimização consiste em variar os coeficientes  $\beta_j$  até encontrar o menor valor de DM.

Outra possibilidade para obtenção de uma curva granulométrica visando a minimização dos vazios consiste no método das misturas sucessivas. Onde certa composição de agregados é misturada e através da massa unitária compactada da mistura e da massa específica de cada agregado é possível o cálculo do teor de vazios. Aquela mistura que obtiver menor teor de vazios é a escolhida. Normalmente parte-se do agregado de maior dimensão que é misturado com o agregado de diâmetro intermediário, obtendo-se a melhor mistura entre esses dois materiais. Essa mistura resulta em um “novo agregado” que é combinado com o agregado subsequente, onde o processo se repete até que se obtenha a mistura final com o agregado de menor dimensão. Este procedimento é largamente utilizado no LMABC (Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento do Departamento de Estruturas da EESC) e é indicado por diversos autores tanto para concretos convencionais como auto-adensáveis, como exemplo, Tutikian e Dal Molin, 2008.

Uma importante característica desses concretos densos é a desconexão dos poros, característica esta que é perseguida na dosagem. Entretanto, esses concretos têm alta probabilidade de sofrer o lascamento explosivo (explosive spalling) quando submetidos às altas temperaturas em situações de incêndio, AITCIN, 2000. Sendo considerado por BENTZ, 2000, como o calcanhar de Aquiles do concreto de alto desempenho. Uma medida para minimizar este risco é a adoção de fibras poliméricas. Para isso é mais comum que se utilize a fibra de polipropileno, EUROCODE 2, Part 1.2, 2004.

A utilização da fibra de poliamida tem sido pouco citada em pesquisas, onde uma justificativa pode ser o seu ponto de fusão que é de 260°C, enquanto que a de polipropileno se funde em torno dos 170°C, portanto, a última seria mais apropriada para inibir o lascamento explosivo do concreto em

altas temperaturas. Quanto à influência nas propriedades mecânicas, SONG et al., 2005, fizeram um estudo comparativo entre a fibra de poliamida (*nylon*) com a de polipropileno em concretos com consumo de fibra igual a 600 g/m<sup>3</sup>. Concluíram que a de poliamida foi mais eficiente em relação à de polipropileno, aumento de até 6,7% na resistência à compressão, e atribuíram isto à maior resistência à tração do material e à melhor dispersão na massa do concreto fresco. Obtiveram ainda que o concreto com fibra de poliamida aumentou a resistência à compressão do concreto em 12,4% em comparação ao concreto sem fibra, mas como os concretos tinham resistência da ordem de 25 MPa, essa informação não serve como base de comparação aos concretos de alta resistência.

Não se encontrou na revisão bibliográfica desta pesquisa qualquer referência à adição de aparas de lâ-de-rocha em concretos estruturais.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi a obtenção de concretos auto-adensáveis, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com indicativos de durabilidade que atendam às classes de agressividade ambiental indicadas na NBR 6118. O concreto auto-adensável (CAA), por prescindir dos vibradores, podem ser considerados como uma evolução na tecnologia dos concretos estruturais e deve ter seu uso intensificado no futuro. De forma a tornar esse concreto versátil, ampliando o seu campo de aplicação, propôs-se a investigação da viabilidade do uso das aparas de lâ de rocha e das fibras de poliamida. Estas fibras, dependendo do teor adicionado, influenciam o comportamento frente à ação das altas temperaturas, a resistência à abrasão, as propriedades mecânicas e a reologia do concreto.

## 2 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo da pesquisa foi adotada a seguinte rotina de trabalho:

- a) escolha do tipo de cimento Portland e dos materiais cimentícios considerando as experiências anteriores do LMABC e critérios de empacotamento de partículas, custo e reologia;
- b) estudo do aditivo superplastificante de terceira geração, à base de éster-policarboxílico, através de ensaios de compatibilidade deste com o cimento Portland pelo método de Kantro;
- c) escolha e caracterização do agregado miúdo e do graúdo, adotando ao menos três tipos de areias de origem quartzosa da região de São Carlos-SP e dois tipos de agregados graúdos de origem basáltica;
- d) estudo, a partir de medidas da massa unitária compactada das diversas misturas, da composição dos agregados graúdos e miúdos que resulte na máxima densidade de empacotamento;
- e) estudo de concreto auto-adensável sem fibras com  $f_{c28}$  superior a 65 MPa e slump-flow maior do que 650 mm. Deve também atender aos demais limites definidos na literatura para os outros ensaios de caracterização do concreto fresco, como anel "J", caixa "L", funil "V", coluna de segregação e tubo "U";
- f) realização de ensaios de caracterização mecânica (resistência à compressão, tração por compressão diametral e por flexão, módulo de elasticidade) do concreto sem fibras. Uma vez comprovada a eficiência mecânica do concreto, adotá-lo como matriz para estudo dos concretos com fibra;
- g) estudo da máxima integração de fibras de poliamida e de lâ-de-rocha sem perda do auto-adensamento do concreto;
- h) realização dos ensaios de caracterização mecânica dos concretos com fibra;
- i) estudo da resistência à abrasão nos diversos tipos de concreto;
- j) estudo da absorção dos concretos por imersão e por capilaridade;

- k) verificação da possibilidade de lascamento explosivo dos concretos produzidos, através de ensaios de corpos de prova submetidos às altas temperaturas.

