



INFLUÊNCIA DA POZOLANA EM CONCRETOS MOLDADOS EM CARUARU – PERNAMBUCO - BRASIL

K. C. de Arruda Dourado^{1,a}; J. M. de Freitas Mota^{2,b}; F. R. Barbosa^{3,c}; A. Caldas e Silva^{4,d}, A. J. da Costa e Silva^{5,e}; E. J. da Silva^{6,f}; A. G. Feitosa^{6,g} e F. A. dos Santos^{6,h}; J. R. de Carvalho^{7,i}

¹Professora do Departamento de Engenharia Civil da FAVIP e do Instituto Federal de Pernambuco – IFPE; Doutoranda do Departamento de Engenharia Civil, UFPE, Pernambuco, Brasil

²Professor do Departamento de Engenharia Civil da FAVIP e Doutorando do Departamento de Engenharia Civil, UFPE, Pernambuco, Brasil

³Professor do Departamento de Engenharia Civil da FAVIP e Mestrando do Departamento de Engenharia Civil, UFPE, Pernambuco, Brasil

⁴Professor Mestre e Coordenador do curso de Engenharia Civil da FAVIP, Pernambuco, Brasil

⁵Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, UNICAP, Pernambuco, Brasil

⁶Graduando da Faculdade do Vale do Ipojuca - FAVIP, Pernambuco, Brasil

⁷Graduando da Escola Politécnica de Pernambuco –UPE/POLI, Pernambuco, Brasil

Resumo

Este trabalho objetiva avaliar as propriedades de concretos com substituição parcial do cimento pela pozolana Metacaulim. Foram moldados corpos-de-prova, para investigação das propriedades mecânicas (compressão axial e tração por compressão diametral), elástica (módulo de elasticidade) e as relacionadas com a durabilidade (absorção de água por imersão e capilaridade) – todos ensaios nas idades de 28 e 90 dias. O traço de referência utilizada foi 1:2:3 (cimento, areia e brita). Nas demais proporcoionalidade houve a substituição da massa de cimento em 5%, 8% e 10% por Metacaulim. Os resultados indicaram melhoradas nas amostras cujo concreto tem adição, quando comparados aos concretos convencionais.

Palavras-chave: concreto com adição, pozolana, metacaulim, durabilidade, tecnologia de concreto

Abstract

This study evaluates the properties of concrete with partial replacement of cement by pozzolan metakaolin. Bodies were cast-of-evidence for investigation of mechanical properties (tensile and compressive axial diametral compression), elastic (modulus) and those related to durability (water absorption by immersion and capillarity) - all tests at ages 28 and 90 days. The mark used was 1:2:3 (cement, sand and gravel). In other proporcoionalidade was replaced in the mass of cement 5%, 8% and 10% for metakaolin. The results indicated improved in samples where the concrete has addition, when compared to conventional concrete.

Keywords: concrete with addition, pozzolan, metakaolin, durability, concrete technological

1. INTRODUÇÃO

Diversas patologias são identificadas em concretos, fundamentalmente, as relacionadas à durabilidade. Nesse contexto, os problemas passam pela elevada porosidade dos concretos convencionais, de forma mais crítica, quando os poros são conectados, haja vista a formação de caminhos capilares para agentes agressivos (deletérios) (MOTA et al., 2009).

Sabe-se que, além da necessidade de se buscar cada vez mais concretos com substanciais melhorias das propriedades mecânicas, a relação com o bom desempenho, a um só tempo, está condicionada a elevação da vida útil das peças de concreto a patamares significativos que atendam as normas pertinentes.

Portanto, diversas pesquisas mostraram que a adição de pozolanas em materiais cuja matriz é cimentícia, provoca um maior empacotamento da mistura deixando-a mais densa, gerando uma redução natural da porosidade (MOTA, 2006).

Concretos convencionais tendem a romper na zona de transição - agregado graúdo/pasta cimentícia, uma vez que a elevada relação água/cimento dessa Região devido ao efeito parede faz surgir extensas áreas com porosidade (CAQUOT, 1936). Nessa Região, os hidróxidos de cálcio gerados na hidratação do cimento se posicionam preferencialmente de forma perpendicular a superfície do agregado graúdo, onde, por conseguinte, são combinados com a sílica da pozolana (concretos com adição) resultando em C-S-H (silicato de cálcio hidratado), composto responsável pela resistência da matriz cimentícia (fenômeno químico), concomitantemente, com o próprio efeito *filler* - ocupação dos vazios, os poros (fenômeno físico) (CARNEIRO, 2005; MOTA et al., 2010).

