

O CONTROLE DOS ADITIVOS ACELERADORES NO CONCRETO PROJETADO PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS

A. D. Figueiredo e P. R. L. Helene

Dept^o de Eng^a de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Caixa Postal 61548, São Paulo, SP - CEP 05424-970.

RESUMO

Estudou-se experimentalmente aditivos aceleradores de pega em três etapas. Na primeira etapa, para cada tipo de aditivo, estudou-se o efeito do teor do mesmo nas propriedades do concreto, quais sejam, a pega, a evolução da resistência e a compactação. Comprovou-se que, para cada tipo de aditivo, existe um comportamento específico em função de seu teor, o que implica em exigências de controle diferenciadas para os mesmos, e que a precisão no controle do teor é fundamental para a obtenção de um bom desempenho. Analisou-se a o efeito da pré-hidratação na resistência à compressão do concreto projetado, com o objetivo de avaliar o tempo admissível de contato entre a mistura seca e o aditivo a durante o controle do processo de projeção.

INTRODUÇÃO

Uma das principais características do concreto projetado para obras escavadas, como no caso dos túneis construídos em NATM (*New Austrian Tunnelling Method*), é a exigência de apresentarem elevadas resistências nas primeiras idades. Isto normalmente obtido a partir da utilização de aditivos aceleradores de pega e endurecimento, que também possibilitam uma maior espessura projetada⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, normalmente compostos inorgânicos de silicatos, aluminatos e carbonatos de sódio ou potássio, aplicados isoladamente ou em conjunto⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾.

Este trabalho teve por objetivo analisar a utilização dos aditivos aceleradores de pega sob o ponto de vista de controle do processo. Para isto foram realizados ensaios de avaliação das propriedades do concreto projetado em laboratório de campo e na própria obra de túneis. No laboratório de campo foram utilizados os recursos normais, em locais reservados à realização de ensaios dentro do próprio canteiro de obras. A adoção destas situações reside no fato de necessitar-se de equipamento e equipe de projeção completos mesmo para a moldagem de placas⁽⁵⁾. Com isto, foi possível uma certa reprodução das condições de obra, com possibilidade de caracterizar e fixar as variáveis em jogo. Isto, segundo Glassgold⁽⁶⁾ é fundamental para que seja possível a comparação dos resultados. O equipamento utilizado em todos os experimentos e no túnel foi do tipo via seca com rotor de câmaras, tanto com umidificação simples, no primeiro, como com injeção de água sob pressão, no segundo.

TIPOS E FORMA DE ATUAÇÃO DOS ADITIVOS ACELERADORES

Os aditivos à base de carbonato de sódio são fornecidos em pó, normalmente, o que implica na restrição do seu uso ao concreto projetado via seca. Ele age, basicamente, em conjunto com o silicato tricálcico do cimento (C_3S), acelerando o processo de precipitação de seus compostos hidratados e do hidróxido de cálcio. Desta forma, ele atua como um acelerador de endurecimento⁽³⁾.

Os aditivos líquidos são compostos pelos silicatos de sódio e aluminatos de potássio. Este último tem como característica de ação, quando solubilizado, o fato de se combinar com o sulfato presente no cimento, evitando a formação da etringita. Isto permitirá ao C_3A ter pega instantânea, e o endurecimento rápido do concreto projetado⁽³⁾. Desta forma, pode-se definir o aluminato como um acelerador de pega propriamente dito. Já os aditivos à base de silicatos induzem o cimento a uma pega rápida por estimularem a precipitação dos silicatos de cálcio. Apesar de induzir a uma pega rápida, os silicatos terão um efeito redutor a resistência final do concreto projetado, devido à sua interferência nas reações de hidratação não permitindo uma boa cristalização do material⁽³⁾.

PROPRIEDADES AFETADAS PELO TEOR DE ADITIVO

Pega e resistências iniciais

Para se avaliar a influência do teor de aditivo na pega e o endurecimento inicial do concreto projetado foi utilizado um cimento Portland comum sem adições e o equipamento de projeção via seca com pré-umidificação com injeção de água a alta pressão. Os agregados utilizados consistiam numa areia média e um pedrisco (dimensão máxima de 9,5mm). O aditivo acelerador em pó era misturado na betoneira, juntamente com o restante dos materiais secos (cimento e agregados), e projetado imediatamente após a mistura. Os aditivos líquidos eram diluídos na água a ser bombeada para a pré-umidificação. Os teores dos aditivos aqui fornecidos correspondem à proporção em massa em relação à quantidade de cimento. Os aditivos foram dosados em massa proporcionalmente ao consumo de cimento de cada operação de mistura. O traço utilizado foi de 1:2,50:1,85 (cimento, areia e pedrisco) em massa. A pressão de ar comprimido foi de 0,7 MPa e da água 2,5 MPa. Esta última era injetada no mangote num sistema de pré-umidificação simples a cinco metros do bico de projeção.