O comportamento do concreto em alta temperatura foi um objetivo secundário para subsidiar futuras pesquisas. Fez-se apenas uma investigação preliminar com intuito de obter informações iniciais sobre concretos com baixo consumo de cimento Portland nesta situação. A confirmação da possibilidade do lascamento explosivo no concreto pesquisado reforça a associação desse fenômeno à estrutura densa do concreto, mesmo quando se adota consumo reduzido de cimento Portland. As perdas das propriedades mecânicas após o aquecimento também foram pesquisadas.

Apesar das aparas de lâ-de-rocha, pela sua natureza, tenham potencial para influenciar as propriedades de condutividade térmica do concreto, este aspecto não foi abordado nesta pesquisa, que se resumiu a verificar a viabilidade da sua adição ao concreto e os efeitos nas propriedades associadas aos ensaios de caracterização determinados.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Estudo dos aglomerantes

Adotou-se o cimento Portland ARI RS (massa específica, 3,08 g/cm<sup>3</sup>; área superficial específica (BET), 4.633 cm<sup>2</sup>, conforme fabricante), que é um cimento de alta resistência inicial e contém cerca de 30% de escória na sua composição, portanto com menor teor de clínquer. Em concretos com baixo consumo de cimento Portland é interessante que esse cimento seja fino e, portanto, se hidrate rapidamente de forma que o refinamento de poros seja antecipado. Adotou-se um teor de até 10% em adição à massa de cimento Portland, em consonância com diversas outras pesquisas, MELO, 2000, I.J., SILVA, 2000, F.G., SILVA, 2006 e CASTRO, 2007, desenvolvidas no LMABC. Não só a escolha do cimento Portland, mas o sistema cimentício formado pelo clínquer+sílica ativa+escória de alto forno foi apoiado nestes estudos que envolveram o efeito da cura térmica, características mecânicas e de durabilidade, reologia e também a microestrutura das pastas, argamassas e concretos. Também foi considerado que o custo da sílica ativa é cerca de duas vezes maior do que o cimento Portland, portanto um maior consumo desse material tem que levar esse aspecto em conta em uma análise de custo-benefício.

Entretanto, com intuito de melhorar a distribuição do tamanho de partículas, parte da sílica ativa (massa específica = 2,20 kg/dm<sup>3</sup>; área específica entre 15.000 e 30.000 m<sup>2</sup>/kg (BET), conforme fabricante) foi substituída por metacaulinita (massa específica = 2,60 kg/dm<sup>3</sup>; área específica = 30.000 m<sup>2</sup>/kg (BET), conforme fabricante) que é uma superpozolana mais fina. Esta decisão foi apoiada em ensaios que indicaram a mistura entre esses materiais que resultava na maior resistência à compressão em argamassas onde, entre as diversas misturas, a única alteração foi a composição relativa entre a sílica ativa e a metacaulinita, Figura 1.

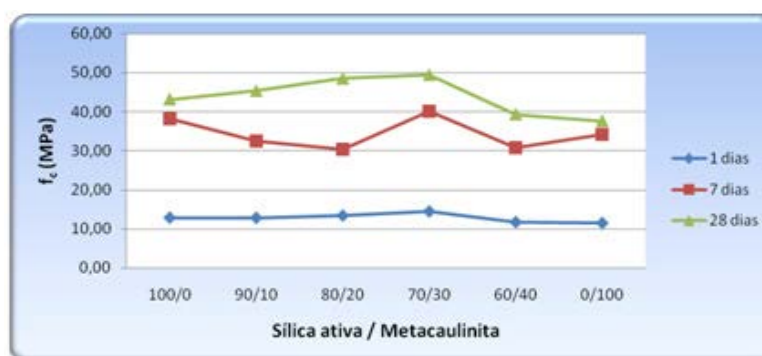


Figura 1 – Resistência à compressão de argamassas para diversas misturas de sílica ativa e metacaulinita. (PEREIRA, 2010).

### 3.2 Estudo do aditivo superplastificante

Adotou-se um aditivo policarboxílico (densidade de 1,1 g/cm<sup>3</sup> e teor de sólidos igual a 30%, conforme fabricante) que combina o efeito estérico e eletrostático para dispersar as partículas de cimento Portland.

