

## **Estudo do teor de metacaulim em Concretos de Alto Desempenho (CAD).**

*Study of metakaolin content in High Performance Concretes (HPC)*

*Estudio del contenido de metacaolín en hormigones de altas prestaciones (HAP)*

### **Alan Henrique Vicentini**

Mestrando, UNESP, Brasil  
vicentini.alanh@gmail.com

### **Tiago Armado Camara**

Graduando, UNESP, Brasil  
tiagocamara14@gmail.com

### **Mauro Mitsuuchi Tashima**

Professor Assistente Doutor, UNESP, Brasil  
mmtashima@dec.feis.unesp.br

## RESUMO

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um produto em grande ascensão no mundo, sendo alvo de várias pesquisas e empresas que necessitam de produtos com melhor qualidade e desempenho. Este projeto tem por finalidade indicar uma porcentagem ideal para substituição de parte do cimento Portland por Metacaulim, indicando também a melhor dosagem dos materiais presentes na região a ser utilizada para a obtenção do CAD. O método de dosagem utilizado foi baseado no método proposto por O'Reilly Díaz. Foi utilizado o Metacaulim como substituição parcial do cimento Portland nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento, assim como foi adicionado sílica ativa como adição ao concreto na proporção de 8% da massa total de aglomerante. O cimento Portland utilizado foi o CP V-ARI. Foi confeccionado um CAD referência, sem a adição de Metacaulim. Foram realizados os ensaios de Slump Test em todos os CADs. Os ensaios de resistência à compressão simples serão realizados com os concretos na idade de 7, 28, 60 e 90 dias e o ensaio de absorção de água será realizado com os concretos na idade de 28 dias. Com os resultados dos ensaios já realizados temos que houve uma melhora de 21,5% de resistência à compressão quando comparado o M10 com o M0 e houve uma diminuição de 73,34% na absorção de água comparando o M10 ao M0. O traço M10 possuiu o melhor custo benefício comparado com o M0.

**PALAVRAS-CHAVE:** CAD, Adição, Metacaulim.

## ABSTRACT

The High Performance Concrete (HPC) is a product in great rise in the world, being the target of several research and companies that need products with best quality and performance. This design is intended to indicate a percentage ideal to replace part of the Portland cement with metakaolin, also indicating the best dosage of the materials present in the region to be used for obtaining HPC. The assay method used was based on the method proposed by O'Reilly Diaz. Metakaolin was used as a partial replacement of Portland cement in the proportions of 5, 10, 15 and 20% relative to the mass of cement and silica fume was added as an additive to the concrete in a proportion of 8% of the total weight of binder. The Portland cement used was CP V-ARI. A HPC reference was made without the addition of metakaolin. The Slump Test assays were performed on all HPCs. compressive strength tests are performed with concrete at the age of 7, 28, 60 and 90 days and the water absorption test is performed with the concrete at the age of 28 days. The results of the tests performed we have there was a 21.5% improvement in compressive strength compared with M0 to M10 and there was a 73.34% decrease of the water absorption compared M10 to M0. The trace M10 possessed the best value compared to M0.

**KEYWORDS:** HPC, Addition, Metakaolin.

## ABSTRACTO

El hormigón de alto rendimiento (HAR) es un producto de gran aumento en el mundo, siendo el blanco de varias investigaciones y empresas que necesitan productos con la mejor calidad y rendimiento. Este diseño está destinado a indicar un porcentaje ideal para reemplazar parte del cemento Portland con metacaolín, indicando también la mejor dosificación de los materiales presentes en la región para ser utilizado para la obtención de HAR. El método de ensayo utilizado se basó en el método propuesto por O'Reilly Diaz. Metacaolín fue utilizado como sustitución parcial del cemento Portland en las proporciones de 5, 10, 15 y 20% respecto a la masa de cemento y humo de sílice se añadió como un aditivo para el hormigón en una proporción de 8% del peso total de aglutinante. El cemento Portland utilizado fue CP V-ARI. Se hizo una referencia HAR sin la adición de metacaolín. los ensayos de comprobación de deslizamiento se realizaron en todos los HARs. pruebas de resistencia a la compresión se realizan con hormigón a la edad de 7, 28, 60 y 90 días y la prueba de absorción de agua se lleva a cabo con el hormigón a la edad de 28 días. Los resultados de las pruebas realizadas tenemos hubo una mejora del 21,5% en resistencia a la compresión en comparación con M0 a M10 y hubo una disminución 73,34% de la absorción de agua en comparación M10 a M0. La traza M10 poseía el mejor valor en comparación con M0.

