

## ESTUDO SOBRE REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

*STUDY ON REDUCTION OF CEMENT CONSUMPTION AND CO<sub>2</sub> EMISSION FOR HIGH  
PERFORMANCE CONCRETE*

**Lucas da Silva Barboza<sup>1</sup>, Fernando Menezes de Almeida Filho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mestre em Estrutura e Construção Civil, Professor no Centro Universitário Adventista de São Paulo – UNASP, Câmpus Engenheiro Coelho. E-mail: lucas.barboza@unasp.edu.br.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, SP. E-mail: almeidafilho@ufscar.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre a elaboração de concretos de alto desempenho com baixo consumo de cimento Portland e avalia algumas das suas propriedades no estado fresco: espalhamento, resistência à segregação e habilidade de passagem; e endurecido (propriedades mecânicas): resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. A confecção de concretos com baixo consumo de cimento Portland parte do conceito de possibilitar maior sustentabilidade da indústria da construção civil baseada no concreto, como maior longevidade das jazidas de matérias-primas, redução da emissão de CO<sub>2</sub> e no consumo de energia e menores custos de transportes. Proporciona diversas melhorias técnicas, como menor calor de hidratação, retração e fissuração. Fundamentado em conceitos de empacotamento e dispersão de partículas, escolha adequada dos materiais e uso de adições minerais e fíleres foram obtidos concretos com baixo consumo de cimento e alta resistência, com consumo relativo de materiais aglomerantes inferior a 5 kg/m<sup>3</sup> para produzir 1 MPa de resistência à compressão. Foi utilizada a metodologia de dosagem apresentada por Gomes (2002) e concluiu-se que é possível produzir um concreto de alto desempenho com consumo de cimento Portland reduzido.

**Palavras-chave:** Concreto de alto desempenho, Baixo teor de cimento, Resistência, Elementos pré-moldados.

### ABSTRACT

This work presents an analysis for preparation of high performance concretes with low consumption of Portland cement, and evaluates some of its properties in fresh: spreading, resistance to segregation and ability to pass; and hardened (mechanical properties): compressive strength, diametral tensile strength in compression and elastic modulus. The production of concretes with low consumption of cement Portland enables an increased sustainability in the Civil Industry based on concrete, with increased longevity of raw materials deposits, reduction of CO<sub>2</sub> emissions and no consumption of energy and lower transportation cost. It provides several technical improvements, as lower heat of hydration, shrinkage and cracking. Based on packaging concepts and particulate dispersion, suitable choice of materials and use of mineral fillers and additions there were obtained concretes with low consumption of cement and high resistance, with relative consumption of binder materials less than 5 kg/m<sup>3</sup> to produce 1 MPa of compressive strength. It was used the dosage methodology presented by Gomes (2002) and it was concluded that it is possible to produce a high performance concrete with reduced Portland cement consumption.

**Keywords:** High performance concrete, Low cement consumption, Strength, Precast elements.

### 1 – INTRODUÇÃO

A utilização de maneira consciente dos recursos naturais disponíveis é um tema atual e indispensável. Para que as gerações futuras possam desenvolver-se e existir, a atual geração deve gerenciar de maneira responsável os recursos naturais que se encontram à sua disposição. Estudos voltados a esta temática tornam-se necessários, visando o emprego de níveis menores de consumo de recursos escassos e o aumento da durabilidade dos produtos fabricados (BARBOZA, 2016).

Devido ao crescimento econômico nos países em processo de desenvolvimento, o consumo de cimento tem crescido continuamente, destacando a China que responde por mais da metade da produção de cimento no mundo (CEMBUREAU, 2010). Com a necessidade do aumento da produção do clínquer, a emissão de dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>) tem sido um dos principais problemas enfrentado pelas indústrias cimenteiras, sem contar a redução de longevidade de jazidas de matérias-primas.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a redução do consumo de cimento no concreto, a redução do concreto nas estruturas e redução do teor de clínquer no cimento, são três possíveis processos que levaria ao caminho da sustentabilidade na indústria do cimento e do concreto.

A obtenção de concretos de alto desempenho (CAD) com baixo consumo de cimento Portland (baixo calor de hidratação), alta resistência à compressão e baixa permeabilidade, tem uma significativa importância na construção civil.

Segundo Barboza (2016), o conceito do CAD com baixo consumo de cimento surgiu da combinação de materiais com propriedades superiores tornando possível a sua aplicação em peças esbeltas com formas complexas,

curvaturas e estruturas altamente personalizadas, ou seja, aplicações que são difíceis de se alcançar com elementos de concreto armado tradicional. Além disso, é possível aumentar a velocidade de execução das edificações; por ser autoadensável, torna desnecessário o uso de equipamento de vibração, podendo também reduzir a carga permanente da estrutura nas fundações por apresentar resistência elevada, reduzindo, assim, as seções dos elementos estruturais; e, quando otimizado, reduz a utilização de sistemas de fôrmas e aumenta a durabilidade da peça.

Um material com essas características atende aos parâmetros apresentado por Mehta e Monteiro (2014), visando a garantia da sustentabilidade da indústria do concreto, por meio da diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>.

Em meio às propriedades do concreto, a resistência mecânica, ao longo de muitos anos, tem sido adotada como parâmetro de qualidade e durabilidade do material, onde esforços se convergem para alcançar valores cada vez maiores. Porém, nos últimos anos, mediante o avanço tecnológico do cimento e do concreto, tornou-se possível produzir concretos com boa resistência, qualidade e durabilidade, mesmo com o baixo consumo de cimento (AITCIN, 2000).

Aitcin (2000) afirma que o concreto de alto desempenho conterá futuramente cada vez menos cimento Portland, cada vez mais materiais de cimentícios suplementares ou até mesmo adição de fíler (no qual isso já é uma realidade). Esta substituição torna-se vantajosa mediante ao ponto de vista econômico, reológico e de desenvolvimento de calor. Segundo este mesmo autor, o que se pode perder em termos de propriedades aglomerantes iniciais (24 horas) pode ser compensado pela redução adicional da relação água/aglomerante (*a/agl.*). A redução de cimento e sua substituição por materiais cimentícios menos reativos podem resultar em consumo inferior de superplastificante para a mesma trabalhabilidade, de forma que uma redução significativa no custo do metro cúbico de concreto pode ser obtida.

As dúvidas pertinentes sobre a durabilidade de concretos de baixo consumo de cimento e a sua projeção no futuro justificam a avaliação da durabilidade e da resistência destes concretos. Os fatores relevantes devem ser observados, estabelecidos e relacionados. Possivelmente novos limites para consumos mínimos de cimento possam ser estabelecidos, não apenas adotando o parâmetro de resistência, mas, sobretudo, de desempenho (REBMAN, 2011).

Entretanto, mesmo com todo este crescimento tecnológico, o baixo desempenho de algumas estruturas correntes tem sido motivo de preocupação no meio técnico. Conforme Mehta e Monteiro (2014), a agressividade ambiental atual é bem maior do que no passado e, aliado a isto, os recursos tecnológicos disponíveis nem sempre são utilizados. O consumo de cimento interfere diretamente na durabilidade da estrutura, e que por sua vez a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto.

