



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Rossignolo, João Adriano; Lorandi Oliveira, Ismael  
Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural  
Acta Scientiarum. Technology, vol. 29, núm. 1, 2007, pp. 55-60  
Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226518002>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural

João Adriano Rossignolo<sup>1\*</sup> e Ismael Lorandi Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador Sãocarlense, 400, 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil. <sup>2</sup>Curso de Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: jarossig@sc.usp.br

**RESUMO.** Este trabalho apresenta os resultados da avaliação das modificações promovidas pelo Metacaulim no desempenho das propriedades do concreto com agregados leves. Foi analisado o efeito do Metacaulim na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral, no módulo de deformação, na absorção de água por imersão e na carbonatação do concreto com agregados leves. Nos resultados obtidos verificou-se que a adição de Metacaulim melhorou significativamente o desempenho da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e da absorção de água por imersão e da carbonatação dos concretos leves.

**Palavras-chave:** concreto leve, agregado leve, metacaulim.

**ABSTRACT. Effect of metacaulim on the properties of structural lightweight concrete.** This paper deals with properties of lightweight aggregate concrete (LWAC) with Metacaulim, made with Brazilian lightweight aggregate (LWA). Compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and water absorption were tested. The inclusion of Metacaulim in the LWAC decreased water absorption and increased compressive strength and splitting tensile.

**Key words:** lightweight concrete, lightweight aggregate, metacaulim.

## Introdução

Nas três últimas décadas, ocorreu um grande desenvolvimento na tecnologia dos concretos estruturais devido, especialmente, à evolução das técnicas e equipamentos para estudo dos concretos e ao uso de novos materiais componentes. Esses novos materiais, dentre os quais se destacam os aditivos redutores de água e as adições minerais pozolânicas, possibilitaram melhorias significativas nas propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos. O desenvolvimento desses novos materiais resultou em um incremento da utilização dos chamados concretos de alto desempenho (CAD) (Zhang e Gjørv, 1991; Almeida, 1996; Paulon, 1996; Helene, 1999; Aïtcin, 2000).

Nos últimos anos, algumas pesquisas foram realizadas com o intuito de otimizar ainda mais algumas propriedades dos concretos de alto desempenho. Dentre elas, destaca-se a união das características otimizadas do CAD com a baixa massa específica dos concretos leves estruturais (CLE), obtendo-se, assim, o concreto leve de alto desempenho (CLAD).

A redução da massa específica do concreto, com a manutenção da resistência mecânica, propicia a redução do peso próprio da estrutura e, consequentemente, das cargas na fundação,

reduzindo, assim, o custo final da obra, especialmente com a utilização da tecnologia da pré-fabricação (Moreno, 1986; Slate *et al.*, 1986; Berner, 1991; Zhang e Gjørv, 1991; Holm e Bremner, 1994; Ikeda, 2000; Vieira e Gonçalves, 2000; Rossignolo e Agnesini, 2001; 2002 e 2005; Rossignolo, 2003).

Entretanto, além da redução da massa específica, a substituição dos agregados convencionais por agregados leves pode ocasionar alterações significativas em outras importantes características do concreto, com destaque especial para a resistência mecânica, absorção de água e módulo de deformação. Dentre as formas de ajustar o desempenho do concreto leve, compensando eventuais alterações nas propriedades citadas em decorrência do uso do agregado leve, destaca-se a utilização de adições minerais pozolânicas, como o Metacaulim (Rossignolo e Agnesini, 2005).

As adições minerais pozolânicas, como o Metacaulim, podem melhorar significativamente o desempenho das propriedades dos concretos estruturais leves, compensando algumas limitações impostas pela utilização do agregado leve, como o aumento da resistência à compressão, por exemplo.

O Metacaulim, produzido no Brasil desde o final da década de 1990, na região de Jundiaí, Estado de São Paulo, é obtido pela calcinação de um tipo

específico de argila. Essa adição mineral proporciona reatividade com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, efeito esse denominado de reação pozolânica. A reação pozolânica reduz a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio na matriz de cimento assim como melhora a qualidade da zona de transição agregado-matriz, promovendo a melhoria de desempenho das propriedades do concreto estrutural leve relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade.