**PALABRAS-CLAVE:** HAR, adición, metacaolín.

## INTRODUÇÃO

A área de construção civil está crescendo consideravelmente no mundo, com construções cada vez mais sofisticadas e complexas. Para isso faz-se necessário maior demanda de concreto. Essa demanda fez com que o cimento Portland se tornasse o material de construção de maior consumo no mundo (VALVERDE, 2001).

Para a produção do concreto são gerados vários resíduos que causam vários impactos ambientais negativos. Estima-se que cerca de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas venham da construção civil, conforme o MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2010). A indústria do cimento, principal material do concreto, é responsável pela emissão de 5% de gases de efeito estufa no mundo, segundo Bittencourt (2011).

O processo de evolução do concreto segundo Aïtcin (2000), aconteceu a partir de 1960, em que os concretos chegavam à resistência de 53 MPa e na década de 1970 já produziam concretos com até 70 MPa de resistência mecânica. Para chegar a essas resistências só foi possível com o surgimento de novos materiais. Como por exemplo, o cimento Portland com adições minerais, que tinha que apresentar bom desempenho mecânico e reológico.

Para isso inseriu-se as adições minerais a base de pozolânas para substituição parcial do cimento. Uma das adições que já eram usadas muito antes da criação do cimento Portland eram as argilas calcinadas (ZAMPIERI, 1993). Com a necessidade de materiais que fossem sustentáveis e proporcionassem um melhor desempenho do concreto com uma diminuição da quantidade de cimento as argilas calcinadas voltaram a ser alvo dos estudos atuais.

O metacaulim é um material pozolânico obtido por um processo industrial de ativação térmica (calcinção) entre 600-850°C e moagem de argilas caulínicas e caulins (MUNHOZ; BATTAGIN; SILVA BATTAGIN, 2010). Para sua produção há uma menor emissão de gases de efeito estufa, colaborando para a sustentabilidade da área de construção civil. Segundo Lacerda (2005), a substituição de parte do cimento Portland por Metacaulim e a adição de sílica aumentam as resistências mecânicas do concreto, da durabilidade, e reduzem a taxa de corrosão, além de ser mais viável economicamente e ambientalmente. De acordo com Borges et al. (2014) a produção de cimento Portland emite 8,5 vezes mais CO<sub>2</sub> e demanda 5 vezes mais energia que a produção de Metacaulim.

O CAD apresenta características diferentes do concreto convencional como elevada resistência, alto módulo de elasticidade, alta trabalhabilidade, alta durabilidade que se faz devido à baixa permeabilidade e a alta resistência a ataques químicos. Segundo Mehta & Aïtcin (1990) o CAD é constituído por cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, adições minerais, aditivos químicos e água.

## OBJETIVOS

Esta pesquisa apresenta como finalidade estudar a adição de metacaulim na produção de CAD, para se analisar o comportamento do CAD com relação à resistência à compressão nas idades de

7, 28, 60 e 90 dias e à absorção de água na idade de 28 dias, utilizando para a dosagem dos materiais o método O'Reilly Díaz.

## **METODOLOGIA**

### **MATERIAIS**

Para a produção de concreto de alto desempenho foram utilizados: cimento Portland CP V - ARI como aglomerante, areia média natural como agregado miúdo, brita basáltica como agregado graúdo e aditivo superplastificante. Foram utilizados também metacaulim e sílica ativa como adições minerais.

### **DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**

O método de dosagem utilizado no estudo foi o método O'Reilly Díaz, para concretos de elevado desempenho, sendo utilizado o método para dosar concretos de consistência normal proposto pelo autor Díaz (1998).