Atendidos os critérios de projeto estabelecidos na norma ABNT NBR 6118:2014, ensaios comprobatórios do desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo e

ao nível de agressividade previsto em projeto devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos. Na falta desses e devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite-se adotar os requisitos mínimos expressos pela norma ABNT NBR 12655:2015.

De acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014, o consumo mínimo de cimento varia de 260 a 360 kg/m<sup>3</sup>. Ainda assim, existem restrições quanto ao máximo relação água/cimento e mínima resistência a ser alcançada, não apresentando nenhuma restrição quanto ao tipo de cimento ou dos limites a respeitar do uso de adições e aditivos.

Na Europa a especificação é dada pela norma CEN EN 206-1:2000 que apenas apresenta informações básicas, cabendo aos países membros o estabelecimento de limites.

A norma alemã EN 206-1:2000/DIN 1045-2:2008 trata que elementos internos devem apresentar consumo mínimo de 240 kg/m<sup>3</sup> e externos de 280 kg/m<sup>3</sup>, ocorrendo à incorporação de adições minerais, este consumo pode ser reduzido para 270 kg/m<sup>3</sup> (VDZ, 2008). Os valores também variam de acordo com a classe ambiental, independente, do tipo de cimento utilizado (VDZ, 2008).

A norma britânica BSI BS 8500:2006 apresenta os consumos mínimos de cimentos para concretos estruturais, classificando-os em função da agressividade ambiental, exposição, tipo de elemento, tipo de cimento e cobrimento da armadura, variando de 240 kg/m<sup>3</sup> para ambientes internos a 380 kg/m<sup>3</sup> para ambientes externos.

Ressaltando ainda um caso especial de concreto, aquele compactado por rolos, comumente aplicado em obras como barragens e sub-bases e bases de rodovias, a norma DNIT 056/2004-ES fixa o consumo mínimo de cimento entre 80 e 120 kg/m<sup>3</sup> para sub-base de pavimento rígido. Já a DNIT 059/2004-ES apresenta que o consumo mínimo de cimento para pavimentos rígidos seja de 200 kg/m<sup>3</sup>. Segundo Kuperman (2005) para barragens são comuns 70 kg/m<sup>3</sup>.

O acompanhamento da viabilidade técnica e da viabilidade econômica deve ser simultâneo. Um bom desempenho financeiro não se restringe apenas à diminuição dos custos empregados inicialmente, mas, também à obtenção de bom desempenho e durabilidade para que ocorra a redução dos custos de manutenção e assim, consequentemente gerando um aumento de vida útil (BARBOZA, 2016).

A maior importância desta pesquisa é que o concreto aqui proposto apresenta características de resistência e trabalhabilidade, com baixo consumo de cimento Portland, autoadensáveis, o que indica que atende à sustentabilidade da construção e que o seu custo não deve ser elevado.

Os concretos autoadensáveis (CAA) é uma representação da evolução tecnológica frente aos concretos que exigem algum tipo de vibração e adensamento. Devido ao crescente aumento do custo da mão-de-obra, da necessidade de melhoria nas condições de trabalho, da popularização do uso de aditivos superplastificantes, reduzindo o custo deste material, o CAA deve ter o seu uso intensificado na indústria do concreto (ALMEIDA FILHO, 2006).

## 2 – INDICADORES DE BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Tradicionalmente, pode-se expressar a relação entre a massa de cimento utilizado pelo volume de concreto produzido como um fator que mede o consumo de cimento naquela mistura (BARBOZA, 2016). Em diversos países e no Brasil é adotado o Sistema Internacional de medida que costumeiramente é apresentado em kg/m<sup>3</sup>. Consumos tradicionais enquadram-se dentro do intervalo de 250 a 750 kg/m<sup>3</sup> (FERREIRA, 2010). O método adotado de expressar o consumo, não se relaciona com as características dos materiais envolvidos e nem do concreto resultante. Nem sempre um concreto com um consumo de cimento maior estará relacionado com uma resistência elevada (BARBOZA, 2016).

Portanto, pode-se concluir que um melhor indicativo de consumo seria aquele que relaciona a quantidade necessária de cimento para produzir certa quantidade de um determinado parâmetro avaliando, assim, o desempenho obtido pela quantidade de cimento empregada. Segundo Rebmann (2011), pode-se expressar, matematicamente, o consumo relativo (C<sub>r</sub>) pela Equação (1).

$$C_r = \frac{C}{p} \quad (1)$$

Em que: C = consumo de cimento; p = parâmetro escolhido.

Um dos principais parâmetros utilizados para retratar eficiência estrutural do concreto é a resistência à compressão aos 28 dias. Desta maneira, um índice de consumo pode ser gerado levando em consideração a resistência obtida pelo concreto, à quantidade de cimento em um m<sup>3</sup> de concreto necessário para se produzir 1 MPa de resistência à compressão (REBMANN, 2011).

Podendo também variar este parâmetro, levando em consideração os diversos tipos de aglomerantes empregados na mistura, como sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno etc. (BARBOZA, 2016).

Um dos quesitos desta pesquisa é o aspecto ambiental, tendo o interesse em analisar a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido por MPa produzido aos 28 dias. Este índice de consumo está relacionado à produção de clínquer, principalmente.

## 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir são descritos todos os materiais e métodos utilizados nos diversos concretos ensaiados, com suas principais características. Algumas destas características foram obtidas por fabricantes e outras por métodos experimentais. Os ensaios mecânicos foram conduzidos no Laboratório de Estruturas e Materiais do UNASP utilizando uma máquina universal de ensaios (Prensa Servo-hidráulica, classe I). Na Tabela 1 é apresentado o número de amostras ensaiadas com seus respectivos ensaios para cada dosagem.

Tabela 1 – Ensaios mecânicos e amostras por dosagem ensaiada

Data	Amostras	Ensaio	Dosagem
16/07/2015	30	Compressão axial	Auxiliar
16/07/2015	30	Tração diametral	Auxiliar
16/07/2015	30	Mód. de Elasticidade	Auxiliar
11/12/2015	6	Compressão axial	Referência
11/12/2015	6	Tração diametral	Referência
11/12/2015	6	Mód. de Elasticidade	Referência
11/12/2015	9	Compressão axial	Baixo consumo
11/12/2015	9	Tração diametral	Baixo consumo
11/12/2015	9	Mód. de Elasticidade	Baixo consumo
Total	135		

Os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral foram realizados na idade de 28 dias em corpos de provas cilíndricos (10 por 20 cm), com três corpos de prova por idade, para cada ensaio, atendendo as exigências, respectivamente, de acordo com as normas ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 8522:2008 e de acordo com requisitos da ABNT NBR 7222:2010.

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova tiveram as faces superior e inferior retificadas por meio de uma retifica de eixo vertical.