Frente a esse cenário, o presente trabalho dedica-se ao melhor entendimento das modificações nas propriedades e características do concreto estrutural leve em função da utilização de Metacaulim. Foram analisados a massa específica, a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação, a absorção de água por imersão e a carbonatação de concretos leves estruturais com 10% de Metacaulim, em relação à massa de cimento, com abatimento do tronco de cone de  $60 \pm 10$  mm e consumo de cimento variando entre 250 e 500 kg/m<sup>3</sup>. Foi analisada também a influência da dimensão do agregado leve e do Metacaulim na "Resistência ótima" do concreto leve.

## Material e métodos

### Materiais e programa experimental

Para a produção dos concretos leves foi utilizado o cimento Portland composto com escória de alto forno (CPIIE32), fabricado pela empresa Ciminas S.A. (grupo Holdercim), com massa específica de 2,96 g/cm<sup>3</sup> e área específica Blaine de 4.023 cm<sup>2</sup>/g<sup>-1</sup>. O Metacaulim empregado apresentou massa específica de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, área específica em torno de 327.000 cm<sup>2</sup>/g<sup>-1</sup> e teor de SiO<sub>2</sub> de 51,6%. Os agregados utilizados foram areia natural quartzosa e dois tipos de argila expandida, Cinexpan 1506 ( $D_{\text{máx}}=12,5$  mm) e Cinexpan 2215 ( $D_{\text{máx}}=19,0$  mm) (Tabela 1). O superplasticificante empregado foi do tipo SPA (melamina sulfonato formaldeídico), segundo classificação da NBR11768, com massa específica de 1,11 g/cm<sup>3</sup> e teor de sólidos de 16,5%.

Na dosagem dos concretos foi utilizado o teor de 10% de Metacaulim em relação à massa total de aglomerante, em substituição ao CPIIE32. Dessa forma, foram obtidos traços com a mesma dosagem de aglomerante, mas com teores diferentes de Metacaulim (0 e 10%). Fixou-se o slump em  $60 \pm 10$  mm para todas as dosagens, e, em casos em que não se atingiu esse parâmetro, utilizou-se o aditivo superplasticificante para que essa exigência fosse cumprida. Os traços dos concretos analisados são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 1.** Características dos agregados.

Tipo de agregado	$D_{\text{max}}$ NBR 7211 (mm)	Massa específica NBR 9776 (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária NBR 7251 (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)*		
				30 min.	60 min.	24h min.
Areia	2,4	2,63	1,49	-	-	-
Cinexpan 1506	12,5	1,11	0,59	1,3	3,5	7,0
Cinexpan 2215	19,0	0,64	0,47	4,0	5,0	10,3

\*Método proposto por Tezuka (1973).

**Tabela 2.** Dosagem dos concretos leves de alto desempenho ( $D_{\text{max}} = 12,5$  mm).

Traço	Metacaulim <sup>1</sup> (%)	Proporcionamento Agl: A: 1506 <sup>1</sup> (em massa)	Cons. de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a (agl) <sup>1,2</sup>		Cons. de aditivo superplasticificante (%)
				efetiva (em massa)	total (em massa)	
1	0	1: 2,93: 1,58	267,9	0,77	-	0,75%
	10					
2	0	1: 2,41: 1,30	317,9	0,60	-	0,50%
	10					
3	0	1: 2,05: 1,10	358,7	0,55	-	0,36%
	10					
4	0	1: 1,79: 0,96	405,7	0,47	-	0,75%
	10					
5	0	1: 1,59: 0,86	438,3	0,44	-	0,74%
	10					
6	0	1: 1,43: 0,77	474,6	0,42	-	0,60%
	10					
7	0	1: 1,30: 0,70	517,5	0,38	-	0,75%
	10					

<sup>1</sup>aglomerante: areia: Cinexpan 1506; <sup>2</sup>Relação a (agl)<sup>1,2</sup> efetiva (em massa), onde a = quantidade total de água presente na mistura.