Consideraram-se dois aspectos na determinação do teor de aditivo superplastificante: o ponto de saturação, que seria aquela dosagem a partir da qual o acréscimo de mais aditivo não influencia de forma significativa na fluidez da pasta com relação  $a/c=0,35$ , medida através do ensaio de mini-abatimento (Ensaio de Kantro, descrito em BUCHER, 1988), e o efeito do aditivo no retardamento do tempo de pega da pasta, onde dosagens altas podem provocar atrasos significativos, caso do LHHPC.

O ensaio de Kantro consiste em preencher o interior de um tronco de cone com a pasta a ser estudada e verificar o diâmetro médio de espalhamento do fluido ao levantar o molde. Variando-se o teor do aditivo superplastificante se obtém o ponto de saturação.

Como pode ser constatado na Figura 2, as pastas ensaiadas apresentam pequenas variações no espalhamento para teores de aditivo entre 1,5% e 2%, entretanto, após esse intervalo, não há um limite claro do ponto de saturação com espalhamento crescente. Dessa forma, foram moldados corpos de prova com teores de 1,7% e 2,5% de aditivo respectivamente, para verificar a possibilidade de retardamento de pega, o que ocorreu com os concretos com 2,5%, onde somente foi possível desmoldar os corpos de prova com 36 horas. Diante desse resultado, fixou-se o teor de aditivo em 1,7%.

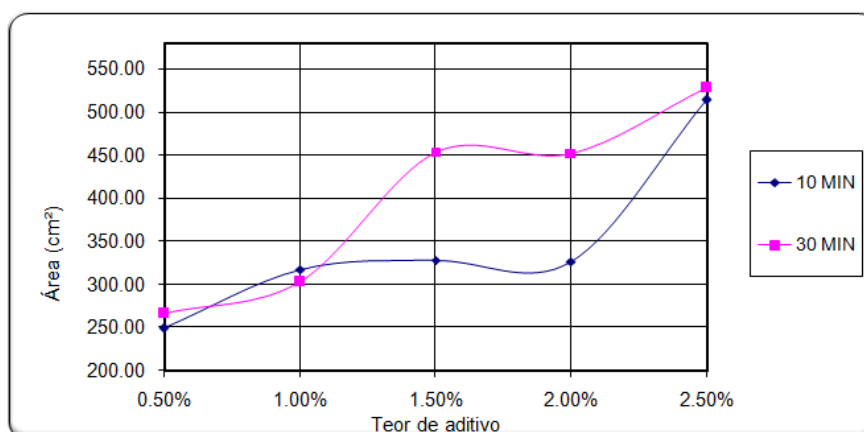


Figura 2 – Variação da área média de espalhamento em função do teor de aditivo, ensaio de Kantro.

### 3.3 Estudo dos agregados

Estudou-se a seleção e composição dos agregados finos que propiciasse o mínimo teor de vazios.

Os agregados graúdos têm origem basáltica obtidos em pedreira localizada em Ribeirão Preto-SP. As areias são quartzosas, obtidos em cavas, todas da região de São Carlos – SP.

O agregado denominado de SM500 é um fíler quartzoso, oriundo de processo industrial em mineradora, tem teor de material retido na malha 500 igual a 0,7 %, portanto, mais fino do que o cimento Portland utilizado e, embora seja um componente da pasta, foi considerado na composição dos agregados.

A Figura 3 ilustra os materiais granulares, agregados e aglomerantes, pesquisados.





Figura 3 – Materiais granulares pesquisados.

Uma dificuldade do método das misturas sucessivas, quando se tem mais do que dois agregados, reside no fato de não ser possível excluir agregados de tamanhos intermediários. Nesse caso, diante da grande quantidade de agregados, utilizou-se uma rotina computacional, como descrito na introdução, que indicou a mistura de agregados que mais se aproximou da curva teórica com  $q=0,37$  na Eq. (1), o que possibilitou excluir as areias AR-02, com diâmetro máximo de 2,4mm e AR-03 com 0,6mm, sinalizando que é possível obter curva granulométrica da mistura próxima da teórica sem a inclusão dessas areias intermediárias.