### 3.1 Materiais utilizados

Neste estudo optou-se por agregados encontrados na região metropolitana de Campinas, Engenheiro Coelho, SP, cimento comercializado na região e adições e aditivos químicos disponíveis em nível nacional.

#### 3.1.1 Cimento

Foi utilizado apenas um tipo de cimento: CPV ARI, especificado pela norma ABNT NBR 5733:1991. A razão da escolha quanto ao tipo de cimento, deve-se ao fato de ser um cimento exclusivamente para aplicação na indústria de pré-moldados e artefatos de concreto, onde torna-se necessário o aumento da produtividade associado a resistências extremamente elevadas nas primeiras horas de aplicação, área no qual designa esta pesquisa.

#### 3.1.2 Sílica ativa

Foi utilizada apenas uma adição mineral: sílica ativa. A mesma foi escolhida com o intuito de gerar o refinamento de poros por meio da ação pozolânica e de empacotamento nos níveis abaixo da granulometria do cimento.

A sílica ativa (Tecnosil), oriunda do processo de fabricação do ferro silício, possui massa específica de 2,22 g/cm<sup>3</sup>. O fabricante do produto TECNOSIL apresenta, ainda, superfície específica (BET) de, aproximadamente, 19.000 m<sup>2</sup>/kg, teor de SiO<sub>2</sub> > 90%. O produto tem retenção na peneira #325 (abertura de 45 µm) inferior a 10% (TECNOSIL, 2015).

#### 3.1.3 Fíler calcário

Utilizou-se um fíler proveniente do calcário, compacto e de granulação fina na coloração branca, chamado

comercialmente como pó de calcário. Os dados fornecidos pelo fabricante BRASIL MINAS estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas do filer calcário

Parâmetro		Resultados		
Cor		Branco		
Diâmetro Médio		45 µm		
Características químicas				
CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
55,17%	0,13%	0,07%	0,30%	0,77%

Fonte: Brasil Minas (2015).

### 3.1.4 Agregado miúdo

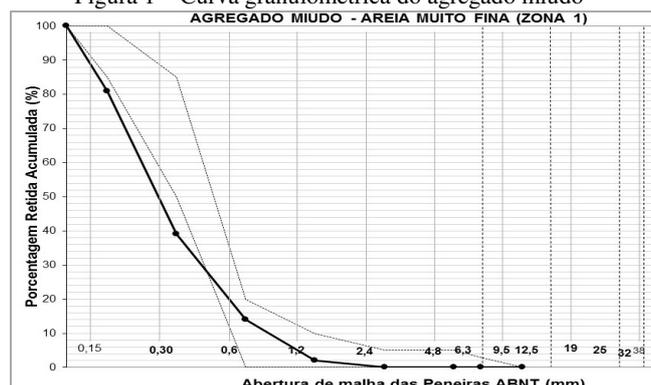
A areia utilizada foi de origem quartzosa, oriunda de cavas, da região metropolitana de Campinas, SP. Depois da seleção do tipo de areia a ser empregada foi realizado o estudo de caracterização física e os resultados estão relacionados nas Tabela 3 e Figura 1.

A caracterização do agregado miúdo seguiu as condições apresentadas pelas normas vigentes: composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003); classificação granulométrica (ABNT NBR 7211:2009); massa unitária no estado solto e estado compactado seco e índice de vazios (ABNT NBR NM 45:2006); massa específica (ABNT NBR NM 52:2009).

Tabela 3 – Caracterização física do agregado miúdo

DMC (mm)	Módulo de Finura	Classificação	Massa Específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
1,2	1,36	Muito fina	2,632
Massa Específica solta (g/cm <sup>3</sup> )		Massa unitária compactada seca (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
1,567		1,712	34,3

Figura 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



### 3.1.5 Agregado graúdo

O agregado empregado foi de origem basáltica, na forma britada, originários da região de Engenheiro Coelho, SP. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização são encontrados nas Tabela 4 e Figura 2.

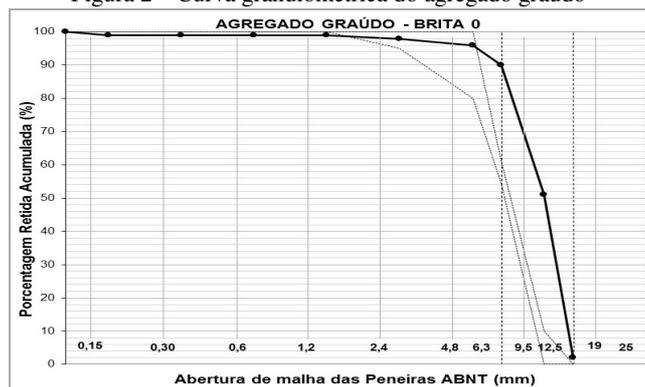
A caracterização do agregado seguiu as condições apresentadas pelas normas vigentes: composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003); classificação

granulométrica (ABNT NBR 7211:2009); massa unitária no estado solto e estado compactado seco e índice de vazios (ABNT NBR NM 45:2006); massa específica (ABNT NBR NM 53:2009).

Tabela 4 – Caracterização física do agregado graúdo

DMC (mm)	Módulo de Finura	Classificação d/D	Massa Específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
12,5	5,68	4,75/12,5	2,93
Massa Específica solta (g/cm <sup>3</sup> )		Massa unitária compactada seca (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
1,598		1,601	45,7

Figura 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



É possível verificar com as figuras 1 e 2 a ineficiência dos agregados, quanto a sua uniformidade e granulometria. Mesmo com os resultados obtidos optou-se em permanecer com o material analisado, devido aos comportamentos similares dos materiais disponíveis na região, não sendo vantajosa a substituição do mesmo.

### 3.1.6 Aditivo superplastificante (SP)

O aditivo Adiment Super MC<sup>®</sup> apresenta-se na cor amarelada, tem densidade média de 1,23 g/cm<sup>3</sup>, segundo informações do fabricante (VEDACIT, 2015). Proporciona características como altas resistências inicial e final, alta fluidez, autonivelção, rápido lançamento, aderência à armadura, excelente acabamento, alta densidade e baixa permeabilidade (VEDACIT, 2015).

## 3.2 Ensaios preliminares

Para a elaboração de concretos com baixo consumo de cimento, buscou-se a otimização dos fatores que influenciam na resistência do concreto. Na sequência detalham-se os procedimentos adotados para obter um máximo preenchimento do volume de concreto com sólidos, avaliação da compatibilidade de aditivos e cimentos e determinação do teor de aditivo

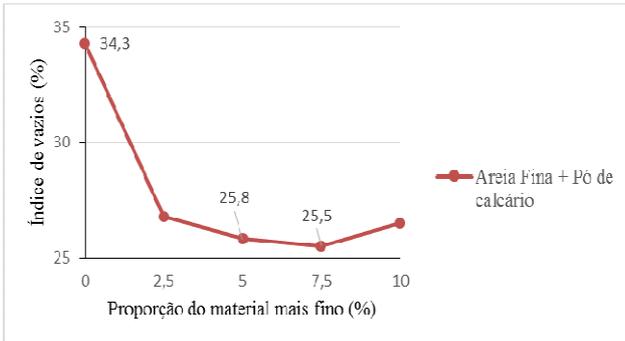
### 3.2.1 Empacotamento dos agregados

O processo experimental de empacotamento dos agregados adotado foi o de misturas sucessivas, o que é apresentado por Rebmann (2011). Por se tratar de um método que pode ser usado em qualquer local e por considerar a interação

entre as partículas reais, inclusive os seus formatos e texturas superficiais. Esta metodologia é realizada em fases sucessivas. Cada fase otimiza a mistura entre dois materiais ou misturas já estabelecidas. A seguir é descrita uma destas fases, denominando genericamente os dois materiais de “Material A” e “Material B”.