**Tabela 3.** Dosagem dos concretos leves de alto desempenho ( $D_{\text{max}} = 19,0$  mm).

Traço	Metacaulim <sup>1</sup> (%)	Proporcionamento Agl: A: 2215:1506 <sup>1</sup> (em massa)	Cons. de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a (agl) <sup>1,2</sup>		Cons. de aditivo superplasticificante (%)
				efetiva (em massa)	total (em massa)	
1	0	1: 3,15: 0,41: 0,95	253,4	0,77	-	0,00%
	10					
2	0	1: 2,59: 0,33: 0,78	304,9	0,60	-	0,79%
	10					
3	0	1: 2,21: 0,28: 0,66	344,5	0,55	-	0,25%
	10					
4	0	1: 1,93: 0,25: 0,58	390,3	0,47	-	0,36%
	10					
5	0	1: 1,72: 0,22: 0,51	426,5	0,44	-	0,69%
	10					
6	0	1: 1,54: 0,20: 0,46	461,3	0,42	-	0,40%
	10					
7	0	1: 1,40: 0,18: 0,42	503,8	0,38	-	0,66%
	10					

<sup>1</sup>aglomerante: areia: Cinexpan 2215: Cinexpan 1506; <sup>2</sup>Relação a (agl)<sup>1,2</sup> efetiva (em massa), onde a = quantidade total de água presente na mistura; Cons. = Consumo.

Os materiais foram misturados em uma betoneira do tipo planetária com capacidade de 100 dm<sup>3</sup>. Os agregados leves foram adicionados à mistura sem saturação prévia. Os corpos-de-prova foram moldados em moldes de aço e adensados com vibrador de imersão. A argamassa utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova foi retirada do concreto utilizando peneira metálica com abertura 4,8 mm para eliminar os agregados graúdos. Após 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em uma sala monitorada com 95% de umidade relativa (UR) e 23 ± 2°C, até a data do ensaio.

Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura na idade de 28 dias (com exceção da carbonatação) para todas as análises. Para cada dosagem foram moldados cinco corpos-de-prova para a determinação da resistência à compressão do concreto e cinco para a argamassa (NBR 5739), três para a resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222), dois para a absorção de água por imersão (NBR 9778) e três para o módulo de deformação tangente inicial (NBR 8522).

A verificação da espessura de carbonatação aos 180 dias de idade foi realizado utilizando três corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, que foram rompidos por compressão diametral (NBR 7222) e, em seguida, submetidos a uma solução de fenolftaleína.

## Resultados e discussão

Os valores da massa específica no estado fresco (Tabela 4) variaram entre 1590 e 1750 kg m<sup>-3</sup>, ou seja, cerca de 30 a 40% abaixo dos valores obtidos normalmente para os concretos com agregados tradicionais. Os valores do teor de ar incorporado obtidos para os concretos leves ficaram entre 2,5 e 5,0%.

**Tabela 4.** Propriedades dos concretos leves no estado fresco.

Traço	Metacaulim (%)	Massa Específica Fresca (kg m <sup>-3</sup> )		Incorporação de ar (%)	
		D <sub>max</sub> 12,5 mm	D <sub>max</sub> 19 mm	D <sub>max</sub> 12,5 mm	D <sub>max</sub> 19 mm
1	0	1664	1589	3,7	4,2
	10	1680	1601	2,8	3,5
2	0	1660	1616	4,3	3,1
	10	1685	1615	2,9	2,9
3	0	1689	1619	3,2	3,6
	10	1686	1633	3,4	3,4
4	0	1704	1647	3,1	2,8
	10	1712	1631	2,6	2,6
5	0	1705	1659	3,9	3,1
	10	1705	1662	3,9	3,9
6	0	1702	1670	5,1	3,5
	10	1718	1664	4,2	4,2
7	0	1749	1703	3,7	2,9
	10	1749	1680	3,7	4,2

Os valores obtidos de resistência à compressão e massa específica seca dos concretos com agregados leves com dimensão máxima característica (D<sub>máx</sub>) de 19,0 e 12,5 mm são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Comparado aos concretos com agregados tradicionais que, usualmente, apresentam valores de massa específica próximos a 2400 kg m<sup>-3</sup>, os concretos leves analisados apresentaram redução dos valores da massa específica entre 30 e 40%.

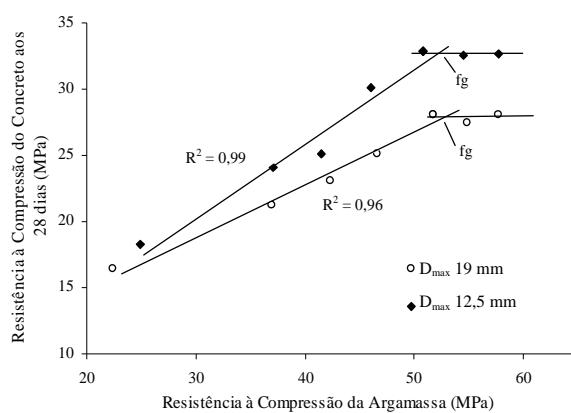
**Tabela 5.** Resultados de resistência à compressão e massa específica seca dos concretos leves com D<sub>máx</sub> = 19,0 mm.