### **ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE**

Para determinação da quantidade ideal de superplastificante foi realizado o ensaio de compatibilidade aditivo-cimento usando o método de funil de Marsh (NBR 7682/83). Após a escolha do aditivo a ser usado na mistura foi determinado o valor de saturação para a pasta.

### **COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO E PONTO DE SATURAÇÃO**

Para a realização do ensaio foram feitas 3 pastas de cimento, com uma relação água/aglomerante de 0,30, em cada pasta foi adicionada um tipo de aditivo no valor de 1% da massa de aglomerante. Foram feitas medições nos tempos de 5, 15, 30 e 45 minutos após o término da etapa anterior, sendo estas medições realizadas com o Funil de Marsh pela NBR 7682/83.

Para o ponto de saturação do aditivo foram confeccionadas cinco pastas, uma para o concreto referência, em que será usado o cimento, a sílica ativa, a quantidade de água mínima que foi utilizada na mistura, e as demais pastas tiveram a substituição de parte do cimento por Metacaulim nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento. No ensaio de funil de Marsh, foi cronometrado o tempo que a mistura leva para escoar 1000 mL no equipamento.

Figura 1: Ensaio de compatibilidade cimento aditivo e saturação do aditivo superplastificante (Funil de Marsh)



Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

### DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÓTIMA DOS AGREGADOS

Nesta etapa determinou-se a melhor relação areia/brita, de forma que a mistura possua o menor índice de vazios possível, de acordo com a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Foram confeccionadas 6 misturas, variando de 35% a 60% de areia em massa. As misturas descritas estão na Tabela 1.

Tabela 1: Misturas de agregados

Mistura	1	2	3	4	5	6
Teor de areia (%)	35	40	45	50	55	60
Teor de brita (%)	65	60	55	55	45	40

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

### DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA NECESSÁRIA PARA A CONSISTÊNCIA REQUERIDA

Foi fixada uma relação água/aglomerante inicial de 0,30, sendo determinado o consumo de cimento de forma empírica, em que neste caso foi usada uma quantidade de 430 Kg de cimento para a confecção de 1m<sup>3</sup>de concreto, onde este valor foi obtido pela experiência obtida em pesquisas anteriores. Esta quantidade de cimento foi escolhida com a finalidade de obter os valores de resistências requeridos pela pesquisa, onde se tratando de um CAD são necessários valores acima de 55 MPa. Foi utilizada também nesta mistura a sílica ativa na quantidade de 8% em relação à massa de cimento e o aditivo superplastificante na quantidade determinada pelo ensaio do funil de Marsh.

Para o procedimento foi confeccionado o traço com os materiais descritos acima e adicionando-se inicialmente uma quantidade de água menor que a pré-fixada, determinando-se o abatimento,

caso não fosse obtido o abatimento desejado, seria adicionado mais água a mistura, até que fosse obtido o abatimento desejado. Foi encontrada a quantidade de água necessária quando fosse alcançada a consistência desejada, onde no caso desta pesquisa é de  $160 \pm 10$  mm.

Com a mistura realizada com a quantidade de água necessária para a consistência requerida foram moldados seis corpos-de-prova para cada idade e determinado a resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Esses dados serviram para determinar o coeficiente "A" do agregado graúdo. Com esta mesma mistura foi realizada o ensaio de ar incorporado para a obtenção do volume de ar presente na mistura.

### DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA "A" DO AGREGADO GRAÚDO

Com os ensaios de resistência a compressão realizados, é feita uma média da resistência à compressão aos 28 dias, obtida com corpos-de-prova, e a resistência à compressão aos 28 dias do cimento empregado (indicado pelo fabricante). A característica "A" do agregado foi determinada pela equação seguinte:

$$A = \frac{R_b}{R_c * (M_1 * V + M_2)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde A é característica do agregado graúdo,  $R_c$  é a resistência à compressão do cimento utilizado, em Mpa,  $M_1$  e  $M_2$  são os valores dependentes da consistência do concreto, V é o valor dependente da relação água cimento e  $R_b$  é a resistência obtida do concreto. Os valores  $M_1$  e  $M_2$  são fornecidos pela tabela 2, indicada pelo autor, assim como o valor de V, apresenta na tabela 3.