A Figura 4 ilustra uma das simulações com a planilha eletrônica utilizada na análise. No exemplo, apenas dois materiais foram selecionados, AR-04 e SM-500. Ao limitar o valor de  $D_L$  em 2,4 mm e 1,2 mm, mais coerente com os materiais existentes, também a areia AR-01 foi selecionada.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1													
2		Diâmetro (mm)	Meta	AR-01	AR-02	AR-03	AR-04	SM500	Mistura	d <sup>2</sup>			
3		0,0010	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	96,653%	99,60%	0,0000			
4		0,0015	99,26%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	90,266%	98,84%	0,0000			
5		0,0025	98,17%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	78,458%	97,43%	0,0001			
6		0,0035	97,32%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	67,868%	96,17%	0,0001			
7		0,0045	96,62%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	58,413%	95,04%	0,0002			
8		0,0060	95,73%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	46,184%	93,59%	0,0005			
9		0,0100	93,89%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	23,219%	90,85%	0,0009			
10		0,0180	91,31%	99,70%	100,00%	100,00%	100,00%	7,224%	88,95%	0,0006			
11		0,038	87,09%	99,48%	100,00%	100,00%	100,00%	4,977%	88,68%	0,0003		D <sub>1</sub>	4,800
12		0,045	85,97%	98,04%	99,96%	100,00%	100,00%	2,905%	88,43%	0,0006		D <sub>2</sub>	0,001
13		0,075	82,10%	69,70%	98,86%	99,42%	99,60%	0,00%	87,73%	0,0032		q	0,37
14		0,15	75,54%	30,16%	89,20%	95,50%	96,62%	0,00%	85,11%	0,0091			
15		0,3	67,06%	0,46%	24,48%	70,54%	76,68%	0,00%	67,54%	0,0000			
16		0,6	56,11%	0,02%	0,26%	24,42%	36,14%	0,00%	31,83%	0,0589			
17		1,2	41,95%	0,00%	0,10%	6,34%	8,96%	0,00%	7,89%	0,1160			
18		2,4	23,65%	0,00%	0,04%	1,42%	1,68%	0,00%	1,48%	0,0491			
19		4,8	0,00%	0,00%	0,00%	0,28%	0,28%	0,00%	0,25%	0,0000			
20		6,3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	0,00%	0,05%	0,0000			
23									DM	0,2397			
24													
25		MF	2,64	0,31	1,14	1,99	2,20	0,00	1,94				
26		$\phi_{m\acute{a}x}$ (mm)	4,800	0,300	0,600	2,400	2,400	0,038	2,400				
27		Teor de finos(%)	17,90%	30,30%	1,14%	0,58%	0,40%	100,00%	12,27%				
28		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	26,60	26,50	26,40	26,30	26,50	26,32				
29													
34		AR-01	AR-02	AR-03	AR-04	SM500	Total						
35		0,000%	0,000%	0,000%	88,085%	11,915%	100,000%						
36													

Figura 4 – Planilha eletrônica para obtenção da combinação dos agregados para obter o menor desvio da curva de Alfred com  $q=0,37$  e  $D_L=4,8$ .

Com os agregados remanescentes pesquisou-se a mistura que resultasse no menor índice de vazios através de ensaios de medida da massa unitária compactada, conforme o método tradicional das misturas sucessivas. A composição dos agregados finos resultou na seguinte proporção em massa: 75,72% da AR-04, 16,78% da AR-01 e 7,5% do SM500.

A composição dos agregados graúdos indicou um teor de vazios similar entre as proporções de 60% a 70% de britas e 40% a 30% de pedrisco. Onde se optou pelo consumo de pedrisco com

40% da massa dos agregados graúdos de forma a minimizar o risco de bloqueio pela formação de arcos dos agregados, que são mais suscetíveis de se formar no CAA.

### 3.4 Estudo da argamassa auto-adensável

Dos estudos prévios, foram definidos: tipo de cimento Portland e proporção de sílica ativa e metacaulinita em relação à massa de cimento Portland, portanto, a composição dos aglomerantes foi fixada; tipo e teor de aditivo superplastificante, também em relação à massa de cimento Portland; composição dos agregados finos; composição dos agregados graúdos;

Dos materiais já estabelecidos, falta apenas determinar o consumo de água e de agregado fino para obter a argamassa.

Nesse passo, estabelece-se a relação entre a massa dos agregados finos com a massa de cimento, denominada de  $m_a$  para diferenciar da relação entre a massa de todos os agregados em relação à massa de cimento, relação chamada de  $m$  conforme notação utilizada no método de dosagem do IPT-EPUSP para o concreto convencional (CCV).

Como o objetivo do trabalho foi obter um CAA com baixo consumo de aglomerantes, fixou-se para a argamassa um  $m_a$  igual a 3,2. Este valor foi adotado de forma que o consumo de cimento Portland do concreto fosse próximo aos 350 kg/m<sup>3</sup> estabelecidos previamente, através de cálculo prévio aproximado desse consumo conforme a lei de Molinari indicada em HELENE e TERZIAN, 1992. Para isso, admitiu-se que o teor de britas estava limitado ao intervalo entre 25% a 35%, que são valores usuais para o CAA conforme EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005. Esses dados equivalem a adotar um  $m$  em torno de 6 para o concreto.