A pozolana metacaulim é originada das argilas caulínicas e do caulim, sendo moído e calcinado a temperaturas médias entre 600⁰C e 900⁰C. Sabe-se que a alta superfície específica contribui favoravelmente com os aspectos reológicos, melhorando a trabalhabilidade, haja vista otimização da curva granulométrica da pasta, promovendo maior retenção de água e coesão, reduzindo a exsudação e a segregação. Ademais, no estado endurecido, o concreto fica com melhor resistência ao ataque por sulfatos e íons cloretos, bem como pelo processo de hidratação ficar mais lento, diminui-se a velocidade de liberação de calor. Por conseguinte, a resistências à compressão e à tração do concreto é elevado e a absorção reduzida (MUNHOZ et al., 2010; NEVILLE, 1997). Essas melhorias implementam aos materiais cuja matriz é cimentícia um incremento na durabilidade e no desempenho mecânico, em relação aos mesmos materiais sem adição (DETWILER et al., 1996; SIDDIQUE; KLAUS, 2009).

Este trabalho objetiva avaliar o incremento de algumas propriedades de concretos adicionados com a pozolana Metacaulim - seja concernente ao desempenho mecânico e, ou, a durabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Cimento Portland

Utilizou-se o cimento CII-F-32. A Tabela 01 apresenta características do cimento (fonte o fabricante).

Tabela 01 – Características do cimento utilizado

Determinação		CPII-F-32	Determinação		CPII-F-32	
Caracterização Física	Água para consistência normal (%)	28,8	Caracterização Química (%)	Perda ao fogo	4,06	
	Área específica Blaine (cm ² /g)	3780		Resíduo insolúvel	1,53	
	Massa Específica (g/cm ³)	3,1		Al ₂ O ₃	4,53	
	Densidade Aparente (g/cm ³)	*NI		SiO ₂	18,52	
	Finura	Resíduo na peneira #200 (%)		2,6	Fe ₂ O ₃	2,11
		Resíduo na peneira #325 (%)		11,3	CaO	60,95
	Tempo de Pega	Início (min)		255	MgO	3,26
		Fim (min)		320	SO ₃	3,34
	Resistência à Compressão	3 dias (MPa)		26,4	CaO livre	0,89
		7 dias (MPa)		31,9	Equivalente alcalino em Na ₂ O	
28 dias		38				

2.1.2 Adições

A metacaulim utilizada foi produzida industrialmente na Região Metropolitana do Recife. Esse material originado da argila caulínica possui alta reatividade, e, apresenta algumas características fornecido pelo fabricante nas Tabelas 02 e 03.

Tabela 02 – Caracterização química

Propriedades Químicas	Valor	Propriedades Químicas	Valor
Dióxido de silício - SiO ₂ (%)	51%	Na ₂ O	<0,1%
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	41%	K ₂ O	< 0,5%
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	< 3%	Sulfato - SO ₃ (%)	<0,1%
TiO ₂	< 1%	Óxido de cálcio – CaO	<0,5 %
Óxido de Magnésio – MgO (%)			<0,4%

Tabela 03 – Caracterização física

Propriedades	Fino
Massa específica	2,60 kg/dm ³
Massa unitária	0,55 kg/dm ³
Área Específica	180000 dm ² /kg
Resíduo na peneira	< 5%

2.1.3 Agregados

2.1.3.1 Agregado miúdo

Foi utilizada areia natural de natureza quartzosa amplamente encontrada na Região. Esse material foi caracterizado pela densidade de massa específica e aparente, determinação da curva granulométrica e coeficiente de uniformidade de acordo com o método de Allen-Hazem. Este método relaciona $C=d_{60}/d_{10}$, significando a equivalência da percentagem passante de material.

2.1.3.2 Agregado Graúdo

A natureza mineralógica do agregado graúdo é granítica. Esse material amplamente encontrado na Região foi utilizado em seu estado seco, sem lavagem. Caracterizou-se quanto à densidade de massa específica, aparente e granulometria.

As Tabelas 04 e 05 mostram características da areia natural e da brita, respectivamente. As Figuras 05a e 05b apresentam as curvas de distribuição granulométrica da areia e brita utilizada, respectivamente.