A avaliação da pega e das resistências iniciais foi feita através do Penetrômetro de Meynadier (PEM) e, posteriormente, pelo Penetrômetro de Energia Constante (PEC). O valor da resistência à compressão foi obtido por correlação com os índices de penetração dos equipamentos⁽⁷⁾. O uso do PEM foi restrito aos valores inferiores a 1 MPa e o PEC para valores de resistência maiores que este e inferiores a 8 MPa.

Analisando-se Figura 1, referente aos aditivos à base de silicato, percebe-se uma diferença marcante de desempenho de acordo com o teor de aditivo à base de silicato, tendo o teor de 8% um desempenho muito superior ao de 4,3%. Para o caso dos aditivos à base de carbonatos (Figura 2), observou-se que aumentando o teor de 3% para 4,5%, obtém-se um ganho razoável na velocidade de endurecimento. No entanto, para valores de 7,5%, não se obteve nenhum ganho apreciável na velocidade de endurecimento em relação aos anteriores. Os aditivos à base de aluminatos (Figura 3) apresentaram um comportamento bem diverso, mostrando uma queda no desempenho do material com o aumento do teor de aditivo. Nota-se este fato verificando que o teor de 3,0% apresentou desempenho superior ao de 2,5% e 3,5% até as primeiras 4 horas de idade, só sendo "alcançado" por este último quando se tinha passado 6 horas após a projeção. É interessante se notar que o teor de 2,5% foi superior ao de 3,5% até 1 hora e 20 minutos após a projeção, quando então foi superado.

Tais resultados são compatíveis com os obtidos por Bauder⁽¹⁾ e permitem concluir que os aditivos apresentam desempenho sensivelmente diferente

segundo o tipo e o teor aplicado do mesmo. Percebe-se também que o aumento deste teor pode não implicar numa maior velocidade de endurecimento necessariamente. Por isso, deve-se ter em mente que o importante é se garantir a homogeneidade do teor ótimo de aditivo, definido na dosagem a partir de testes de compatibilidade⁽⁸⁾ com o cimento.

Resistência à compressão

Os aditivos aceleradores de pega e endurecimento têm um efeito negativo nas resistências finais do concreto projetado⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. No entanto, ao contrário do que acontece com a pega e as resistências iniciais, a queda de resistência final é sempre mais intensa quanto maior for o teor de aditivo utilizado. Como se pode observar nas Figuras 4. e 5. existe uma correspondência entre o teor de aditivo aplicado, seja silicato ou carbonato, e a queda de resistência a maiores idades.

Os aditivos à base de aluminato não apresentaram uma correspondência significativa entre o teor aplicado e a queda de resistência final, a qual permaneceu uniforme, tanto para os 7 dias, como para os 28 dias de idade (Tabela 1). Pode-se concluir, pela análise dos dados deste item e do anterior que, os teores excessivos de aditivos são sempre indesejados por não garantirem um melhor desempenho quanto à pega e endurecimento inicial e, seguramente, prejudicarem as resistências a maiores idades.

Compactação

Foi constatada uma correspondência entre a maior resistência à compressão e o menor volume de vazios permeáveis neste estudo. Deve-se salientar que a principal dificuldade neste estudo foi a manutenção da consistência do material devido à variação no teor de aditivo alterar a demanda de água, o que dificultava o trabalho do mangoteiro. Assim, pode-se perceber pelos gráficos apresentados nas Figuras 6. e 7., que os aditivos aceleradores de pega por essência (aluminatos e silicatos), apresentam um crescimento do volume de vazios permeáveis para teores de aditivo mais elevados. Isto pode ser comprovado pelas correlações obtidas.

Pode-se atribuir a maior dificuldade de compactação do material ao efeito instantâneo que estes aditivos apresentam, pois as últimas camadas projetadas de concreto não conseguem compactar as inferiores, já endurecidas. Este efeito se sobrepõe a interferência do aditivo nas reações de hidratação do material e, como isto, tem-se um material mais poroso dotado de um gel com menor grau de cristalização.