A primeira fase de empacotamento envolveu o agregado miúdo e o pó de calcário. A Figura 3 apresenta os resultados deste ensaio, expresso em termos de índice de vazios.

Figura 3 – Empacotamento dos agregados miúdos, representado em índices de vazios

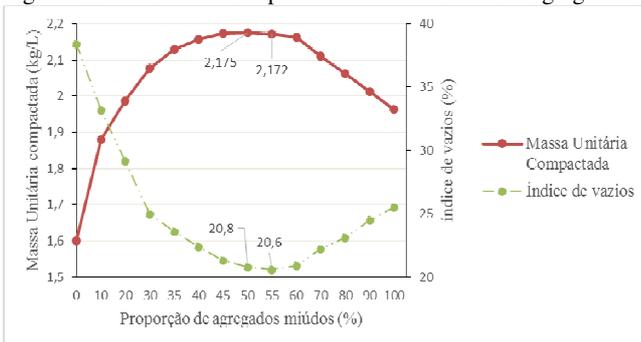


Ao analisar o ponto ótimo da mistura apresentada nota-se apenas uma pequena diferença entre o índice de vazios com 5,0% e 7,5% de pó de calcário. Portanto, adotou-se o valor correspondente de 7,5% possibilitando, assim, uma maior eficiência a mistura, já que a mesma apresenta baixa distribuição granulométrica.

Na fase de empacotamento resultou, então, em 92,5% de areia fina e 7,5% de pó de calcário, resultando em índice de vazios 25,5% e massa unitária compactada de 1,735 kg/L.

A fase final de empacotamento compreende a otimização entre agregados miúdos e agregado graúdo. O resultado é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fase final do empacotamento com todos os agregados



Com base neste ensaio nota-se um ponto ótimo com proporção de agregados miúdos em 55%, sendo muito pequena a diferença para 50% de agregados miúdos. Optou-se por utilizar apenas 50% de agregados miúdos por resultar em teor de argamassa um pouco menor e mais próximo do teor de argamassa dos concretos de referências.

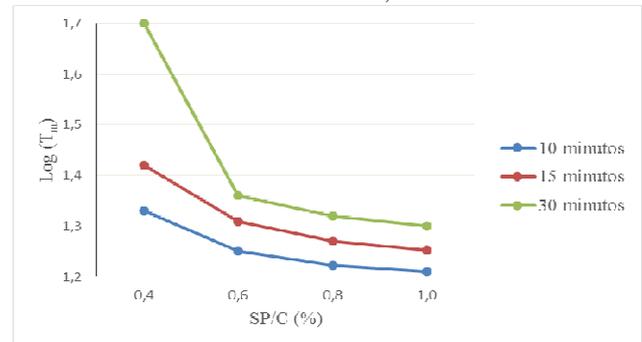
Ficou estabelecida a proporção de 50% de agregados graúdos e 50% de agregados miúdos ficando apenas 20,8% do volume total a ser preenchido com pasta de cimento.

### 3.2.2 Máximo preenchimento do volume do concreto por sólidos

Nesta etapa é apresentado o desenvolvimento dos concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento. Na sequência detalham-se os procedimentos adotados para se obter um máximo preenchimento do volume de concreto com sólidos

Na Figura 5 é apresentada a variação do tempo de escoamento, conforme o método AFREM (DE LARRARD; FERRARIS; SEDRAN, 1998).

Figura 5 – Curvas de fluidez para os ensaios com funil Marsh com A/C = 0,4



O teor ótimo de superplastificante foi considerado para o tempo de 10 minutos após a mistura do cimento com a água. Segundo Gomes (2002), quando não for apresentado um ponto com o ângulo entre  $140^\circ \pm 10^\circ$ , ou uma determinação mais acurada for necessária, pode-se interpolar os pontos existentes para obter o ângulo correspondente para o ponto de saturação. Assim, os teores de superplastificante foram de 0,64% (A/C = 0,4) e 0,67% (A/C = 0,6).

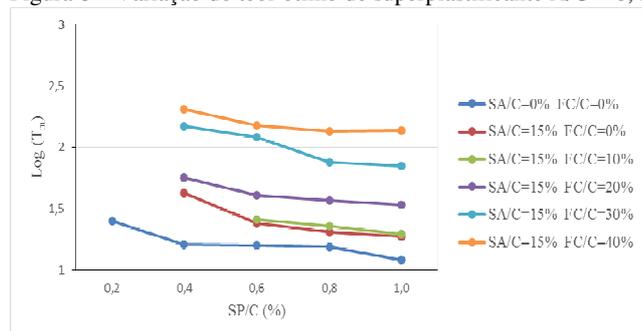
Para a verificação se houve ou não segregação da pasta, foi necessário realizar o ensaio de miniabatimento (AÏTCIN, 2000; GOMES, 2002).

As misturas apresentaram altíssima fluidez no espalhamento por meio do ensaio de miniabatimento, impossibilitando assim, a aferição do tempo de escoamento das pastas. Segundo Almeida Filho (2006), não é possível medir  $T_{115}$  para pastas com relações água/cimento inferior a 0,4 a não ser que estas sejam bastante rígidas por causa da adição de finos, o que levou à conclusão de que seria necessária a utilização de um Fíler para aumentar a rigidez da pasta, mesmo não sendo observada nenhuma segregação tornando-se, assim, uma medida preventiva para o caso de se ter exsudação por falta de rigidez da pasta.

Portanto, foram realizados estudos, baseado em Almeida Filho (2006), para otimizar o conteúdo de partículas de finos com relação ao teor de superplastificante. Adotou-se quatro teores de adição de Fíler calcário (10, 20, 30 e 40%) em substituição da massa do cimento, além, da substituição do teor de sílica ativa

(15%). Na Figura 6 é ilustrada a variação do teor ótimo de saturação para a relação A/C = 0,4.

Figura 6 – Variação do teor ótimo de superplastificante A/C = 0,4



Na Tabela 5 são apresentados os teores de Fíler de calcário e sílica ativa para a pasta. Os valores para o teor ótimo de superplastificante observados na Tabela 5 foram tomados para o tempo de 10 minutos e, quando não foi possível determinar um ponto de saturação, foi realizada a interpolação (GOMES, 2002).