Traço	Metacaulim (%)	Massa Específica Seca (kg m <sup>-3</sup> ) (28 dias)	Resist. Compr. Concreto (MPa) (28 dias)	Resist. Compr. Argamassa (MPa) (28 dias)
1	0	1503	16,0	23,2
	10	1491	16,4	22,4
2	0	1512	21,8	32,8
	10	1508	21,2	37,0
3	0	1519	25,0	38,6
	10	1525	23,1	42,3
4	0	1531	25,9	44,4
	10	1547	25,1	46,6
5	0	1541	26,8	48,5
	10	1553	28,1	51,8
6	0	1561	26,1	50,7
	10	1580	27,4	54,8
7	0	1587	27,1	52,9
	10	1596	28,1	57,7

**Tabela 6.** Resultados de resistência à compressão e massa específica seca dos concretos leves com D<sub>máx</sub> = 12,5 mm.

Traço	Metacaulim (%)	Massa Específica Seca (kg m <sup>-3</sup> ) (28 dias)	Resist. Compr. Concreto (MPa) (28 dias)	Resist. Compr. Argamassa (MPa) (28 dias)
1	0	1570	14,9	24,4
	10	1575	18,3	24,9
2	0	1593	20,4	31,5
	10	1592	24,1	37,1
3	0	1603	25,1	38,8
	10	1619	25,1	41,5
4	0	1620	30,0	44,4
	10	1649	30,1	46,0
5	0	1626	30,1	47,0
	10	1670	32,9	50,8
6	0	1668	29,6	51,3
	10	1677	32,5	54,5
7	0	1698	30,8	53,2
	10	1695	32,7	57,7

A Figura 1 ilustra a relação entre resistência à compressão do concreto leve e da argamassa aos 28 dias de idade, na qual pode-se observar a deflexão na curva de desenvolvimento da resistência à compressão do concreto com agregados leves no ponto denominado de “resistência ótima” (fg). Nesse ponto, o valor do módulo de deformação da argamassa supera o valor do módulo de deformação do agregado leve, dividindo a curva em duas fases. Na primeira, a resistência à compressão do concreto aumenta de forma proporcional à elevação da resistência à compressão da argamassa, uma vez que o agregado é a fase mais resistente do material. Na segunda fase, o módulo de deformação do agregado leve é menor do que o da argamassa e a resistência do concreto leve é controlada pela resistência do agregado. Assim, o acréscimo nos valores de resistência à compressão da argamassa não contribui de forma proporcional no aumento do valor de resistência à compressão do concreto (Chen *et al.*, 1998; Rossignolo e Pereira, 2005).



**Figura 1.** Relação entre resistência à compressão do concreto leve ( $D_{\text{máx}}$  igual a 12,5 e 19,0 mm) e da argamassa aos 28 dias (com Metacaulim).

Dentre os fatores que influenciam no valor da “resistência ótima” do concreto leve, a dimensão máxima característica ( $D_{\text{máx}}$ ) do agregado leve apresenta-se como um dos mais importantes, como pode ser observado no comportamento da curva da Figura 1, em que se observa a diferença relativa de 17% entre os valores de “Resistência ótima” dos concretos com os dois tipos de agregados leves utilizados.

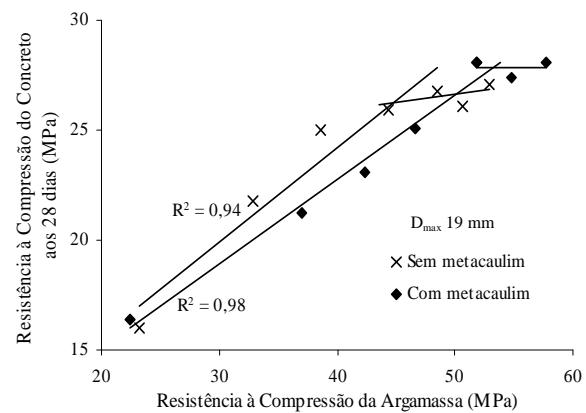
As Figuras 2 e 3 ilustram o efeito da adição de Metacaulim no valor da resistência compressão dos concretos leves. Observa-se que a adição de 10% de Metacaulim, em substituição ao cimento Portland (em massa), proporcionou um aumento significativo no valor da “resistência ótima”, sendo de 4,5% para  $D_{\text{máx}} = 19\text{mm}$  e de 8,4% para  $D_{\text{máx}} = 12,5\text{ mm}$ .