Já os aditivos à base de carbonato (Tabela 2), não apresentaram um efeito sensível no grau de compactação. Isto se deve ao fato de ser um acelerador de endurecimento, ou até um acelerador de pega de baixo desempenho, quando comparado aos demais. Por isto, a queda de resistência a maiores idades se deveria fundamentalmente à ação prejudicial do material nas reações de hidratação do cimento.

Controle do teor de aditivos

Para ilustrar um problema típico de controle do teor de aditivo, foram executadas duas placas de concreto projetado, num intervalo de dez minutos, utilizando-se o sistema de alimentação onde o aditivo era adicionado à mistura seca na máquina de projeção com o auxílio de um caneco. Este procedimento, apesar de não recomendado, era muito utilizado em obras brasileiras. O equipamento utilizado era dotado de pré-umidificação simples a três metros do bico de projeção, isto é, com água injetada a baixa pressão. Este estudo foi feito na própria obra e não no laboratório de campo, aproveitando-se de um intervalo no trabalho de projeção do concreto.

Na Figura 8. encontram-se os resultados da análise da resistência inicial das duas placas moldadas na obra, obtida pelo PEM⁽⁷⁾. Observa-se uma nítida diferença de desempenho entre as duas placas que deveriam ser idênticas. Na Tabela 3. encontram-se os valores obtidos para a resistência à

maiores idades. Consta-se que a diferença de desempenho diminui à medida que avança a idade do material, chegando a valores equivalentes aos 91 dias. A resistência aos 7 dias obtida com a placa B é maior que a da placa A a nível de 95% de significância. Demonstra-se o mesmo para a resistência aos 28 dias a nível de 90% de significância e não foi possível comprovar a ocorrência de diferença significativa entre as resistências aos 91 dias de idade. A compactação do material apresentou-se sem grandes alterações com valores que podem ser imputados como equivalentes (Tabela 3.). Isto comprova o fato de que as diferenças obtidas entre os resultados das duas placas foram devidas à ação não otimizada dos aditivos.

O EFEITO DA PRÉ-HIDRATAÇÃO

A pré-hidratação é o fenômeno que se dá envolvendo o cimento, a umidade, que naturalmente se faz presente nos agregados, e os aditivos aceleradores de pega quando em contato antes da projeção. Anteriormente foi feita a análise deste problema levando-se em consideração apenas o contato entre o cimento e a água dos agregados⁽³⁾⁽⁴⁾, pois se considerava que o aditivo fosse lançado o mais tarde possível. Todavia, em algumas obras brasileiras, em que o *lay out* do canteiro permitia, procedia-se à mistura do aditivo em pó na própria betoneira, de modo a se garantir o teor utilizado e homogeneização do material.

Com isto em vista foi feito um estudo onde se moldou uma série de três placas com equipamento dotado de injeção de água sob pressão. Na série se moldava uma placa imediatamente após a mistura, outra trinta minutos depois e a terceira uma hora depois. Foi utilizado um cimento de alta resistência inicial e um aditivo acelerador à base de carbonato. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial se encontram apresentados na Tabela 4. Houve uma perda de resistência para as misturas que não foram projetadas imediatamente após a projeção. O tempo de espera equivalente a 30 minutos apresentou o pior desempenho, correspondente à maior perda de resistência e de compactação para o material.

COMENTÁRIOS FINAIS

Torna-se evidente, a partir dos resultados obtidos e aqui apresentados, que os aditivos aceleradores de pega e endurecimento utilizados no concreto projetado por via seca, devem seguir alguns parâmetros básicos obrigatoriamente. O primeiro é a definição do tipo e do teor mínimo necessário para o atendimento dos requisitos de projeto quanto às baixas idades. O segundo é o respeito a essa limitação, uma vez que, utilizando-se teores maiores nem sempre se consegue um ganho de desempenho nas primeiras idades mas, com certeza, se perderá parte das resistências a maiores idades. Além disso, este teor deve ser mantido com a máxima regularidade possível, sendo perfeitamente homogeneizado no material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BAUDER, W. (1976) An european accelerator manufacturer's views In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. USA.
- (2) MORGAN, D. R. (1988) Dry-mix silica fume shotcrete in Western Canada, Concrete International, jan 1988.
- (3) SCHUTZ, R. J. (1976) Properties of shotcrete admixtures In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. USA.
- (4) SCHUTZ, R. J. (1981) Factors influencing dry-process accelerated shotcrete. Concrete International. USA. jan 1981.
- (5) FIGUEIREDO, A. D. (1992) Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle da Qualidade do Processo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.
- (6) GLASSGOLD, I. Leon. (1989) Shotcrete durability: An Evaluation. Concrete

International, Aug 1989.