Tabela 5 – Teores observados para os ensaios de fluidez e de miniabatimento A/C = 0,4

SA/C (%)	15	15	15	15	15
FC/C (%)	0	10	20	30	40
SP/F (%) – Saturação	0,60	0,81	0,58	0,68	0,77
Espalhamento (cm)	12,92	17,30	14,10	16,50	17,60
T <sub>115</sub> (s)	0,41	0,30	0,80	0,45	0,45
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,97	1,89	1,89	1,88	1,85

Os valores obtidos para T<sub>115</sub> ilustrados na Tabela 5 são muito baixos e suscetíveis a erros de medição, e, portanto, não devem ser atribuídos total confiança para efeito de verificação da pasta.

Para a análise da proporção adequada de Fíler a ser empregada na substituição de cimento, foi realizado um estudo do comportamento da pasta variando a quantidade de Fíler de calcário, no caso, foi variado de 0 a 40%, Tabela 5, mais uma vez tomando como base os parâmetros adotados por Almeida Filho (2006). O ensaio de miniabatimento serve para determinar se o teor de Fíler presente na mistura é ideal para promover a coesão sem comprometer a fluidez.

Na Figura 7 são ilustradas as amostras de miniabatimento, em que não foi observado qualquer segregação da mistura.

De acordo com Gettu e Agulló (2004) e Gomes (2002), os critérios para o teor ótimo de Fíler na mistura, o diâmetro de espalhamento deve estar no intervalo de 18,0 ± 1,0 cm e que o tempo T<sub>115</sub> tem que estar no intervalo de 3 ± 1 segundos.

Figura 7 – Ensaios de miniabatimento para relação A/C = 0,4, FC/C = 10% e SA/C = %



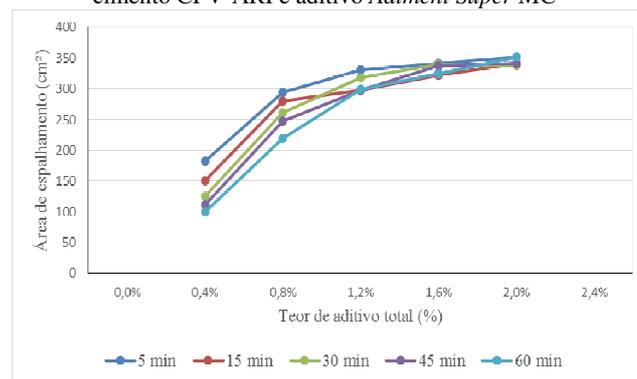
Para Gomes (2002), elevados valores de A/F (água/finos), maiores que 0,4, o tempo T<sub>115</sub> fica muito difícil de se medir, em função da alta fluidez apresentada pela pasta, assim, o critério para a determinação do teor ótimo de Fíler será o diâmetro final de espalhamento, que, no caso, foi obedecido por duas misturas: a FC/C = 0,1 e a FC/C = 0,4 para a relação A/C = 0,4.

### 3.2.3 Determinação do teor do aditivo

Para escolha do aditivo utilizado nas dosagens definitivas utilizaram-se como parâmetros: máximo espalhamento, menor perda de espalhamento com o tempo, comportamento mais uniforme e menor interferência de pega. Entre os aditivos testados o que teve melhor desempenho para ambos os cimentos foi o Adiment Super MC®, recomendado pelo fabricante para uso de concretos de altas resistência e/ou alta fluidez, possibilitando, inclusive, concretagens em condições adversas.

Na Figura 8 é apresentado o resultado do cimento CPV-ARI. A porcentagens de aditivo estão expressas em termos de aditivo total (sólidos + solventes) em relação a massa de cimento.

Figura 8 – Ensaio de miniabatimento de tronco de cone com cimento CPV-ARI e aditivo Adiment Super MC®



Cada curva representa um tempo de ensaio. Quanto mais próximas as curvas, menor será a perda de desempenho do aditivo ao longo do tempo. Para o cimento CPV-ARI há pouca mudança com o tempo independentemente da quantidade do aditivo.

Para o cimento CPV-ARI há alterações maiores com o baixo consumo de aditivo. Para maiores consumos ocorre estabilização, sendo que a partir de 1,2% de aditivo podem ser consideradas desprezíveis as perdas de trabalhabilidade até uma hora de ensaio. Pelas curvas apresentadas pode-se concluir que para o cimento CPV-ARI o ponto de melhor desempenho de aditivo está entre 1,6 e 2,0%.

### 3.3 Dosagem do concreto

Existem diversas propostas nomeadas para a determinação da composição do CAA, dentre elas podem ser citadas de Saak; Jennings; Shah (2001), Arima *et al.* (2002), Tutikian (2004), e da UPC (GETTU; AGULLÓ, 2004). A proposta adotada para o desenvolvimento do CAA foi baseada na pesquisa de Gomes (2002) a qual se baseia no método de

dosagem desenvolvido na UPC – Universidade Politécnica da Catalunha. Segundo a avaliação, o CAA pode ser determinado por meio de três etapas: pasta, agregado – esqueleto granular– e concreto.

O método da UPC é baseado na otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular dos agregados. A pasta é constituída de cimento, sílica ativa, Fíler, água e superplastificante, enquanto o esqueleto granular é composto pela otimização entre agregado miúdo e graúdo de modo a se encontrar a maior compactação seca sem haver a necessidade de compactar os agregados; desse modo, há a redução de vazios no esqueleto granular.

De acordo com Gettu e Agulló (2004), as relações utilizadas em peso para a determinação da composição da pasta são A/C, SA/C, SP/C, e F/C. Tratando-se de concretos de alta resistência se utiliza a relação SA/C = 0,1, a relação A/C é fixada em 0,4 e, a partir daí esse valor é reduzido até que se obtenha a resistência requerida.

Determinado as relações A/C e SA/C, passa-se à determinação da dosagem tanto do superplastificante quanto da adição de fíler. Por meio do ensaio de cone Marsh determina-se a relação SP/C, que representa o ensaio de fluidez e otimização do teor de superplastificante na pasta.

Com a determinação do teor ótimo de superplastificante, determina-se o teor ótimo de adição, onde está varia em adição ao cimento ou em substituição de cimento, este último utilizado nesta pesquisa. De acordo com Aitcin (2000), a dosagem de fíler se faz a partir do ensaio de miniabatimento ou miniespalhamento, que trata em medir o diâmetro do espalhamento, que deve estar dentro do limite de  $(18 \pm 1)$  cm e de medir o tempo que a pasta leva para ultrapassar o diâmetro de 115 mm (T115), que deve estar dentro do limite de  $(3 \pm 1)$  s). Segundo Gettu e Agulló (2004) e Gomes (2002), a pasta que respeitar os parâmetros estabelecidos terá relação de Fíler com relação ao cimento ótima.