Tabela 04 – Características da areia natural

Dimensão Máxima Característica	2,36
Módulo de finura	2,15
Densidade aparente (g/cm ³)	1,63
Massa específica (g/cm ³)	2,56
Coeficiente de uniformidade	1,2

Tabela 05 – Características da brita

Dimensão Máxima Característica	19
Módulo de finura	6,99
Densidade aparente (g/cm ³)	1,24
Coeficiente de uniformidade	1,33

2.1.4 Aditivo Químico

O aditivo utilizado foi um superplastificante, com base de poliéster carboxilado. O superplastificante é um aditivo redutor de água de alto desempenho. É um líquido de baixa viscosidade pronto para o uso, e atende as especificações de aditivos químicos para concreto ASTM C 494 TIPO F. Seu peso específico é próximo de 1,08 kg/l.

2.1.5 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Verificou-se que o pH da água no ato de sua utilização estava próximo de 6,5.

2.2 MÉTODO

O trabalho foi constituído de 4 famílias de concretos, sendo os percentuais de substituição do cimento por Metacaulim 0% (amostra de referência), 5%, 8% e 10%. Foi moldadas 6 réplicas para cada amostra (propriedade e idade) estudada, sendo os corpos de prova cilíndricos de 100x200mm (atendendo a norma ABNT 5738, 2008), onde as réplicas ficaram imersos na água até as idades de ensaios. Os rompimentos dos corpos de prova foram executados de acordo com a norma NBR 5739 da ABNT, 2007. O teor de aditivo tensoativo foi determinado em relação à massa do cimento.

Avaliou-se a resistência à compressão – em 7, 28 e 90 dias; módulo de elasticidade - 28 dias; tração por compressão diametral - 28 e 90 dias e absorção total - 28 dias. O equipamento (prensa) utilizado possui tipo de acionamento servo-controlada, com escala digital e capacidade 2000 kN.

O estabelecimento da fixação da proporcionalidade de referência (traço), da relação água/cimento e do abatimento em 8 +/- 2mm, adveio dos parâmetros preferenciais usados nas edificações da Região de Caruaru – Pernambuco - Brasil. Assim, características proporcionais dos materiais empregados estão apresentadas na Tabela 06.

Tabela 06 – Nomenclatura das famílias de amostras estudadas e proporcionamento médio em massa da mistura

Nomenclatura	TUV (cimento: areia:brita: Ra/c:aditivo)
Família 1 (referência – 0% de metacaulim)	1:2:3:0,5:0
Família 2 (5% de metacaulim)	1:2:3:0,5:0
Família 3 (8% de metacaulim)	1:2:3:0,5:0,65
Família 4 (10% de metacaulim)	1:2:3:0,5:0,4

3. RESULTADOS

Verificou-se nos concretos a consistência que foi determinada através do abatimento do tronco de cone conforme a NBR 7223. Registro-se a cada 15 minutos, estando a betoneira homogeneizando o material, ato contínuo. A Tabela 07 mostra as densidades e abatimentos.

Tabela 07 – Densidades e abatimentos – (médias)

FAMÍLIAS	DENSIDADES (g/cm ³) NO ESTADO FRECO / ENDURECIDO	ABATIMENTO
Família 1 (Referência)	2,32 (fresco) / 2,3 (endurecido)	9mm
Família 2	2,37 / 2,35	10mm
Família 3	2,38 / 2,36	6mm
Família 4	2,41 / 2,38	8mm

As densidades aumentaram na medida em que o teor de adição se elevou. Essa constatação é corroborada pela literatura, tendo em vista a ocorrência do refinamento dos poros pela pozolana e, portanto, maior empacotamento das misturas. O abatimento foi fixado em 8 +/- 2mm, donde, as famílias 3 e 4 necessitaram do aditivo superplastificante para atingir o intervalo.

As propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração por compressão diametral) e elástica (módulo de elasticidade), estão apresentadas nas Tabelas 08, 09 e 10 respectivamente.