Essa melhoria de desempenho dos concretos leves com adição de Metacaulim, em relação aos concretos de referência, podem ser atribuídos à melhoria da zona de transição agregado-matriz e ao refinamento dos poros da argamassa, consequência da reação pozolânica e do efeito *filler* promovido por essa adição mineral.

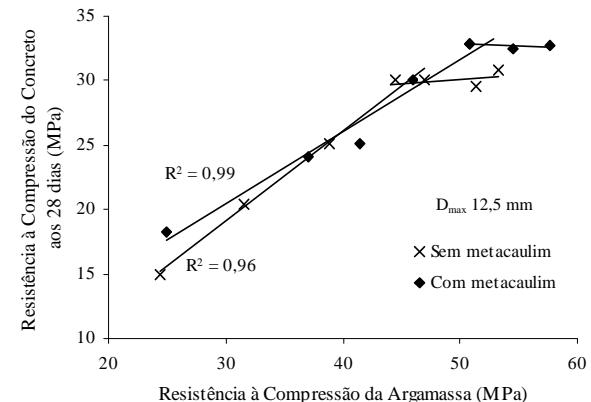
Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão dos concretos leves sem Metacaulim aos 28 dias foi, em média, de 8,5%. Já nos concretos leves com adição de 10% de Metacaulim, de acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5, observou-se que a relação entre resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias aumentou para 10%, em média.

A melhora de desempenho da resistência à tração por compressão diametral dos concretos leves com Metacaulim, em relação aos concretos de referência,

pode ser atribuído, especialmente, à atuação da adição na melhoria da qualidade da zona de transição agregado-matriz e na alteração da microestrutura da matriz de cimento, reduzindo o teor de poros e de hidróxido de cálcio (CH).



**Figura 2.** Relação entre resistência à compressão do concreto leve e da argamassa aos 28 dias ( $D_{\text{máx}} = 19,0\text{ mm}$ ).



**Figura 3.** Relação entre resistência à compressão do concreto leve e da argamassa aos 28 dias ( $D_{\text{máx}} = 12,5\text{ mm}$ ).

**Tabela 7.** Valores da resistência à tração dos concretos leves.

Traço	Metacaulim (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias (MPa)	
		$D_{\text{máx}} = 12,5\text{ mm}$	$D_{\text{máx}} = 19\text{ mm}$
1	0	1,6	1,7
	10	2,0	1,9
2	0	1,9	1,9
	10	2,6	2,6
3	0	2,2	2,0
	10	2,5	2,6
4	0	2,2	2,1
	10	2,8	2,6
5	0	2,3	2,2
	10	3,0	2,9
6	0	2,4	2,2
	10	3,1	2,7
7	0	2,5	2,3
	10	3,3	2,8

A Tabela 8 apresenta os resultados de módulo de deformação obtidos para os concretos leves. Os

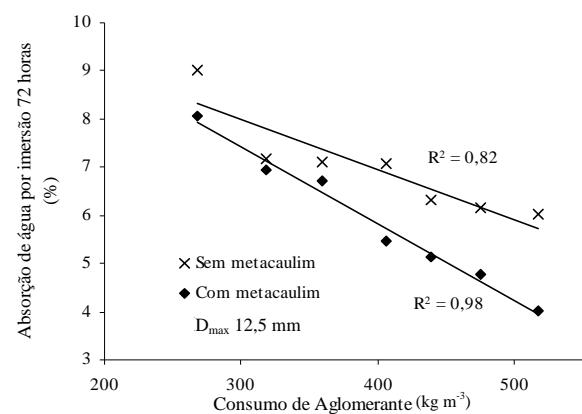
resultados indicam que, na média, a adição de Metacaulim apresentou pouca influência nos valores do módulo de deformação dos concretos leves.

