ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 SÃO PAULO/SP - Fone (0XX11) 3760-5300 - FAX (0XX11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br
Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio - Laboratório Credenciado pelo INMETRO nº CLF–0024

GERÊNCIA DE TECNOLOGIA **RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 17697**

Amostras nºs: 55550,55732,55899 e 55998 **Datas de Entrada:** 26.12.01 e 14.03.01

Interessado: Votorantim Cimentos Ltda

Referência: Orç 2216

Materiais declarados: Cimentos e escória granulada de alto -forno

Objetivo: Avaliação da adição de escória em diferentes tipos de cimento e sua repercussão nas propriedades do concreto

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados de estudo de três amostras de cimento CP II-E-40, CP II-F-40 e CP V-ARI.

O objetivo do estudo foi comparar o desempenho dos cimentos com adição crescente de escória granulada de alto-forno e sua repercussão em algumas propriedades dos concretos dosados com esses cimentos.

Para cada um dos cimentos foram adicionados teores de 0,10, 30 e 50% de escória, os quais juntamente com agregados graúdos e miúdos fornecidos pela ABCP, foram utilizados para o estudo de dosagem dos concretos. Esse estudo contemplou a adoção de valores de relação água/cimento iguais a 0,4, 0,5 e 0,7, fixando-se o teor de argamassa em 50% e a consistência medida pelo abatimento do tronco-de-cone igual a 80 ± 10mm. Foram determinadas várias propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido tais como perda de abatimento, capilaridade, índice de vazios, resistência à compressão e módulo de deformação ,bem como foram feitas algumas considerações sobre o desempenho técnico-econômico decorrente do uso da escória ,aliado ao desempenho do próprio cimento no concreto .

2 AMOSTRAS

As amostras coletadas e enviadas pela Votorantim Cimentos receberam as seguintes identificações:

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

ABCP	Interessado
55550	cimento CP II-F-40, da marca Itaú
55988	cimento CP II-E-40, da marca Liz
55989	escória granulada de alto-forno, proveniente de Minas Gerais
56732	cimento CP V-ARI PLUS, da marca Ciminas

3 MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS

NBR 9203/85	Cimento Portland Comum e Clínquer - Análise Química por Complexometria
NBR 7227/89	Cimento Portland – Determinação de Óxido de Cálcio Livre pelo Etileno Glicol
NBR 5747/89	Cimento Portland – Determinação de Óxido de Sódio e Potássio por Fotometria de Chama
NBR 5746/91	Cimento Portland - Determinação de Enxofre na Forma de Sulfeto
NBR 5745/89	Cimento Portland - Determinação de Anidrido Sulfúrico
NBR 5744/89	Cimento Portland - Determinação de Resíduo Insolúvel
NBR 5743/89	Cimento Portland - Determinação de Perda ao Fogo
NBR NM 23/98	Cimento Portland - Determinação da Massa Específica
NBR NM 76/98	Cimento Portland - Determinação da Finura Pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine)
NBR 11579/91	Cimento Portland - Determinação da Finura por Meio da Peneira 75 Micrômetros (Número 200)
NBR 11580/91	Cimento Portland - Determinação da Água da Pasta de Consistência Normal.
NBR 11581/91	Cimento Portland - Determinação dos Tempos de Pega.
NBR 11582/91	Cimento Portland - Determinação da Expansibilidade de Le Chatelier.
NBR 7215/96	Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão.
NBR 7211/83	Agregado para Concreto - Especificação
NBR 7217/87	Agregados - Determinação da Composição Granulométrica

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

NBR 7218/87	Agregados – Determinação do Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis
NBR 7219/87	Agregados - Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos
NBR 7220/87	Agregados - Determinação das Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo
NBR 9937/87	Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregados Graúdos
IT-GT-2004/98	Preparação de Concreto em Laboratório (Concreto Simples)
NBR 5738/94	Moldagem e Cura de Corpos-de-prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto - Procedimento.
NBR NM67/98	Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.
NBR 10342/92	Concreto - Perda de Abatimento
NBR 5739/74	Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto.
ASTM C-469/94	Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
NBR 9779/95	Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Capilaridade
NBR 9778/87	Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica
PO GT 5051	Determinação do Grau de Vitrificação e do Índice de Refração de Escória de Alto-Forno por Microscopia de Luz Transmitida