As dosagens adotadas para a elaboração do concreto de alto desempenho com baixo consumo de cimento: CBC1, CBC2 e CBC3 e os concretos de referência: CR1 e CR2 atendem aos requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 12655:2015 para a classe de agressividade ambiental II, ambientes urbanos não litorâneos, desde o consumo mínimo de cimento, relação água/cimento e resistência à compressão. Segundo a norma ABNT NBR 12655:2015, deve-se, neste caso, utilizar consumo de cimento mínimo de 280  $kg/m^3$ , relação A/C máxima de 0,6 e resistência a compressão mínima de 30 MPa aos 28 dias.

Ressalta-se que as adições minerais foram utilizados utilizadas como adição no concreto e não substituição do cimento.

O consumo de água foi estabelecido com base nas experiências com os concretos auxiliares, observando-se que um parâmetro muito seguro para estabelecer o consumo de água, dentro da mesma família de concretos e para variações não muito amplas de consumo, é a relação água/materiais secos.

O consumo de cimento adotado, Tabela 6, para as três dosagens foi estabelecido CBC1, CBC2 e CBC3 com base

nas experiências com os concretos auxiliares e partindo do limite apresentado pela norma ABNT NBR 12655:2015 para a classe de Agressividade ambiental II de 260  $kg/m^3$ .

Tabela 6 – Composição e parâmetros do CAD com baixo consumo de cimento, CBC

Materiais ( $kg/m^3$ )	CBC1	CBC2	CBC3
Cimento	327,00	300,00	325,00
Sílica	49,05	45,00	48,75
Areia Fina	816,40	833,40	855,40
Fíler de Calcário	98,10	90,00	97,50
Brita 0 (Basalto)	875,40	893,20	861,00
Água	130,80	120,00	130,00
Aditivo	7,80	12,00	7,80
Massa específica (Fresco)	2304,55	2293,60	2325,45
A/C	0,40	0,40	0,40
SA/C	15,00%	15,00%	15,00%
FC/C	0,30	0,30	0,30
SP/C	2,39%	4,00%	2,40%
Vargamassa	62,01%	61,06%	62,97%

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros das dosagens dos concretos de referência.

Tabela 7 – Composição e parâmetros dos Concretos de Referência, CR

Material	CR1	CR2
Cimento ( $kg/m^3$ )	426,10	426,10
Areia Fina ( $kg/m^3$ )	685,10	685,10
Fíler de Calcário ( $kg/m^3$ )	–	146,90
Brita 0 (Basalto) ( $kg/m^3$ )	1111,20	1111,20
Água ( $kg/m^3$ )	255,60	247,70
Aditivo ( $kg/m^3$ )	5,50	5,50
A/C	0,60	0,45
SA/C	–	–
FC/C	–	0,34
SP/C	1,29	1,29
Água/aglomerante	0,60	0,45
Água/materiais secos	11,50%	10,45%
Vargamassa	50%	53,10%

Devido ao baixo consumo de cimento e com as relações água/cimento dos três concretos em análise bem próximos ao limite da norma ABNT NBR 12655:2015, para a classe de agressividade ambiental II, decidiu-se não aumentar mais o consumo de água para se atingir o espalhamento esperado. Com isso, justifica-se o elevado consumo de superplastificante.

#### 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em seguida são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados, tanto no estado fresco como no endurecido. Na apresentação dos resultados é descrita, inicialmente, a caracterização do Concreto de alto desempenho com baixo consumo de cimento

##### 4.1 Concreto no estado fresco

Na Tabela 8 são apresentados os dados que apontam as características dos concretos em análise no estado fresco, respectivamente, do concreto de referência e do CAD com baixo consumo de cimento. Os valores estimados a serem

obtidos indicados por diversos autores são apenas para orientar a dosagem do CAA, entretanto variam entre diversos pesquisadores (TUTIKIAN, 2004; ALMEIDA FILHO, 2006; REBMANN, 2011) e instituições e não devem ser adotados como valores absolutos. Com as variedades de materiais disponíveis no mercado é possível obter um bom concreto que fuja, em alguns ensaios, dos intervalos apresentados.

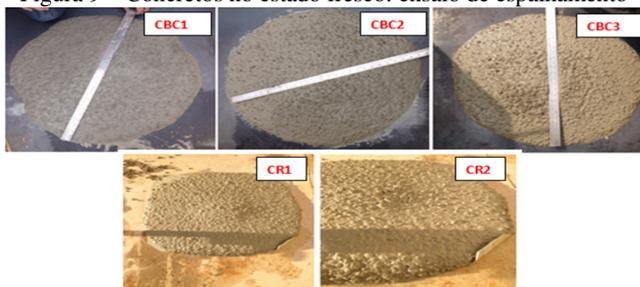
Tabela 8 – Caracterização dos concretos de referência em estado fresco

Propriedades	Limites	CBC1	CBC2	CBC2
Slump-flow, $d_f$ (cm)	$60 \leq d_f \leq 80$	62,00	68,00	65,00
Caixa L, $h_2/h_1$ *	$\geq 0,80$	0,80	0,85	0,83
Caixa L, $t_{20}$ (s)	$t_{20} \leq 2$	1,61	1,50	1,66
Caixa L, $t_{40}$ (s)	$t_{40} \leq 4$	3,20	3,60	3,80
Funil V, $t_v$ (s)	$5 \leq t_v \leq 10$	7,02	9,05	8,36
Propriedades	Limites	CR1	CR2	
Slump-flow, $d_f$ (cm)	$60 \leq d_f \leq 80$	65,00	63,00	
Caixa L, $h_2/h_1$ *	$\geq 0,80$	0,88	0,85	
Caixa L, $t_{20}$ (s)	$t_{20} \leq 2$	1,67	1,62	
Caixa L, $t_{40}$ (s)	$t_{40} \leq 4$	3,10	3,60	
Funil V, $t_v$ (s)	$5 \leq t_v \leq 10$	8,00	9,12	

Todos os concretos ensaiados apresentaram fluidez elevada. Mesmo assim apresentaram grande coesão, sem qualquer indício de segregação. Na Figura 9 são ilustrados os concretos no estado fresco, com evidência da alta fluidez sem segregação, teor de argamassa adequado e bom aspecto de acabamento.

Devem-se justificar os espalhamentos bem próximos ao limite mínimo apresentado pela norma ABNT NBR 15823:2010, de 60 cm. Devido ao baixo consumo de cimento decidiu-se não aumentar mais o consumo de água, pois os traços apresentavam indícios de início de exsudação. Este é um problema que se encontra ao utilizar consumos de cimento e, conseqüentemente, de finos muito baixos.

Figura 9 – Concretos no estado fresco: ensaio de espalhamento



Devem ser justificados os espalhamentos bem próximos ao limite mínimo apresentado pela norma ABNT NBR 15823: 2010 de 60 cm. Devido ao baixo consumo de cimento decidiu-se não aumentar mais o consumo de água, pois os traços apresentavam indícios de início de exsudação. Este é um problema que se encontra ao utilizar consumos de cimento e, conseqüentemente, de finos muito baixos.