Tabela 2: Valores de M1 e M2 em função do abatimento.

ABATIMENTO (mm)	VALOR M	ABATIMENTO (mm)	VALOR M
30	$M_1=4,4447$ $M_2=0,2930$	100	$M_1=4,0219$ $M_2=0,3572$
40	$M_1=4,3843$ $M_2=0,3014$	110	$M_1=3,9615$ $M_2=0,3674$
50	$M_1=4,3239$ $M_2=0,3101$	120	$M_1=3,9011$ $M_2=0,3780$
60	$M_1=4,2635$ $M_2=0,3189$	130	$M_1=3,8407$ $M_2=0,3888$
70	$M_1=4,2031$ $M_2=0,3281$	140	$M_1=3,7804$ $M_2=0,4000$
80	$M_1=4,1427$ $M_2=0,3375$	150	$M_1=3,7199$ $M_2=0,4115$
90	$M_1=4,0823$ $M_2=0,3472$	160	$M_1=3,6595$ $M_2=0,4233$

Fonte: Díaz (1998).

Tabela 3: Valores de V em função da relação a/c.

A/C	VALOR "V"	A/C	VALOR "V"	A/C	VALOR "V"	A/C	VALOR "V"	A/C	VALOR "V"
<b>0,3</b>	0,5229	<b>0,4</b>	0,3979	<b>0,5</b>	3010	<b>0,6</b>	0,2218	<b>0,7</b>	0,1549
<b>0,31</b>	0,5086	<b>0,41</b>	0,3872	<b>0,51</b>	0,2924	<b>0,61</b>	0,2147	<b>0,71</b>	0,1487
<b>0,32</b>	0,4946	<b>0,42</b>	0,3768	<b>0,52</b>	0,284	<b>0,62</b>	0,2076	<b>0,72</b>	0,1427
<b>0,33</b>	0,4815	<b>0,43</b>	0,3665	<b>0,53</b>	0,2757	<b>0,63</b>	0,2007	<b>0,73</b>	0,1367
<b>0,34</b>	0,4685	<b>0,44</b>	0,3565	<b>0,54</b>	0,2676	<b>0,64</b>	0,1938	<b>0,74</b>	0,1308
<b>0,35</b>	0,4559	<b>0,45</b>	0,3465	<b>0,55</b>	0,2556	<b>0,65</b>	0,187	<b>0,75</b>	0,1249
<b>0,36</b>	0,4437	<b>0,46</b>	0,3372	<b>0,56</b>	0,2518	<b>0,66</b>	0,1805	<b>0,76</b>	0,1192
<b>0,37</b>	0,4318	<b>0,47</b>	0,3279	<b>0,57</b>	0,2441	<b>0,67</b>	0,1739	<b>0,77</b>	0,1135
<b>0,38</b>	0,4262	<b>0,48</b>	0,3186	<b>0,58</b>	0,2366	<b>0,68</b>	0,1675	<b>0,78</b>	0,1079
<b>0,39</b>	0,4089	<b>0,49</b>	0,3098	<b>0,59</b>	0,2291	<b>0,69</b>	0,1612	<b>0,79</b>	0,1024

Fonte: Díaz (1998).

## DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO E PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

Durante os ensaios descritos, foi utilizada uma quantidade aproximada de cimento, segundo a experiência; no entanto nesta etapa podemos determiná-la exatamente pela seguinte equação:

$$V = \frac{R_{b2} \cdot M_2}{R_c \cdot A} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde V é o valor dependente da relação água/cimento, M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub> são valores dependentes da consistência do concreto (tabela 2), A é a característica do agregado graúdo, R<sub>c</sub> é a resistência à compressão do cimento utilizado, em Mpa e R<sub>b2</sub> é a resistência à compressão que queremos obter do concreto. Determinado o valor de V, voltamos à tabela fornecida pelo autor e encontramos a relação água/aglomerante w adequada, sendo determinada pela equação:

$$c = \frac{a}{w} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde c é a quantidade de cimento em Kg, 'a' é a quantidade de água em litros e w é a relação água/aglomerante.