Para determinação do teor de água, dado que todos os outros materiais componentes da argamassa foram selecionados e proporcionados, estabeleceu-se o critério de que o teor de água seria o mínimo necessário para permitir que a argamassa tivesse um aspecto fluido e fluxo contínuo através do cone de Marsh, capacidade de 2 L e abertura inferior de 12,5 mm.

A partir do ensaio no cone de Marsh, obteve-se a relação água/cimento de 0,55 e a argamassa auto-adensável e densa, proposta por LIBORIO que considerou que o concreto auto-adensável proposto seria resultante da obtenção de uma argamassa densa e auto-adensável, a qual, posteriormente, seriam adicionados os agregados graúdos limitados a um teor que não “travasse” o concreto, o que poderia ser constatado nos ensaios tradicionais de caracterização do CAA no estado fresco.

### 3.5 Estudo dos concretos

Como explanado, adicionam-se os agregados graúdos à argamassa para obter o concreto, onde deve ser procurada a máxima quantidade possível que atenda às condições de fluidez, segregação e habilidade passante.

Inicia-se a verificação do teor máximo de agregados, realizando os testes mais simples como slump-flow e caixa “L” ou anel “J”. Repete-se o processo sucessivamente, para diversos teores de brita, até encontrar o ponto ótimo.

Desse estudo, obteve-se o máximo teor de agregados graúdos para obter um CAA com slump-flow da ordem de 75 cm, o que correspondeu a 30% do volume do concreto. O concreto resultante denominado de C1 foi considerado como concreto de referência e serviu como matriz para os concretos com fibra.

Nesta pesquisa foram estudados concretos com dois tipos de fibra, a de poliamida que correspondeu ao concreto C2 (fibra de 21 mm) e a lâ-de-rocha que correspondeu ao concreto C3. A quantidade adicionada de cada fibra foi limitada pela fluidez do concreto conforme os requisitos



prescritos na introdução, ou seja, adicionaram-se gradualmente as fibras até atingir um teor que permitisse o espalhamento mínimo de 650 mm especificado para o ensaio do slump-flow.

As fibras de poliamida têm as seguintes características: baixo ponto de fusão, 260°C; peso específico igual a 1,14 g/cm<sup>3</sup>; diâmetro de 18 µm e comprimento de 21 mm; embora tenham alta resistência a tração, 900 MPa, possuem baixo módulo de elasticidade, 4,76 MPa.

As aparas de lã-de-rocha são um subproduto da conformação de outros materiais produzidos para fins de isolamento térmico. As aparas que sobram nesse processo de fabricação não perdem suas características iniciais. As fibras suportam temperaturas acima de 1.000 °C e apresentam características de baixa condutividade térmica, onde a faixa de temperatura que tem seu melhor desempenho é a de -200 °C a +750 °C. Possuem elevados índices de absorção acústica, são incombustíveis e podem desempenhar muito bem o papel de proteção térmica adicional às estruturas de concreto. Apresentam ainda uma inércia química sendo adequada aos meios alcalinos, como é o caso dos concretos. A Figura 5 ilustra ambas as fibras.



Figura 5 – Fibras utilizadas.

A Tabela 2 indica a composição dos concretos. Do consumo de cimento Portland obtido tem-se que o consumo de clínquer desses concretos é da ordem de 200 kg/m<sup>3</sup>, portanto os concretos obtidos podem ser considerados de baixo calor de hidratação.

Tabela 2 – Composição dos concretos estudados. (PEREIRA, 2010)

<b>Material</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Cimento ARI RS (kg)	327	325	325
Água (l)	176	175	175
Agregado fino (kg)	1.046	1.040	1.040
Agregado Graúdo (kg)	861	857	857
Sílica ativa + Metacaulinita (kg)	33	33	33
Superplastificante (kg) *	5,56	5,53	5,53
Fibras de poliamida – 21 mm (g)	0,00	344	0,00
Fibras de lã-de-rocha (g)	0,00	0,00	1.075

\*Corresponde à massa do aditivo na forma líquida, composto de 70% de água e 30% de sólidos.

A Figura 6 mostra o aspecto do concreto e alguns dos ensaios para caracterização do concreto fresco.



Figura 6 – Ensaio de caracterização do concreto fresco. (PEREIRA, 2010).

## 4 RESULTADOS

A Tabela 3 indica os resultados dos ensaios para caracterização do concreto fresco. Importante observar as altas densidades, indicando a eficiência do empacotamento, e os baixos percentuais de ar aprisionado, indicando a capacidade de preenchimento. Como esperado, a adição das fibras diminuiu a fluidez dos concretos.