- (7) PRUDÊNCIO Jr., L. R. (1991) Strength Evaluation of Early Age Shotcrete. In: Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design. ACI Publication SP-128.CT92. USA.
- (8) PRUDÊNCIO Jr., L. R. (1991) Dosagem e controle do concreto projetado. In: Ciclo de Palestras: Concreto Projetado - Aplicações e Novas Tendências. Escola Politécnica da USP e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.
- (9) STEENSON, H.N. (1973) Using accelerator - wet process. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Use of Shotcrete for Underground Structural Support. ASCE - ACI Publication SP-45. USA.
- (10) PACKMAM, G. R. (1976) Admixtures for shotcrete, In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Shotcrete for Ground Support. ACI Publication SP-54. USA.

TABELA 1: Resistência à compressão do concreto projetado em função dos teores de aditivo à base de aluminato.

TEOR DE ADITIVO (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)(NBR 5739 DA ABNT)			
	9 DIAS	C. V. *	28 DIAS	C. V. *
0,0	30,7	2,3%	42,4	2,3%
2,5	25,1	1,3%	33,1	1,4%
3,0	26,0	5,2%	32,2	10,6%
3,5	25,6	1,5%	33,3	7,1%

* Coeficiente de variação

TABELA 2: Volume de vazios permeáveis (ASTM C642) em função do teor de aditivo à base de carbonato.

TEOR DE ADITIVO (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
3,0	15,3	0,62
4,5	14,9	1,59
7,5	15,9	0,30

TABELA 3: Resistência à compressão axial do concreto projetado executado em obra.

PLACA	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)(NBR 5739 DA ABNT)						VOL. DE VAZIOS PERMEÁ. (%)	C.V. *
	7 DIAS C.V. *		9 DIAS C.V. *		28 DIAS C.V. *			
A	21,1	4,5	30,7	6,1	36,4	14,3	15,6	2,97
B	26,1	6,3	33,4	0,7	37,2	14,4	16,0	2,65

* Coeficiente de variação

TABELA 4: Efeito da pré-hidratação na resistência à compressão axial do concreto projetado executado com cimento ARI.

TEMPO DE ESPERA (min)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS (%)		RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)(NBR 5739 DA ABNT)			
		C.V.*	7 DIAS	C.V.*	28 DIAS	C.V.*
0	15,6	1,3%	23,8	19,6%	29,0	8,2%
30	23,2	4,3%	11,8	16,2%	17,5	21,1%
60	15,6	1,3%	22,3	9,5%	29,2	7,5%