Conhecidas as quantidades de água e de cimento necessárias para obter a resistência planejada, podemos calcular a quantidade de areia e brita para 1m<sup>3</sup> de concreto.

Considera-se que a soma dos volumes absolutos dos materiais componentes é igual a 1000L, assim:

$$V_p = 1000 - \left( \frac{c}{\gamma_c} + V_{ag} + V_{vazios} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Como se trata de um CAD será realizado ensaios de ar incorporado nas misturas confeccionadas para a obtenção do coeficiente “A” dos agregados. Com o volume dos agregados em litros, será obtida a massa dos mesmos pela equação abaixo:

$$\frac{\%A \cdot P_p}{\gamma_a} + \frac{\%B \cdot P_p}{\gamma_b} = V_p \text{ (Equação 5)}$$

Em que %A é a porcentagem da areia na mistura, %B é a porcentagem da brita na mistura,  $\gamma_a$  é a massa específica da areia,  $\gamma_b$  é a massa específica da brita,  $V_p$  é o volume dos agregados (areia e brita) em litros e  $P_p$  e a massa total dos agregados.

Com a massa total dos agregados na mistura, e com a relação ótima entre areia e brita, podemos obter as respectivas massas dos agregados para a mistura, concluindo assim o proporcionamento dos materiais para a mistura. Com isso deve-se realizar uma mistura com este proporcionamento e medir o abatimento, ajustando a quantidade de água final e se caso necessário, diminuir a quantidade de água.

## ENSAIOS

Os ensaios realizados no estado fresco e endurecido estão dispostos na Tabela 4.

**Tabela 4: Ensaios de caracterização dos concretos**

Ensaio	Norma respectiva	Idades
Teste de abatimento	NBR NM 67	Estado fresco
Teor de ar incorporado	NBR NM 47	Estado fresco
Resistência à compressão axial	NBR 5739	7, 28, 56 e 90 dias
Absorção de água por imersão	NBR 9778	28 dias

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

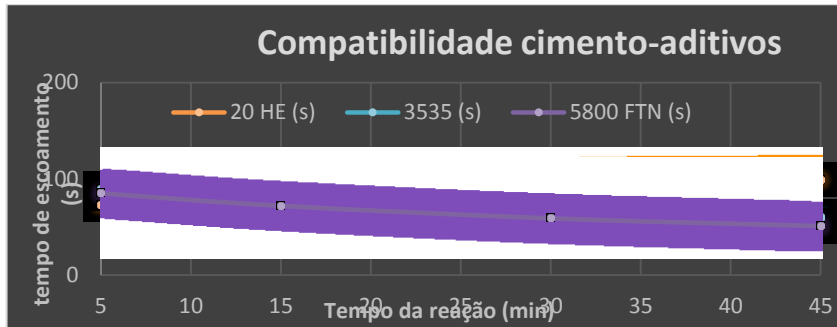
## RESULTADOS

### COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO E PONTO DE SATURAÇÃO

A Figura 2 indica os resultados do ensaio de compatibilidade cimento-aditivo.



Figura 2: Resultado do ensaio de Funil de Marsh para o ensaio de compatibilidade cimento-aditivo