Tabela 3 – Caracterização do concreto fresco. (PEREIRA, 2010)

Propriedade	Limites	C1	C2	C3
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) – NBR 9833	**	2.448	2.436	2.436
Teor de ar aprisionado (%) – NBR 9833	< 2%	0,31	0,76	0,79
Slump-flow, d <sub>f</sub> (cm) - ASTM C 1611	60 ≤ d <sub>f</sub> ≤ 80	74,5	65,0	70,0
Slump-flow, VSI - ASTM C 1611	≤ 1	0	0	0
Slump-flow, T <sub>500</sub> (s) - ASTM C 1611	2 ≤ T <sub>500</sub> ≤ 7	2,5	3,0	3,2
J-Ring-flow, d <sub>f,j</sub> (cm) - ASTM C 1621	≥ d <sub>f</sub> - 3	71,0	62,5	68,0
Caixa L, h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> *	≥ 0,80	0,9	0,85	0,87
Caixa L, t <sub>20</sub> (s)	t <sub>20</sub> ≤ 2	1,0	1,5	1,5
Caixa L, t <sub>40</sub> (s)	t <sub>40</sub> ≤ 4	2,5	3,5	3
Funil V, t <sub>v</sub> (s)	5 ≤ t <sub>v</sub> ≤ 10	5,5	8	7
Funil V, 5 min (s)	≤ t <sub>v</sub> + 3	*	9,5	*
Tubo U, RS=P <sub>1</sub> /P <sub>i</sub> - Gomes	≥ 0,90	*	*	0,93
Ruptura do cp à tração, análise visual das faces rompidas, Gomes	Segregação aparente dos agregados	Ausente	Ausente	Ausente
Column Technique, S (%), ASTM C 1610	≤ 15	12,44	*	11,31

\*\* Segundo a NBR 6118, estruturas de concretos normais são identificadas por massa específica seca maior do que 2 000 kg/m<sup>3</sup>, não excedendo 2 800 kg/m<sup>3</sup>, portanto os concretos pesquisados, mesmo adicionando as armaduras, pertencem a esta classe.

\* Ensaio não realizados

A Figura 7 indica a evolução da resistência à compressão dos concretos que podem ser considerados de alta resistência.

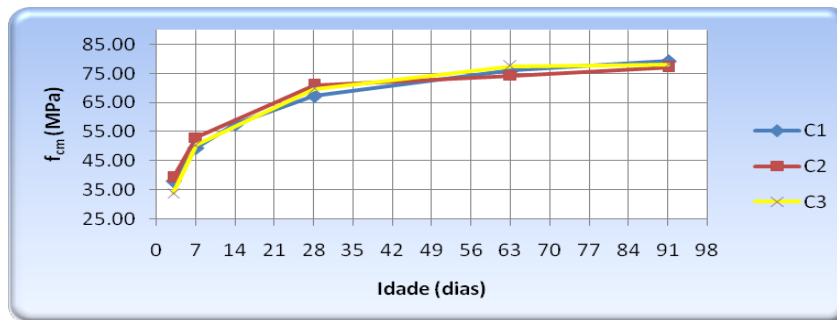


Figura 7 – Evolução da resistência à compressão. (PEREIRA, 2010).

A Tabela 4 mostra os principais resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas e também os ensaios para avaliação da durabilidade. São apresentados os valores médios, onde o detalhamento dos valores individuais e o tratamento estatístico dos dados podem ser consultados em PEREIRA, 2010.

Observa-se que foram atingidas altas resistências à compressão e tração por compressão diametral e por flexão. O módulo de elasticidade obtido é notável, fruto da qualidade do agregado gráudo basáltico e da baixa porosidade do concreto. No ensaio para avaliação do desgaste por abrasão, o melhor desempenho foi para o concreto com adição de lâ-de-rocha, o que indica o potencial para uso desse material em obras de pavimentação, inclusive com maiores teores do que o adotado.

Tabela 4 – Propriedades do concreto endurecido

Propriedade	C1	C2	C3
$f_{c28}$ (MPa), NBR 5739/1994	67,3	71,0	69,7
$E_{c28}$ (GPa), NBR 8522/2008	41	43	40
$f_{ct,sp28}$ (MPa), NBR 7222/1994	3,9	4,9	4,2
$f_{ct,f28}$ (MPa), NBR 12142/1991	7,1	7,2	6,9
Abrasão, desgaste para 1000 m, NBR 12042/1992, (mm)	1,7	1,4	1,3
Absorção por imersão (%), sem fervura, aos 91 dias, NBR 9778/2005	1,28	1,34	*
Índice de vazios (%), aos 91 dias, NBR 9778/2005	3,07	3,19	*
Massa específica seca ( $kN/m^3$ ), aos 91 dias, NBR 9778/2005	24,03	23,86	*
Absorção de água por capilaridade, 72 h ( $g/cm^2$ ), aos 91 dias, NBR 9779/1995	0,23	0,23	*
Ascensão capilar (cm), aos 91 dias, NBR 9779/1995	10,35	*	*

\* Ensaios não realizados

Como complemento à caracterização do concreto endurecido, foi investigada a possibilidade do lascamento explosivo em alta temperatura. Embora exista uma curva de incêndio padrão normalizada, NBR 5628, 2001, nem sempre é possível, com os fornos disponíveis, atender ao ensaio padrão. Além disso, outros fatores como dimensão do corpo-de-prova, estado de umidade e condições de carregamento influenciam nos resultados. De forma que um amplo estudo dos concretos em altas

temperaturas resulta em pesquisas caras e extensas. Na pesquisa em tela, foi feita apenas uma verificação pontual da possibilidade do lascamento explosivo.