Neste caso os valores de espalhamento encontrado não significaram qualquer prejuízo em termos de trabalhabilidade ou acabamento, mas, caso fosse

necessário maior abatimento, uma alternativa seria realizar ajustes nos demais finos presentes, possivelmente com consumo maior de pó de calcário. Vale dizer que a ocorrência de exsudação é sempre indesejável, devendo ser evitada, pois proporciona perda de resistência.

#### 4.2 Concreto no estado endurecido

Os resultados dos ensaios mecânicos (resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral) do concreto endurecido são apresentados a seguir, com o intuito de evidenciar os ganhos de desempenho obtidos com as técnicas aplicadas, Tabela 9.

Por meio dos ensaios mecânicos prova-se que é possível atingir resistências elevadas mesmo com o consumo de cimento Portland reduzido. Boa parte dos resultados, a compressão média aos 28 dias atingiu níveis superiores a 50 MPa.

É relevante mencionar que o concreto com mais baixo consumo de cimento (CBC2) com 300 kg/m<sup>3</sup>, apesar de ter relação água/aglomerante superior ( $a/agl. = 0,47$ ) que o concreto de referência CR2 ( $a/agl. = 0,45$  e consumo acima de 420 kg/m<sup>3</sup>), atingiu resistência bem próxima aos 28 dias e foi superior do CR1, onde apresentou resistência média à compressão aos 28 dias igual a 51,73 MPa, ou seja, o CBC 2 com aproximadamente 30% de cimento a menos que o CR1 apresentou 7% superior de resistência à compressão. Isto pode ser justificado pelo uso do superplastificante que contribui para uma boa dispersão das partículas. Nos concretos de referência a ausência de finos e baixo consumo de superplastificante prejudicou a dispersão das partículas menores e, conseqüentemente, dificultando a hidratação do cimento.

Tabela 9 – Comportamento dos corpos de prova dos concretos de aos 28 dias

	CBC1	CBC2	CBC3	CR1	CR2
Resistência à compressão (MPa)					
CP1	49,78	55,61	50,99	52,21	64,78
CP2	50,94	55,63	51,66	51,34	61,7
CP3	51,05	54,18	50,99	51,65	61,9
$f_{cm}$ (MPa)	50,59	55,14	51,21	51,73	62,79
$\sigma^*$ (MPa)	0,70	0,82	0,39	0,44	1,72
Resistência à tração diametral (MPa)					
CP1	4,75	4,81	5,13	5,74	7,13
CP2	5,03	4,91	5,16	5,65	6,79
CP3	4,89	4,89	5,18	5,68	6,81
$f_{ctm}$ (MPa)	4,89	4,87	5,15	5,69	6,91
$\sigma^*$ (MPa)	0,14	0,05	0,02	0,05	0,19
Módulo de Elasticidade (GPa)					
CP1	43,40	46,60	41,70	42,60	44,80
CP2	42,30	47,00	42,80	40,00	44,30
CP3	42,70	46,80	42,00	39,40	43,20
$E_{cm}$ (GPa)	42,80	46,80	42,20	40,70	44,10
$\sigma^*$ (GPa)	0,60	0,20	0,60	1,70	0,80
	CBC1	CBC2	CBC3	CR1	CR2
$f_{cm}$ (MPa)	50,59	55,1	51,21	51,7	62,8
$\sigma f_{ctm}$ (MPa)	4,89	4,87	5,15	5,69	6,91
$\sigma E_{cm}$ (GPaGPa)	42,8	46,8	42,2	40,7	44,1

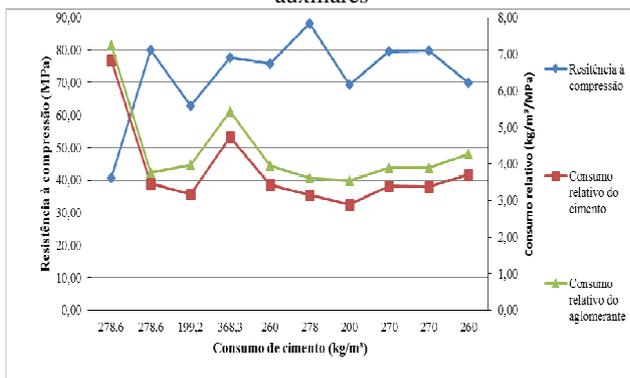
$\sigma =$  Desvio Padrão

Além da maior resistência, que presume menor porosidade e zona de interface melhorada, o que aumenta o módulo de elasticidade, este é fortemente influenciado pelas características elásticas dos agregados. Nos concretos com baixo consumo de cimento tem-se maior proporção de agregados e menor porosidade, o que acaba aumentando o módulo de elasticidade destes concretos, justifica-se, portanto, tal comportamento apresentado.

Comparando os consumos relativos obtidos com os divulgados em pesquisas nacionais e internacionais pode-se dizer que se tratam de resultados em níveis de altíssimo desempenho. Comparando com 604 resultados nacionais e 981 internacionais compilados por Daminieli *et al.* (2010) pode-se dizer que foi atingido um valor satisfatório ao estabelecer consumo de materiais cimentícios de 6,26 (kg/m<sup>3</sup>)/MPa. O mínimo observado encontra-se por volta dos 5,00 (kg/m<sup>3</sup>)/MPa, o que ocorre em concretos com resistências acima de 50MPa (DAMINIELI *et al.*, 2010). Esses resultados, embora sejam pouco representativos devido à pequena quantidade de corpos de prova avaliados, indica, que há potencial para futuras evoluções, tratando claramente de resultados promissores. Vale lembrar que para a elaboração destes concretos não são necessárias metodologias sofisticadas, nem materiais que não possam ser encontrados com facilidade no mercado nacional.

Alguns concretos auxiliares foram executados para verificar a trabalhabilidade obtida, a influência de alguns parâmetros, analisar a potencialidade de redução do consumo de cimento, procedimento de mistura, o consumo de cimento, a quantidade de água necessária, alternativas de empacotamento, tipos de aditivos, teores de aditivos e eliminação de alguns materiais (Figura 10).

Figura 10 – Resistência à compressão aos 28 dias e consumos relativos de cimento e aglomerantes para os concretos auxiliares



### 4.3 Indicadores de consumo de cimento

De acordo com o que foi apresentado na Seção 2: Indicadores de baixo consumo de cimento, vários indicadores podem ser empregados para se avaliar o desempenho do cimento consumido. Nesta pesquisa será utilizada a resistência à compressão como parâmetro principal de avaliação de desempenho. Este parâmetro é avaliado em face do consumo de cimento, consumo total de materiais cimentícios, consumo de clínquer e emissão aproximada de CO<sub>2</sub>.

Na Tabela 10 estão resumidos os consumos para volume de 1 m<sup>3</sup> das diversas dosagens dosagens. O teor de clínquer no CPV ARI é de 95%. De acordo com Pereira (2010), a emissão de CO<sub>2</sub> para cimento CP V-ARI é estimado em 0,84 kg de CO<sub>2</sub> por kg de clínquer.