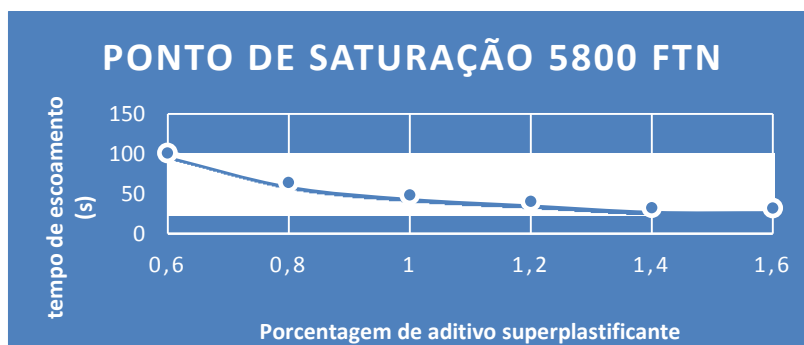


Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

Com o gráfico da Figura 2 é possível observar que o aditivo 5800 FTN e aditivo 3535 CB obtiveram uma melhora na fluidez da pasta de cimento com o passar do tempo de reação, o que não ocorreu com o aditivo 20 HE que obteve uma melhor fluidez com 5 minutos, mas com o passar do tempo de reação, sua fluidez atingiu tempos maiores que as medidas anteriores.

O aditivo superplastificante 5800 FTN foi o que obteve os melhores resultados de fluidez, comparado aos demais. A Figura 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de funil de Marsh com o aditivo superplastificante 5800 FTN, para determinação do ponto de saturação do aditivo.

Figura 3: Ensaio do funil de Marsh para determinação do ponto de saturação do superplastificante



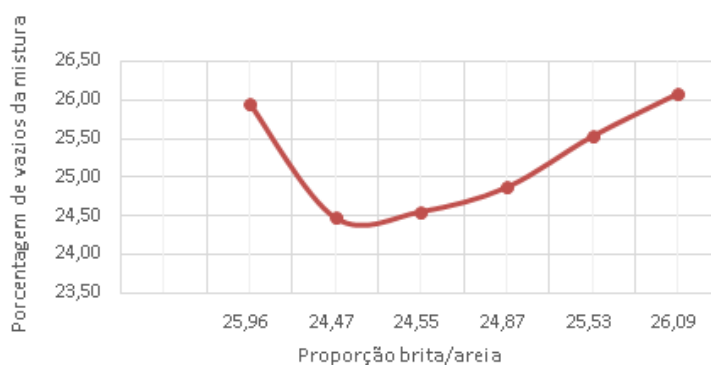
Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

É possível observar pela Figura 3 que a partir da porcentagem de 1,4% de aditivo não houve melhora no tempo de escoamento da pasta, que foi confeccionada com uma relação a/agl mínima que será usada nos traços de CAD, que é de 0,30. Para os traços do concreto referência confeccionados o valor de aditivo superplastificante deve ser 80% do ponto de saturação, sendo então para este caso o valor de 1,12% de aditivo superplastificante em relação a massa de aglomerante

**DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÓTIMA DOS AGREGADOS**

A Figura 4 indica o gráfico da porcentagem de vazios de cada mistura que foi produzida.

**Figura 4: Porcentagem de vazios das misturas de agregados produzidas**



Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

Pela Figura 4 temos que a melhor proporção da mistura entre areia e brita está entre 40:60 e 45:55. Com a figura 12 podemos obter que a proporção ótima entre os agregados é de 41,5:58,5 para massa de areia e brita respectivamente. Este resultado satisfaz as necessidades para a obtenção de uma alta resistência com um bom empacotamento das partículas no CAD.

**DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA NECESSÁRIA PARA A CONSISTÊNCIA REQUERIDA**

A Tabela 5 traz o traço de concreto confeccionado para determinação da quantidade de água necessária.

**Tabela5: Traço de concreto para determinação da quantidade de água necessária**

Consumo de materiais em quilograma por metro cúbico de concreto						
Traço	Cimento	Sílica ativa	Areia	Brita	Água	Superplastificante
M0inicial	430,00	34,40	821,42	1155,04	139,42	4,30

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

Com o traço acima foi obtida a consistência desejada com um slump de 16,5 cm. E realizando um ensaio de ar incorporado foi possível observar que o volume de ar da mistura se manteve com 20 litros por metro cúbico de concreto.

**DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA "A" DO AGREGADO GRAÚDO**

A Tabela 6 contém os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial do traço M0 inicial aos 7 e 28 dias, assim como a característica A do agregado, obtida de acordo com os resultados de compressão.