Tabela 08 – Resistência à compressão axial

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)												
PROPORCIONALIDADES (TRAÇOS)												
IDADES (dias)	Família 1			Família 2			Família 3			Família 4		
	M	SD	CV	M	SD	CV	M	SD	CV	M	SD	CV
07	18,06*	1,16	6,43	18,96*	0,86	4,54	30,03*	3,71	12,34	24,14*	3,01	12,49
	18,10	0,74	4,06	19,29	0,54	2,80	30,52	1,62	5,30	25,77	0,27	1,04
28	23,31*	4,00	17,15	22,45*	3,55	15,81	33,57*	2,55	7,59	29,13*	1,90	6,52
	22,23	1,49	6,70	22,42	2,17	9,78	32,82	2,23	6,79	29,71	1,41	4,76
90	28,92*	3,12	10,78	27,92*	3,40	12,18	43,66*	2,24	5,13	33,61*	2,31	6,87
	26,92	3,12	10,78	27,88	0,22	0,84	43,66	2,24	5,13	34,94	0,08	0,24

M – média; SD – desvio padrão (MPa); CV – coeficiente de variação (%); * considerando todos os valores ensaiados (sem tratamento estatístico).

Pode-se considerar que os resultados tratados estatisticamente (sem asteriscos) indicam crescimento da resistência à compressão axial ao longo do tempo, ou seja, aumento de 7 dias para 28 e 90 dias, bem como verificou-se um crescimento linear das famílias 2 e 3 em relação à família 1 de referência. Ocorre que, em que pese a família 4 apresentar aumento em relação à família 1 de referência, diminuiu em relação à família 3, indicando, de acordo com outras

pesquisas, que patamares maiores de substituição já não mais incrementa essa propriedade, uma vez que a partir de determinados teores de substituição, o cimento governa frente às reações pozolânicas.

Tabela 09 – Tração por compressão diametral

FAMÍLIAS	TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa / SD / CV)	
	28 dias	90 dias
Família 1 (Referência)	3,48 / 0,55 / 15,81	4,11 / 0,23 / 5,6
Família 2	3,67 / 0,6 / 16,35	4,13 / 0,74 / 16,67
Família 3	3,83 / 0,64 / 16,71	4,44 / 0,74 / 17,92
Família 4	3,64 / 0,4 / 10,99	3,71 / 0,68 / 21,94

SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação (%).

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral mostram a tendência de elevação dos resultados ao longo do tempo (de 28 para 90 dias) devido às reações pozolânicas se processarem ao longo do tempo, bem como elevação dos resultados com o aumento do teor da adição até a família 3. Mais uma vez, verifica-se redução nessa propriedade da família 4 em relação à família 3 nas idades 28 e 90 dias. Isso corrobora que a partir de determinados teores de substituição não se aumenta mais essa resistência, pois a quantidade de cimento passa a ser determinante e mais relevante do que as reações pozolânicas.

Tabela 10 – Módulo de elasticidade

Famílias	M (GPa)	SD (GPa)	CV (%)
1	19,12	2,08	10,87
2	23,69	3,42	14,46
3	26,97	5,27	19,56
4	26,44	5,02	18,98

M – média; SD – desvio padrão (GPa); CV – coeficiente de variação (%).

O módulo de elasticidade também mostrou a influência positiva da adição do Metacaulim, uma vez que houve uma evolução dessa propriedade nas famílias 2, 3 e 4 em relação a família de referência. Do mesmo modo que nas propriedades mecânicas, a família 4 decresceu em relação à família 3, denotando que nesse patamar, as reações pozolânicas possivelmente já não mais sobressaem ao teor de cimento.

A Tabela 11 apresenta a absorção total investigada com o objetivando analisar tendências acerca da durabilidade.

Tabela 11 – Absorção total (média)

FAMÍLIAS	ABSORÇÃO (%)
Família 1 (Referência)	4,54
Família 2	4,14
Família 3	2,81
Família 4	2,92

Na absorção também se verificou a ação das reações pozolânicas, tendo em vista a redução da absorção das famílias 2, 3 e 4 em relação à família de referência. A mesma tendência foi constatada, redução da eficácia da família 4 em relação à família 3, caracterizando que a substituição de 10% de Metacaulim por cimento, possivelmente não mais releva diante do aglomerante cimento. Portanto, a diminuição dos poros à medida em que se adiciona pozolana (fenômeno físico – *filler*), contribui para a durabilidade.