* Coeficiente de variação

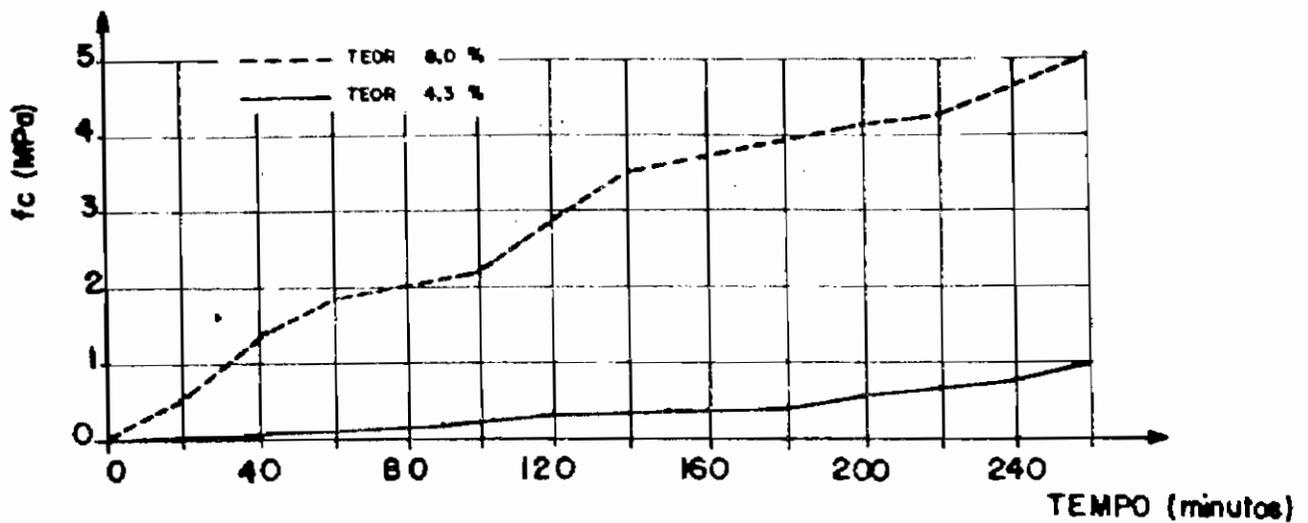


FIGURA 1: Resistências iniciais para aditivo à base de silicato.

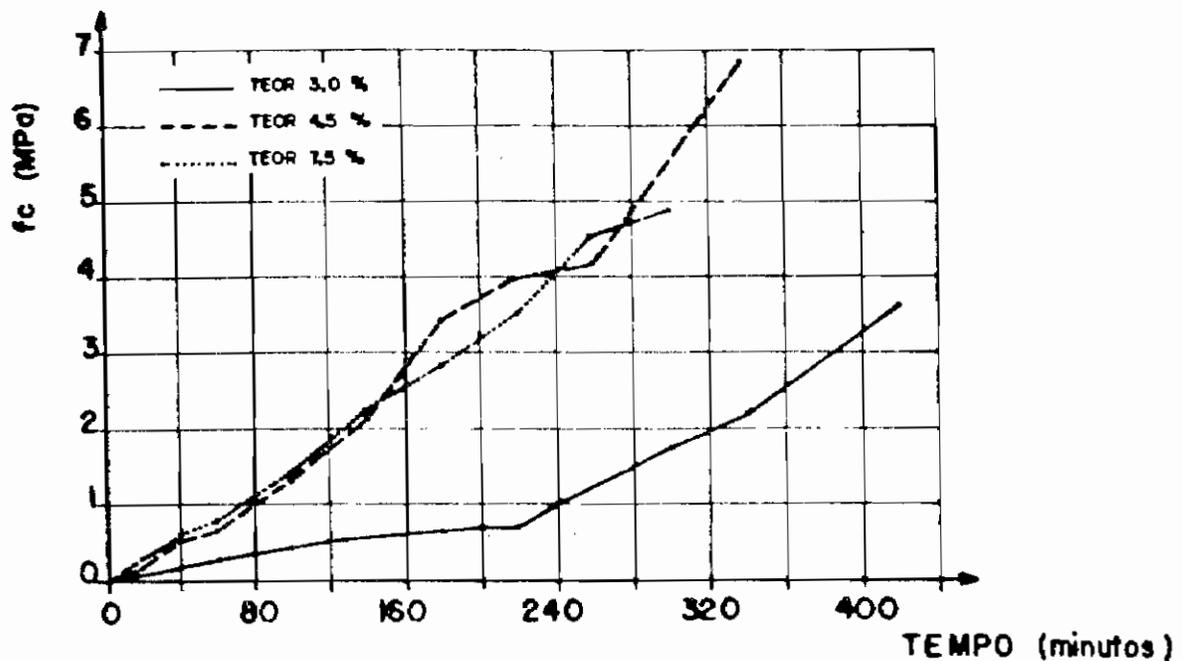


FIGURA 2: Resistências iniciais para aditivo à base de carbonato.