**Tabela 6: Resultados de resistência à compressão axial do traço M0 inicial e característica A do agregado graúdo**

Rb1 (resistência à compressão aos 28 dias) - MPa	Rc (resistência à compressão aos 7 dias) - MPa	M1	M2	v	A
75,16	41,90	3,6595	0,4233	0,5229	0,767611

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

**DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO E PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS**

A Tabela 7 contém os resultados obtidos pelas equações 2 e 3. O valor de w foi obtido por interpolação dos dados da tabela 3. A tabela 8 contém os traços dosados a partir dos resultados obtidos pela tabela 7. Os traços confeccionados possuem substituição de cimento por metacaulim nos teores de 0, 5, 10, 15 e 20%, nos traços M0, M5, M10, M15 e M20, respectivamente.

**Tabela 7: Resultados de resistência à compressão axial do traço M0 inicial e característica A do agregado graúdo**

Rc	M1	M2	A	Rb2	V	w	c (kg)	Volume de água (litros)
41,90	3,6595	0,4233	0,767611	70	0,47906	0,3319	388,70	129,00

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

**Tabela 8: Consumo de materiais (kg/m<sup>3</sup>) dos traços confeccionados**

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	Metacaulim	Sílica ativa
<b>M0</b>	388,70	838,24	1177,25	138,59	3,89	0,00	31,10
<b>M5</b>	369,26	838,24	1177,25	138,59	3,89	19,43	31,10
<b>M10</b>	349,83	838,24	1177,25	138,59	4,35	38,87	31,10
<b>M15</b>	313,28	845,94	1188,07	138,68	5,90	55,29	29,49
<b>M20</b>	258,00	863,58	1212,84	138,88	5,16	64,50	25,80

Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

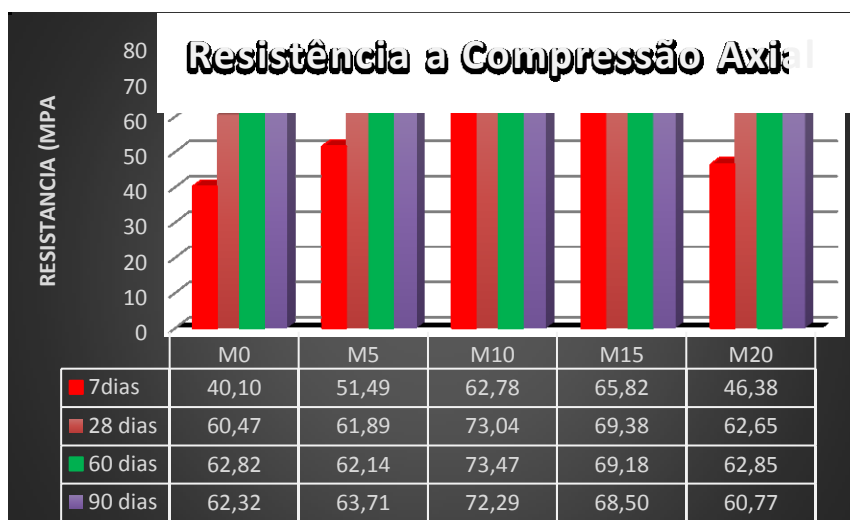
Os traços M15 e M20 foram confeccionados com relação água/aglomerante maior que a encontrada na determinação do consumo de cimento, pois a quantidade de aditivo utilizado já estava no máximo permitido pelo fabricante e não foi possível obter o valor da consistência desejada, com isso foi necessário aumentar a relação água/aglomerante para que obtivesse o

valor de slump necessário. Isso se deve ao fato de o Metacaulim possuir uma alta área específica, o que proporciona uma maior necessidade de água na mistura para que se obtenha a consistência desejada.

## RESULTADOS DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados de resistência à compressão e absorção de água por imersão estão dispostos da figura 5 e 6, respectivamente.