Tabela 10 – Consumos de cimento, material cimentício, clínquer e emissão de CO<sub>2</sub> para as cinco dosagens analisadas

Consumo	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )				
	CR1	CR2	CBC1	CBC2	CBC3
Cimento	426,10	426,10	327,00	300,00	325,00
Cimentícios	426,10	426,10	352,00	339,00	350,00
Clínquer	404,80	404,80	310,65	285,00	308,75
CO <sub>2</sub>	340,03	340,03	260,95	239,40	259,35

A partir destes consumos e utilizando os valores de resistência à compressão obtidos nas idade analisada, pode-se calcular os consumos relativos para cada dosagem, Tabela 11.

Tabela 11 – Consumos de cimento, material cimentício, clínquer e emissão de CO<sub>2</sub> para as três dosagens analisados relativos à resistência à compressão ((kg/m<sup>3</sup>)/MPa)

Idade	Consumo	CR1	CR2	CBC1	CBC2	CBC3
28 dias	Cimento	8,24	6,79	6,46	5,44	6,32
	Cimentícios	8,24	6,79	7,43	6,26	7,27
	Clínquer	7,83	6,45	6,14	5,17	6,00
	CO <sub>2</sub>	6,58	5,42	5,28	4,45	5,16

Nota-se, em geral, que os consumos relativos de cimento aos 28 dias ficaram entre de 5,44 e 6,32 kg·MPa/m<sup>3</sup> por MPa para os concretos com baixo consumo de cimento, enquanto os concretos de referências de 6,79 a 8,24 kg·MPa/m<sup>3</sup> por MPa. Os resultados (Tabela 11) mostram, além do excelente desempenho obtido em termos de baixo consumo relativo, a dosagem CBC2 apresentou valor próximo ao melhor resultado (4,3 kg·MPa/m<sup>3</sup> por MPa<sup>3</sup>) detectado pelo levantamento de Daminieli *et al.* (2010). Nota-se o bom resultado obtido, principalmente as dosagens com baixo consumo de cimento estando abaixo do limite inferior da grande maioria dos resultados coletados. Os concretos de referência ficaram contidos dentro da grande nuvem média.

Realizando uma análise de consumo consumo relativo, utilizando como parâmetro de desempenho a resistência à tração por compressão diametral, chega-se a valores de consumo de cimento entre 19 e 23 kg·MPa/m<sup>3</sup> por MPa para os concretos com baixo consumo de cimento e 52 a 74 kg·MPa/m<sup>3</sup> por MPa para os concretos de referência. Novamente nota-se o bom desempenho dos traços executados. O mesmo pode ser concluído em análise baseada no módulo de elasticidade, obtendo-se valores de módulo de elasticidade superiores aos de concreto de referência mesmo com menores consumos de cimento.

De modo geral, os concretos em estudo apresentaram ótimo desempenho de consumo, tanto em termos de consumo de material cimentício como em termos de relação a emissão de CO<sub>2</sub>, além do consumo total de cimento reduzido, sendo possível alcançar concretos com resistência à compressão média 55,14 MPa aos 28 dias, com uma emissão de 4,45 kg/m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> e com consumo de cimento de 300 kg/m<sup>3</sup>.

Comparando com os concretos de referência indicam que estes resultados são sensivelmente melhores, chegando os melhores resultados a representar redução de consumo relativo de cimento e clínquer de até 20,44%.

## CONCLUSÃO

Mediante aos valores obtidos pode-se concluir, que o bom desempenho mecânico dos concretos em análise pode ser atribuído à melhora da zona de interface dos agregados com a pasta e refinamento de sua estrutura de poros. O uso de aditivos de alto poder de plastificação e redução de água é necessário para obter relações água/aglomerante suficientemente baixos mesmo com os baixos consumos de cimentos adotados.

Com relação aos ensaios mecânicos do concreto no estado endurecido conclui-se, que as amostras adotadas foram adequadas para correlacionar as resistências obtidas entre os concretos estudados em função do consumo de cimento empregado. No que se refere ao comportamento dos concretos utilizados pode-se concluir, que os valores obtidos pelos concretos com baixo consumo de cimento, para algumas dosagens, são eficazes, e provam que é possível a elaboração de elementos estruturais com baixo consumo de cimento e ainda assim permanecendo a qualidade mecânica do concreto.

Quanto às variações do consumo de cimento relacionadas ao processo de dosagem do concreto, os números levantados, ainda que sobre dados de apenas três dosagens de concreto, demonstram potencial grandioso para a melhora –ou piora– da eficiência do uso dos ligantes.

Deve ser considerado, ainda, o efeito da dosagem na durabilidade. A influência do teor de cimento na durabilidade não é abordada neste artigo e deve ser levada em consideração. No entanto, Wassermann et al. (2009) mostram que os indicadores de durabilidade do concreto não são afetados (profundidade de carbonatação, fissuração) ou são até mesmo melhorados (penetração de cloretos, coeficiente de absorção capilar) quando o teor de ligantes é reduzido, dentro dos limites por eles investigado (até 180 kg/m<sup>3</sup>).

## REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Serra, G. G. São Paulo: Pini, 2000.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006, 350 p.

ARIMA, H.; SADAKANE, M.; AYANO, T.; SAKATA, K. (2002). Experimental study on stable production of self-compacting high performance concrete. *In: Concrete Structures in the 21<sup>st</sup> Century*: Proceedings of the first FIB Congress. Osaka. Japan, March 2002. Proceedings..., published by Japan Pre-stressed Concrete Engineering

Association & Japan Concrete Institute, Osaka, 2002, [CD-ROM].

BARBOZA, L. S. **Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável**. 2016. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

**BRASIL MINAS**. Pó de calcário, Ficha técnica do produto, 2015. Disponível em: <<http://www.brasilminas.net/calcario>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

CEMBUREAU – EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. 2010. Activity report 2009, Brussels, Belgium, 2010.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. **Measuring the eco-efficiency of cement use**. Cement and concrete Composites, v. 32, n. 8, p. 555-562, Sept. 2010.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T, (1998). **Fresh Concrete: A Herschel-Bukley material**. Material and structures, v. 31, n. 211, p. 494-498, 1998. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480474>.

GETTU, R.; AGULLÓ, L. Estado del arte hormigón autocompactable y su caracterización (parte I). **Cemento Hormigón**, n. 861, p. 50-67, Abril, 2004.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

KUPERMAN, S. C. Concreto massa convencional e compactado com rolo para barragens. *In: ISAIA, G, C. (ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, Cap. 41, p. 1260-1295, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã ou rocha ou poliamida**. 2009. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011, 211 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.

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

TECNOSIL (2015). Sílica Ativa (Ficha técnica do produto). Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

**VDZ** – Verein Deutscher Zementwerke. Zement-Taschenbuch. 51. Ed. Düsseldorf, Alemanha: VerlagBau+Technik, 2008, 912 p.

WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? **Materials and Structures**, v. 42, n. 7, p. 973-982, 2009. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9436-0>.