4. CONCLUSÕES

As análises dos resultados conduzem as seguintes conclusões:

- ▶ a densidade no estado fresco e endurecido foi diretamente proporcional ao teor da adição. Isto pode ser justificado, tendo em vista que as adições promovem uma maior densificação da mistura, concebendo um maior empacotamento do concreto;
- ▶ a resistência à compressão axial do concreto evoluiu, em todas as idades, na medida em que se adicionou o Metacaulim até 8% em substituição à massa de cimento. Na proporção de adição em 10%, verificou-se uma diminuição em relação a 8%, todavia, maior que a família de referência. Pode-se dizer que nessa pesquisa, o patamar de 8% apresentou-se com melhor desempenho, haja vista possivelmente que com 10% de substituição as reações pozolânicas não relevam em relação ao teor de cimento. Portanto, é significativo o aumento de mais de 62% aos 90 dias em relação aos 28 dias nessa propriedade quando se substituiu 8% (família 3) de Metacaulim em relação ao cimento;
- ▶ comparando a resistência à tração por compressão diametral das 4 famílias - na mesma linha da compressão axial, constatou-se elevação das famílias 2, 3 e 4 em relação à família 1 de referência. Entretanto, também verificou-se redução dessa propriedade quando substituiu-se 10% de Metacaulim em comparação à substituição de 8%;
- ▶ o módulo de elasticidade estudado também se elevou diretamente proporcional ao teor da adição, chegando ao estágio de mais de 41% quando comparou-se a família 3 com a família 1 de referência. Contudo, mais uma vez constatou-se redução da família 4 em relação à família 3. Vale inferir que aos 90 dias, essa diferença poderia ser mais substancial, conforme identificado na compressão axial;
- ▶ referente a absorção total, verificou-se que o concreto reduziu a absorção em quase 62% quando comparou-se a família 3 (menor absorção) com a de referência. Vale destacar que o refinamento dos poros justifica essa redução. Entretanto, mais uma vez, a família 4 teve menor desempenho em relação à família 3, trazendo à baila a comprovação de que 8% de substituição do Metacaulim é, pelo menos nessa pesquisa, a melhor proporção identificada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Tecomat – Tecnologia da Construção e Materiais, pela contribuição nessa pesquisa e ao Programa de Pesquisa (Iniciação Científica) e Extensão da Faculdade do Vale do Ipojuca - FAVIP pelo apoio incondicional para realização desse trabalho, característica imperativa dessa Intituição de Ensino Superior.

REFERÊNCIAS

- CARNEIRO, A. M. P. **Notas de Aula da Disciplina: Tecnologia das Argamassas – Mestrado de estruturas**, UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.
- CAQUOT, M. A. **Le role des Matériaux inertes dans Béton**. Memories de la Société des Ingéniers Civils de France. 90° Année, Fascicule n. 5, septembre-October, 1936. p. 563 - 582.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. v.1, capítulo 12, p. 345-380, 2005.

DETWILER, R. J.; BHATTY, J. I.; BHATTACHARJA, S. **Supplementary cementing materials for use in blended cements**. 1996. 96p. Research and development bulletin RD112T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. R. L. **Estudo da influência da substituição de cimento portland por metacaulim em concretos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MOTA, J. M. F. **Influência da Argamassa de Revestimento na Resistência à Compressão Axila em Prisma de Alvenaria Resistente de Blocos Cerâmicos**. Universidade Federal de Pernambuco – Dissertação de Mestrado. Recife, 2006.

MOTA, J.M.F.; PONTES, R.B.; CANDEIAS NETO, J.A.; OLIVEIRA, M.F.; ALMEIDA, H.T.; CARNEIRO, A.M.P. **Análise das patologias em estruturas de concreto na zona litorânea da cidade do Recife-PE**. X Congresso Latinoamericano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción. CONPAT, Valparaíso-Chile, 2009.

MOTA, J.M.F.; COSTA e SILVA, A.J.; BARBOSA, F.B.; ANDRADE, T.W.C.O. e DOURADO, K.C.A. **Avaliação da contaminação por íons cloreto em amostras de concreto submetidas a condições agressivas**. VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Córdoba, Argentina, 2010.

MUNHOZ, F.A.C.; BATTAGIN, A.F.; BATTAGIN, I.L.S. **Trends in standardization of metakaolin for use in concrete**. 52º IBRACON, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 738 p.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. **Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review**. *Applied Clay Science*, Volume 43, Issues 3-4, March 2009, Pages 392-400.

SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. **Avaliação do efeito da sílica extraída da casca do arroz na aderência de argamassas e chapiscos**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de argamassas. São Paulo, 2003.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 203p. 2003.