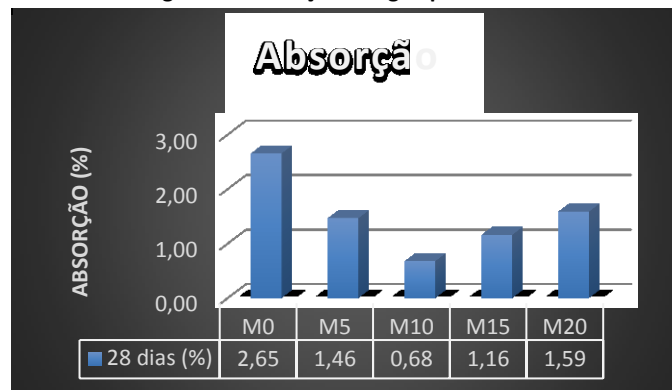
Figura 5– Resistência à compressão axial



Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

Com os resultados da Figura 5 podemos observar que todos os traços com substituição parcial de cimento por Metacaulim obtiveram resultados superiores que o M0, sendo o M10 com os melhores resultados comparando com o M0. Essa melhoria nos CADs com substituição parcial do cimento por Metacaulim se deve ao fato de o Metacaulim ser um material fino, o que proporciona um fechamento dos poros e uma maior compactação da mistura, que ocasiona uma diminuição nos espaços vazios, que são regiões de fragilidade no concreto, e com isso podemos obter maiores resistências. A propriedade pozolânica do Metacaulim também é um fator importante para o aumento da resistência dos concretos.

Figura 6 – Absorção de água por imersão



Fonte: ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR

Com a Figura 6 foi possível confirmar que para os CAD's a absorção é bem abaixo do convencional, sendo abaixo de 2% em média, e que com a presença de Metacaulim houve uma diminuição na absorção do concreto, comparado com o M0. Este fato se deve pela alta finura do Metacaulim, possibilitando um melhor arranjo entre as partículas da mistura, sendo auxiliado pela sílica ativa, pelo cimento CP V-ARI que possuem baixas granulometria e pelo método de dosagem O'Reilly Díaz que busca a menor quantidade de vazios entre os agregados.

## CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivos produzir concreto de alto desempenho utilizando metacaulim como substituinte parcial de cimento, de forma a se produzir um concreto com boas propriedades.

Foi possível aferir que o método de dosagem O'Reilly Díaz é de grande facilidade de aplicação, sendo parcialmente preciso quanto à previsão de resistência para o CAD. No entanto, o método proporcionou bons resultados de resistência mecânica e absorção de água, principalmente com a presença do Metacaulim, que ainda é um produto novo no mercado e vem ganhando força com a necessidade de maiores alternativas para a substituição de cimento.

## AGRADECIMENTO

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa estudantil concedida ao discente para o desenvolvimento do estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AİTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. **Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete.** ACI Materials Journal, v. 87, n. 2, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12821 – **Preparação de concreto em laboratório.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – **Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 67 – **Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do troco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

BITTENCOURT, F. (Belo Horizonte). **Metacaulim HP Ultra é a solução ideal em obras de grande porte.** 2011. Disponível em: <<http://www.waycarbon.com>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. de F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II).** Ambiente Construído, v. 14, n. 2, p. 153-168.

DÍAZ, Vitervo O.'Reilly. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho.** Pini, 1998.

GÜNEYISI, Erhan et al. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction And Building Materials.** Gaziantep, Turkey, p. 120-130. set. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812000943>>. Acesso em: 14 set. 2015.

GUTIERREZ, P. A.; CANOVAS, M. F. **High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning.** ACI materials journal, v. 93, n. 3, 1996.

HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume, capítulo 15, pg.440-470, 2005.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** 2011.

LACERDA, C. S. **Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos.** 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – **Cidades sustentáveis, urbanismo sustentável, construção sustentável.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel>> Acessado em: 15 julho 2014.

MUNHOZ, F. A. C.; BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. **Tendência da normalização de metacaulim para uso em concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais...** . Fortaleza: Ibracon, 2010. v. 1, p. 1 - 16.

VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. **Balanço mineral brasileiro,** 2001.

ZAMPIERI, V. A. Cimento portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico. 1993.