Foram ensaiados os concretos com adição de fibras. Os corpos de prova, 10x20cm, permaneceram em câmara úmida até a idade de sete dias e depois ficaram expostos ao ambiente de laboratório, até a idade do ensaio, por mais 28 dias de forma a minimizar o efeito da umidade. Foram moldados também corpos de prova de controle para determinar a perda relativa. Utilizou-se um forno compacto e uma taxa de elevação de temperatura de 10°C/min, garantindo uma distribuição uniforme de temperatura no seu interior conforme medições realizadas anteriormente nos fornos disponibilizados pelo Departamento de Materiais da UFSCAR – Unversidade Federal de São Carlos-SP. Apenas para ilustrar a grande diversidade de condições de ensaios encontradas na literatura, HERTZ e SØRENSEN, 2005, citam ensaios de concretos densificados com sílica ativa que, mesmo aquecidos com uma baixa taxa de aquecimento, 1°C/min, sofreram lascamento explosivo em temperaturas de até 350°C.

A programação estabelecida para o forno compreendeu um crescimento da temperatura, na taxa indicada, até atingir a temperatura limite (300°C e 400°C, portanto no intervalo que contém o ponto crítico da água, quando o lascamento explosivo é mais provável conforme KALIFA et. al., 2000) e depois a permanência nesse patamar até a duração total do ensaio de 1 hora, quando o forno era desligado e os corpos de prova retirados e expostos ao ambiente de laboratório até o momento do ensaio, 24 horas após o início do resfriamento.

A Tabela 5 indica os dados de perda de resistência à compressão, módulo de elasticidade e massa. A fibra de poliamida, ao se fundir, evitou o lascamento explosivo do concreto, o que não aconteceu com o concreto com adição da apara de lâ-de-rocha que tem um ponto de fusão muito mais alto do que a temperatura crítica.

Tabela 5 – Deterioração percentual do concreto com a ação da temperatura. (PEREIRA, 2010)

<b>Propriedade</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
$f_c$ a 300°C	7,74	13,20
$E_c$ a 300°C	19,16	21,47
$f_c$ a 400°C	8,20	*
$E_c$ a 400°C	19,47	*
Perda de massa a 300°C	1,47	2,63
Perda de massa a 400°C	3,77	*

\* Ensaios não realizados devido à explosão dos corpos-de-prova

Na Figura 8 é mostrado o concreto com adição de lâ-de-rocha, após ser submetido à temperatura de 400°C, onde o primeiro corpo de prova explodiu após 55 minutos do início do ensaio e o segundo cerca de 10 minutos após o primeiro. O deslocamento de ar causado pela explosão foi de tal magnitude que estufou a porta do forno, que só não foi severamente danificado devido à gaiola de proteção utilizada. Este resultado também indica o refinamento do sistema de poros e alerta para a necessidade da utilização de fibras de baixa temperatura de fusão para os concretos desse tipo sujeitos à ação do fogo.



Figura 8 – Concreto com adição de lã-de-rocha após ser submetido à temperatura de 400°C. (PEREIRA, 2010).

## 5 CONCLUSÕES

Com os procedimentos de proporcionamento dos concretos detalhados neste trabalho foi possível produzir o concreto auto-adensável e de alta resistência proposto.

Observou-se que a adição de fibras permitiu tornar o concreto mais versátil, conforme a aplicação que se destina. A fibra de poliamida inibiu o lascamento explosivo com um consumo da ordem de 350 g/m<sup>3</sup>, que pode ser considerado baixo em comparação aos 2 kg/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno especificados pelo EUROCODE 2, Part 1.2, 2004. O concreto com adição de apara de lã-de-rocha teve bom indicativo para melhorar a resistência à abrasão, o que é muito importante em obras de pavimentação.

Os concretos com baixo consumo de aglomerantes são viabilizados pelo empacotamento dos agregados, inclusive fíler, e pelo uso intensivo dos aditivos superplastificantes. O consumo de cimento Portland para se produzir 1 MPa na idade de 28 dias foi de 4,6 kg e o de aglomerantes de 5,1 kg.