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO

Escória de alto-forno é o subproduto da fabricação do gusa nos altos-fornos, constituído principalmente por cal (CaO), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Resulta da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada como fundente. Além de cal, sílica e alumina, ocorrem secundariamente sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês. A presença de magnésio está condicionada à utilização de cal dolomítica, calcário magnesiano ou serpentinito como fundentes.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

As principais funções do alto-forno consistem na remoção do oxigênio do minério de ferro, transformação deste em ferro metálico e sua separação da parte não metálica (escória). A separação do ferro é obtida a partir da reação do óxido de ferro (minério) com o CO decorrente da combustão do coque ou carvão vegetal.

A parte metálica (Feº), por sua vez, é separada da não-metálica pela fusão a aproximadamente 1500ºC, quando é formada a escória, menos densa, que incorpora todas as impurezas indesejáveis.

A escória corresponde ao líquido sobrenadante na base do alto-forno (cadinho) que se separa por densidade do gusa, também líquido, e se solidifica ao ser resfriada.

A escória, na saída do alto-forno, pode experimentar um resfriamento rápido ao cair em tanques com água, conhecidos por tanques de granulação, originando um produto similar à areia de rio. Trata-se da escória granulada e vítrea, utilizada tradicionalmente pela indústria do cimento como adição ao cimento.

Devido às suas propriedades hidráulicas latentes, as escórias granuladas básicas vêm sendo utilizadas como adição ao cimento portland em teores de até 70%. De fato, as escórias têm capacidade de gerar, por ativação ou combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, compostos com propriedades aglomerantes similares aos gerados pelo cimento portland.

Além disso, razões de ordem técnico-econômica, como a diminuição do consumo energético específico de fabricação do cimento que as escórias proporcionam, o seu baixo custo e algumas propriedades que repercutem diretamente na durabilidade das obras do concreto, explicam o perfil preferencial de utilização das escórias de alto-forno na indústria cimenteira, como mostra a *Tabela 1*.

TABELA 1 - Utilização da escória de alto-forno

Destinação da escória de alto-forno	Porcentagem de utilização
Reciclagem	1,2
Pavimentação	9,0
Outros	12,2
Aterro	12,9
Fabricação de cimento	64,7

Fonte: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS)

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

As propriedades do cimento portland de alto-forno dependem, em grande parte, do teor e das características das escórias. A atividade hidráulica das escórias, por sua vez, depende principalmente da sua composição química e do seu grau de vitrificação.

A composição química está ligada a diversos fatores intrínsecos de produção (características do alto-forno como temperatura, capacidade de dessulfuração, viscosidade e características do minério de ferro, fundentes e combustível) ao passo que o grau de vitrificação depende do tipo e da rapidez de resfriamento na saída de alto-forno.

Em linhas gerais, quanto mais básica for a escória, maior será sua atividade hidráulica; porém, por se tratar de um subproduto da indústria siderúrgica a partir do qual o gusa, o produto principal, é controlado, torna-se economicamente inviável qualquer controle de composição química da escória que ultrapasse o limite de interferência no processo industrial.

A vitrificação, por sua vez, é obtida industrialmente pelo processo de granulação, que consiste em submeter a escória ainda fundida a um resfriamento brusco, impedindo que os átomos da escória se organizem numa estrutura cristalina estável e sem reatividade.

Em linhas gerais, quanto mais vítrea, mais reativa será a escória; porém, como a composição química do vidro interfere na solubilidade da escória, alguns autores são de opinião de que um início de cristalização de melilita ou merwinita, por alterar a composição do vidro enriquecendo-o em cálcio e alumínio, aumenta a sua reatividade chegando a ser mencionados graus de cristalização de 5%, 25% e até 40%.

Em vista da atividade hidráulica das escórias depender da composição química e do grau de vitrificação, os principais métodos de previsão da hidraulicidade têm por base:

- a própria composição química, através do emprego de módulos químicos ou da determinação do índice de refração por microscopia;
- a sua microestrutura, através da determinação do grau de vitrificação por microscopia ou difratometria de raios X e,
- a sua própria hidratação, através do método acelerado com soda.