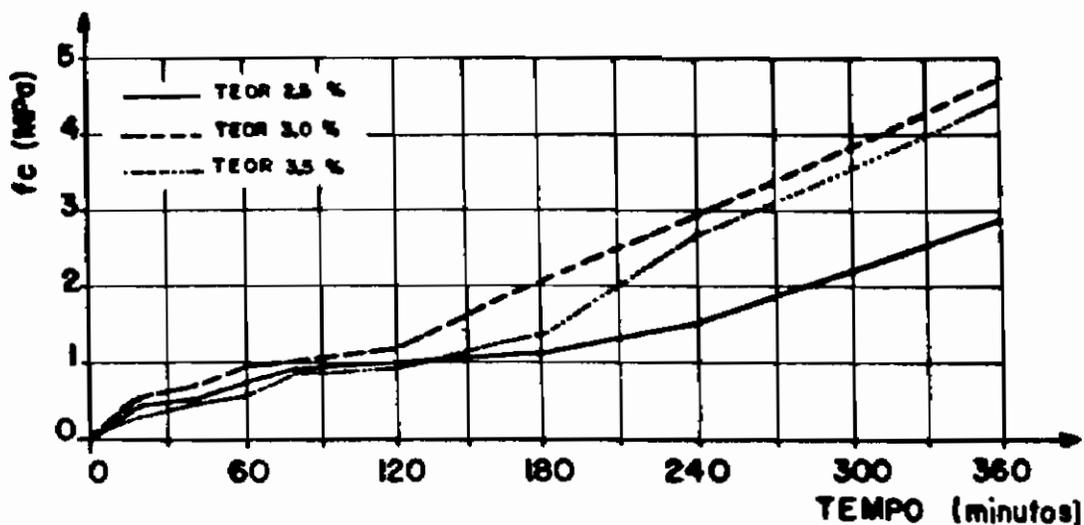
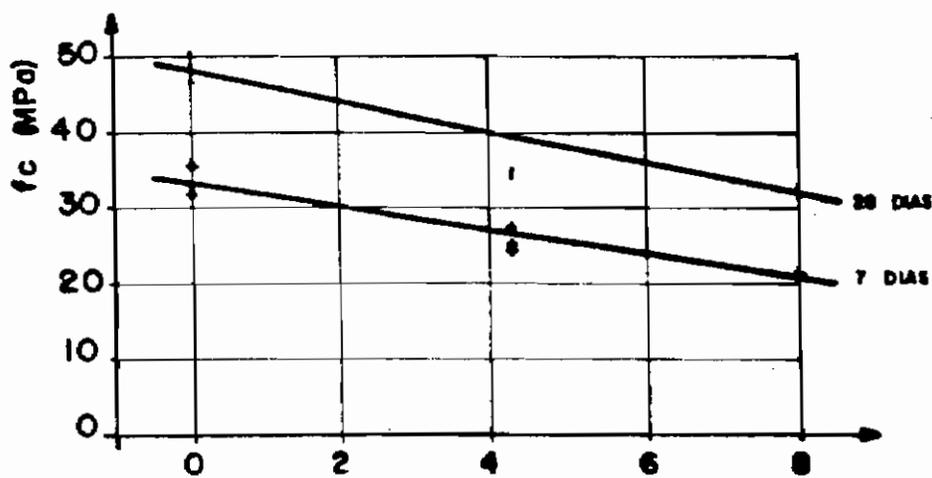


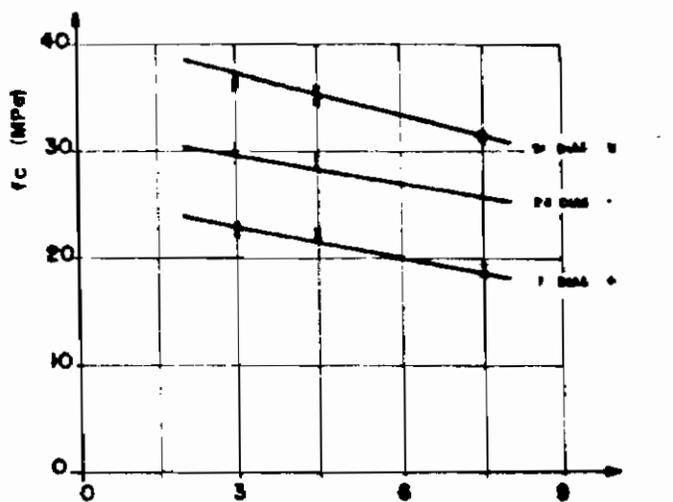
FIGURA 3: Resistências iniciais para aditivo á base de aluminato.



$$f_{c7} = 33,13 - 1,51 * A \quad (r^2 = 0,931)$$

$$f_{c28} = 47,45 - 2,49 * A \quad (r^2 = 0,952)$$

FIGURA 4: Correlação entre as resistências à compressão aos 7 e aos 28 dias e o teor de aditivo á base de silicato.