**Tabela 8.** Valores do módulo de deformação dos concretos leves.

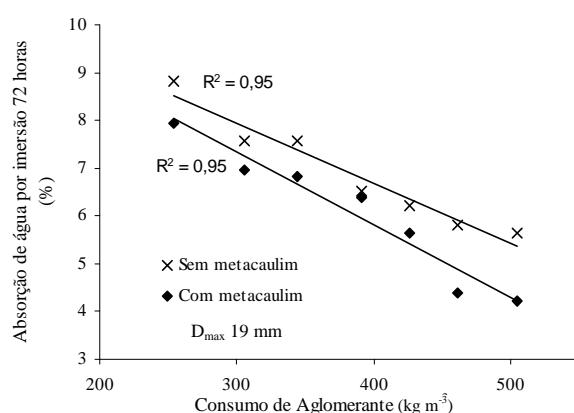
Traço	Metacaulim (%)	Módulo de Deformação Tangente Inicial aos 28 dias NBR 8522 (GPa)	
		D <sub>max</sub> 12,5 mm	D <sub>max</sub> 19 mm
1	0	11,8	11,0
	10	10,7	9,8
2	0	12,9	11,6
	10	11,5	10,7
3	0	14,3	13,0
	10	13,8	12,7
4	0	14,9	14,1
	10	14,4	13,9
5	0	15,5	15,3
	10	16,4	15,1
6	0	15,9	16,2
	10	18,3	17,7
7	0	17,3	17,8
	10	20,8	19,3

Com relação à absorção de água por imersão, os resultados (Figuras 4 e 5) indicam que a adição de 10% de Metacaulin, em substituição ao cimento Portland, reduz significativamente o valor dessa propriedade. Essa redução do valor da absorção de água foi, em média, de 20% para os dois tipos de agregados utilizados, no entanto, foi mais pronunciado nos concretos leves com elevado consumo de aglomerante, chegando a 50% para concreto com D<sub>max</sub>=12,5 mm (traço 7) e 35% para concreto com D<sub>max</sub>=19,0 mm (traço 7).

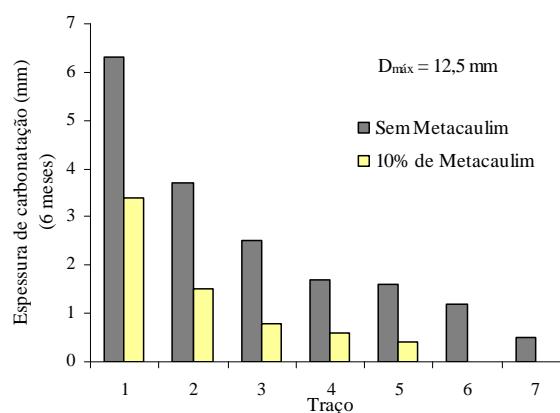
Analizando os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 observou-se, ainda, a redução expressiva da espessura da carbonatação dos concretos leves com a utilização de 10% de Metacaulim, indicando que essa adição mineral apresenta atuação efetiva na redução da porosidade permeável do concreto, melhorando o desempenho de durabilidade desse material.



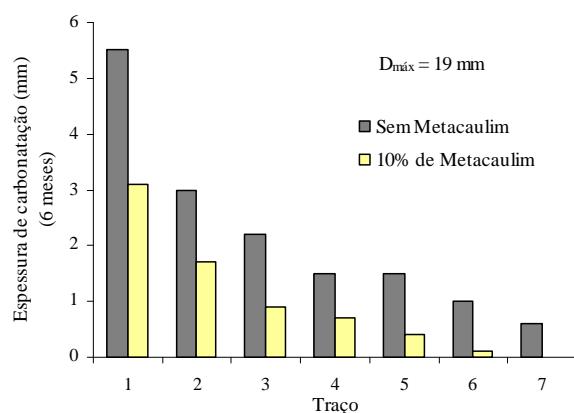
**Figura 4.** Relação entre absorção de água por imersão e consumo de aglomerante dos concretos leves aos 28 dias (D<sub>max</sub> = 12,5 mm).



**Figura 5.** Relação entre absorção de água por imersão e consumo de aglomerante dos concretos leves aos 28 dias (D<sub>max</sub> = 19,0 mm).