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão apresentaram valores médios de 1,3% que podem ser considerados muito baixos, demonstrando a qualidade dos concretos, pois quando esses valores são menores que 4,2%, os concretos podem ser considerados duráveis conforme F.G., SILVA, 2006;

A ascensão capilar foi de 10,35 cm, indicando que os vazios conectados são capilares muito finos e isso está em consonância com F.G., SILVA, 2006, que demonstrou que essa capilaridade não interfere na durabilidade.

Observou-se nos ensaios realizados, ainda que sejam poucos, pequena perda de resistência do concreto a 400°C, o que indica a grande potencialidade do material em suportar altas temperaturas durante a ação do fogo, permitindo as ações de combate ao incêndio.

## 6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a EESC-USP e ao DEMA-UFSCAR pela disponibilização dos laboratórios necessários à pesquisa.

## 7 REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, PIERRE-CLAUDE. **Concreto de alto desempenho**. [trad.] Geraldo G. Serra. São Paulo : Pini, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**. Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo - Procedimento. Rio de Janeiro : ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção d'água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção d'água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042**: Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1610/C 1610M – 06a**: Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique. Philadelphia, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1611/C 1611M – 05**: Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. Philadelphia, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1621/C 1621M – 06**: Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring. Philadelphia, 2006.
- BENTZ, DALE P. **Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete**. 2000, American Concrete Institute (ACI) Materials Journal, Vol. 97 N°3, pp. 351-359.
- BRETON, DANNYS. **Low-heat high performance concrete**. US005531823A United States of America, 02 de Jul de 1996. ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED. Disponível em [www.freepatentsonline.com/5531823](http://www.freepatentsonline.com/5531823). Acesso em 12/12/2009.
- BUCHER, H.R.E. **Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas argamassas ou concretos**. Rio de Janeiro : Ibracon, 1988. Vol. 2, pp. 609-625. 30ª Reunião anual do Ibracon, REIBRAC.



CASTRO, A. L. **Reologia do concreto de alto desempenho**. 302 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, ALESSANDRA L., LIBORIO, JEFFERSON B. L. e PANDOLFELLI, VICTOR CARLOS. **Dosagem de concretos avançados para a construção civil a partir do método computacional**. Curitiba : IBRACON, 2009. 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design**. Brussels : CEN, 2004.

EUROPEAN PROJECT GROUP. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. <http://www.efnarc.org/publications.html>, acesso em 27 de fevereiro de 2008. 2005.

HELENE, PAULO R. L. e TERZIAN, PAULO. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo : Pini, 1992.

HERTZ, K.D. e SØRENSEN, L.S. **Test method for spalling of fire exposed concrete**. 2005, Fire Safety Journal, Vol. 40, pp. 466–476

KALIFA, PIERRE, MENNETEAU, FRANÇOIS-DOMINIQUE e QUENARD, DANIEL. **Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures**. 2000, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1915-1927.

LIBORIO, JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI, et al. **Concreto autoadensável de alta resistência mecânica e baixo consumo de cimento**. São Paulo: Ibracon, 2009, Revista Concreto e Construções, Vol. 55, pp. 48-54.

LIBORIO, JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI. **SET 5891 - Tecnologia dos concretos estruturais. Notas de aula (Disciplina de pós-graduação)**. São Carlos : Departamento de engenharia de estruturas, EESC. Universidade de São Paulo, 2007.

MEHTA, POVINDAR KUMAR. **Society, sustainability, and the global concrete industry**. Curitiba: IBRACON, 2009. Palestra no 51º Congresso Brasileiro do Concreto.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. 271 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NEVILLE, ADAM MATTHEW. **Propriedades do concreto**. [trad.] Salvador E. Giamusso. 2. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, IVONE REGINA, et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo : Fazendo Arte Editorial, 2000.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PETRUCCI, ELÁDIO G. R. **Concreto de cimento Portland**. 8ª ed. Porto Alegre : Globo, 1981. Revisado por Vladimir Antonio Paulon.

POWERS, T. C., COPELAND, L. E. e MANN, H. M. **Capillary continuity or discontinuity in cement pastes**. Skokie : Portland Cement Association, 1959.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenhos frente à ação de cloretos.** 2006. 220 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 2002. 279 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVA, VALDIRENE MARIA DA. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa.** Dissertação (Mestrado). São Carlos: IFSC/IQSC-EESC. Universidade de São Paulo, 2002.

SONG, P.S., HWANG, S. e SHEU, B.C. **Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes.** 2005, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1546– 1550.

TIBONI, RAFAELLE. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland.** Dissertação (Mestrado). São Carlos: SET-EESC. Universidade de São Paulo, 2007.

TUTIKIAN, BERNARDO FONSECA e MOLIN, DENISE CARPENA DAL. **Concreto auto-adensável.** São Paulo: Pini, 2008.