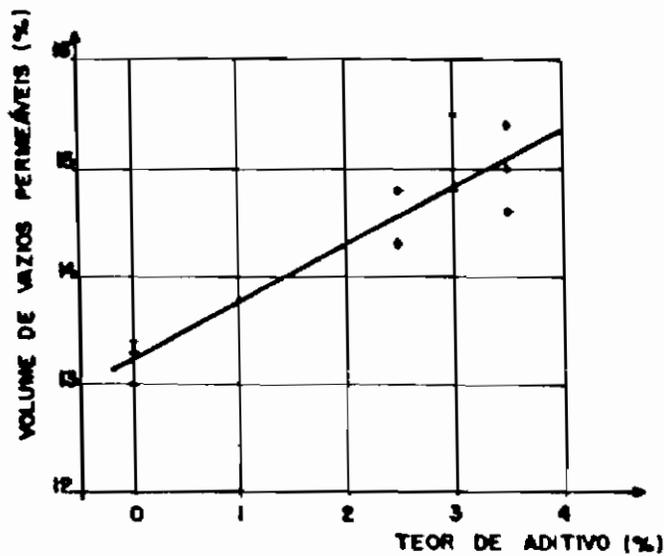


$$f_{c7} = 25,57 - 0,94 * A \quad (r^2 = 0,893)$$

$$f_{c28} = 32,95 - 0,94 * A \quad (r^2 = 0,900)$$

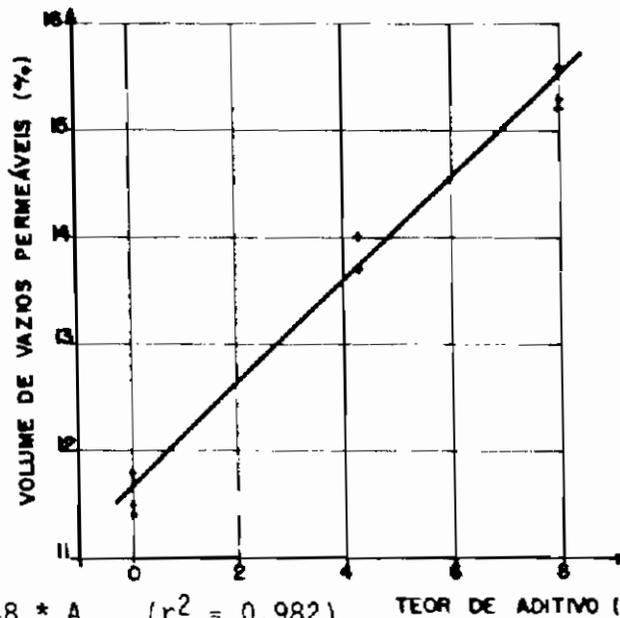
$$f_{c91} = 40,10 - 1,16 * A \quad (r^2 = 0,966)$$

FIGURA 5: Correlação entre as resistências à compressão aos 7, aos 28 e aos 91 dias e o teor de aditivo á base de carbonato.



$$VVP = 13,23 + 0,53 * A \quad (r^2 = 0,851)$$

FIGURA 6: Influência do teor de aditivo à base de aluminato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado.



$$VVP = 11,65 + 0,48 * A \quad (r^2 = 0,982)$$

FIGURA 7: Influência do teor de aditivo à base de silicato no volume de vazios permeáveis do concreto projetado.

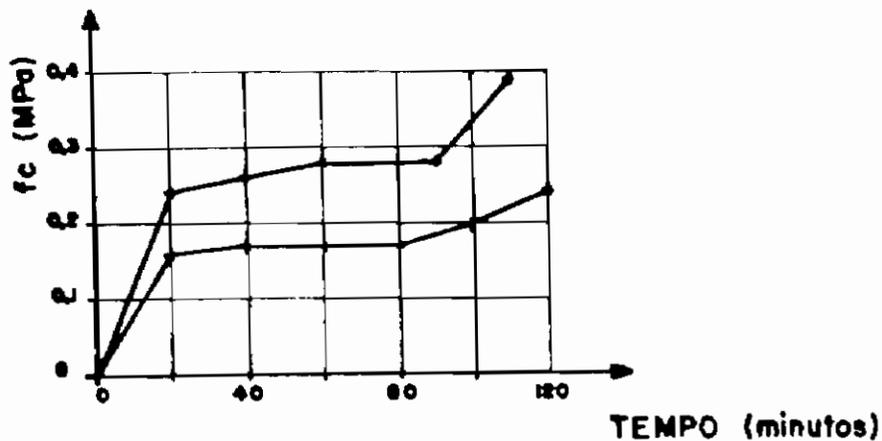


FIGURA 8: Resultados obtidos na análise da evolução da resistência inicial em placas moldadas em obra.