**Figura 6.** Valores da espessura de carbonatação aos 6 meses de idade dos concretos leves com D<sub>max</sub> = 12,5 mm.



**Figura 7.** Valores da espessura de carbonatação aos 6 meses de idade dos concretos leves com D<sub>max</sub> = 19,0 mm.

## Conclusão

Nos resultados obtidos nessa pesquisa foi possível observar que o aumento da dimensão máxima característica do agregado leve (argila expandida) promove uma redução significativa do desempenho de algumas propriedades dos concretos

leves, como a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação.

Dessa forma, esse efeito deve ser considerado no momento da escolha do agregado leve para a dosagem dos concretos leves, preferencialmente realizando uma análise da "Resistência ótima" da dosagem para determinar a dimensão ideal do agregado. Esse procedimento resulta na obtenção de traços de concreto leve mais eficientes e com menor consumo de aglomerante.

Verificou-se ainda que a adição de 10% de Metacaulim (em substituição ao cimento Portland, em massa) resultou na melhoria significativa do desempenho da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e, especialmente, da absorção de água por imersão e da carbonatação dos concretos leves. No entanto, a adição de Metacaulim não promoveu alterações significativas no valor do módulo de deformação dos concretos leves.

Esses resultados indicam que, mesmo nos concretos leves, em que o agregado é o principal fator limitante do desempenho da resistência mecânica do concreto, as alterações promovidas pelo Metacaulim na matriz de cimento resultam na melhoria de desempenho dessas propriedades. Com relação à durabilidade do concreto leve, observa-se que a adição de Metacaulim resultou em um aumento expressivo da melhoria de desempenho dessa propriedade.

## Referências

- ALMEIDA, I.R. Superplasticantes, microssílica e durabilidade dos concretos. *Revista Téchne*, São Paulo, v. 5, p. 30-33, 1996.
- AITCIN, P.C. Concreto de alto desempenho. São Paulo: Ed. Pini, 2000.
- BERNER, D.E. High ductility, high strength lightweight aggregate concrete. In: SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. 1991, Dallas. *Anais...* Dallas: ACI, 1991.
- CHEN, H.J. et al. Determination of the dividing strength and its relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, p. 29-37, 1999.
- HELENE, P.R.L. Concreto de alto desempenho: o melhor está por vir. *Rev. Cimento Hoje*, São Paulo, n. 20, 1999.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. High strength lightweight aggregate concrete. In: SHAH, S.P.; AHMAD, S.H. (Ed.). *High performance concrete: properties and applications*. New York: Ed. McGraw-Hill, 1994. Cap. 10, p. 341-374.
- IKEDA, S. Recent developments in LWAC in Japan. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. 2., 2000, Kristiansand. *Anais...* Kristiansand: Norwegian Concrete Association, 2000. p. 16-26.
- MORENO, J. *Lightweight concrete ductility*. Concrete International. Detroit: American Concrete Institute, 1986.
- PAULON, V.A. Interface entre a pasta de cimento e agregado. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37., 1996. Goiânia. *Anais...* Goiânia: Instituto Brasileiro do Concreto, 1996. v. 1, p. 479-492.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. In: FIGUEIRAS, J. et al. (Ed.). *Composites in constructions*. Lisse: A.A. Balkema Publishers, 2001. p. 61-66.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 3, p. 329-334, 2002.
- ROSSIGNOLO, J.A. *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. 2003. Tese (Doutorado)-Interunidades EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. *Concreto estrutural leve: ensino, pesquisas e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.
- ROSSIGNOLO, J.A.; PEREIRA, J.R. Influência do agregado no desempenho da resistência à compressão do concreto: comparação entre basalto e argila expandida. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 5., 2005, Maringá. *Anais...* Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2005. p. 1-6.
- SLATE, F.O. et al. Mechanical properties of high-Strength lightweight concrete. *ACI Mat. J.*, San Francisco, v. 83, n. 4, p. 606-613, 1986.
- TEZUKA, Y. *Concreto leve à base de argila expandida*. 1973. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
- VIEIRA, M.; GONÇALVES, A. Durability of high performance LWAC. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. 2., Kristiansand. *Anais...* Kristiansand: Norwegian Concrete Association, 2000. p. 767-73.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Mat. J.*, San Francisco, v. 88, n. 3, p. 240-247, 1991.

Received on September 29, 2006.

Accepted on March 22, 2007.