Neste trabalho, com vistas à qualificação da escória, optou-se pela adoção da determinação do grau de vitrificação por microscopia e da determinação dos módulos químicos CaO/SiO_2 e $\frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2}$, lembrando que este último deve ser maior que 1, de acordo com as prescrições da NBR 5735.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS

5.1 Agregados

5.1.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo (brita 1) empregado na elaboração das dosagens de concreto é constituído de rocha granítica, proveniente da Pedreira Cantareira, típico de material empregado em concreto na Região Metropolitana de São Paulo. O agregado foi submetido aos ensaios de caracterização física previstos pela norma NBR 7211/83. Os resultados obtidos constam da *Tabela 2,* sendo a distribuição granulométrica ilustrada na *Figura 1*.

TABELA 2 – Caracterização física do agregado graúdo (51068)

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa			
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Limites NBR 7211/93 (graduação 1)
32,0	0	0	0
25,0	0	0	0
19,0	6	6	0 a 10
12,5	57	63	-
9,5	25	88	80 a 100
6,3	10	98	92 a 100
4,8	1	99	95 a 100
2,4	1	100	-
1,2	0	100	-
0,6	0	100	-
0,3	0	100	-
0,15	0	100	-
<0,15	0	100	-
Total	100,0	100	-
Dimensão máxima característica (mm)	25		-
Módulo de finura	6,93		-
Teor de material pulverulento (%)	0,50		<1
Massa específica (g/cm^3)	2,62		–
Absorção (%)	0,59		–
Massa unitária (kg/dm^3)	1,48		–

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

A amostra de agregado graúdo atende a todas as prescrições da norma NBR 7211/83, sendo classificada como graduação 1 (brita 1), podendo ser utilizada nos ensaios laboratoriais.

5.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado na elaboração das dosagens de concreto é constituído por areia natural quartzosa, proveniente do Vale do Rio Paraíba e típico da areia empregada em concretos na Região Metropolitana de São Paulo. O agregado foi submetido aos ensaios de caracterização física previstos pela norma NBR 7211/83. Os resultados obtidos constam da *Tabela 3,* sendo a distribuição granulométrica ilustrada na *Figura 1*.

TABELA 3 – Caracterização física do agregado miúdo (54946)

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa			
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Limites NBR 7211/83 (zona 2)
4,8	0	0	0 a 10
2,4	2	2	0 a 15
1,2	10	12	0 a 25
0,6	28	40	21 a 40
0,3	30	70	60 a 88
0,15	23	93	90 a 100
<0,15	7	100	–
Total	100	217	–
Dimensão máxima característica (mm)	2,40		–
Módulo de finura	2,17		–
Teor de material pulverulento (%)	1,8		(a)
Teor de argila em torrões (%)	0,03		(b)
Massa específica (g/cm^3)	2,63		–
Massa unitária (kg/dm^3)	1,43		–
Impureza orgânica	mais escura que a solução padrão		(c)

a) A amostra apresentou 1,8% de teor de materiais pulverulentos, determinado de acordo com a NBR 7219/83, este valor é inferior ao limite especificado na NBR 7211/83, que estabelece limite máximo de 3% para concretos submetidos ao desgaste superficial e inferior ao limite de 5% para os demais concretos;

b) A amostra apresentou 0,03% de teor de argila e partículas friáveis, determinado de acordo com a NBR 7218/83, valor inferior ao limite máximo de 1,5% estabelecido pela NBR 7211/83

c) A amostra analisada apresentou coloração mais escura que a solução padrão no ensaio previsto pela NBR 7220/87. Em virtude disso, a amostra foi submetida ao ensaio de qualidade, conforme prescreve a norma NBR 7221/87 e os ensaios apresentaram resultados satisfatórios , indicando que o agregado pode ser utilizado em concreto sem prejuízo do mesmo.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

A amostra de agregado miúdo atende à todas as prescrições da norma NBR 7211/83, sendo classificada como areia fina (zona 2), podendo ser utilizada nos ensaios laboratoriais.

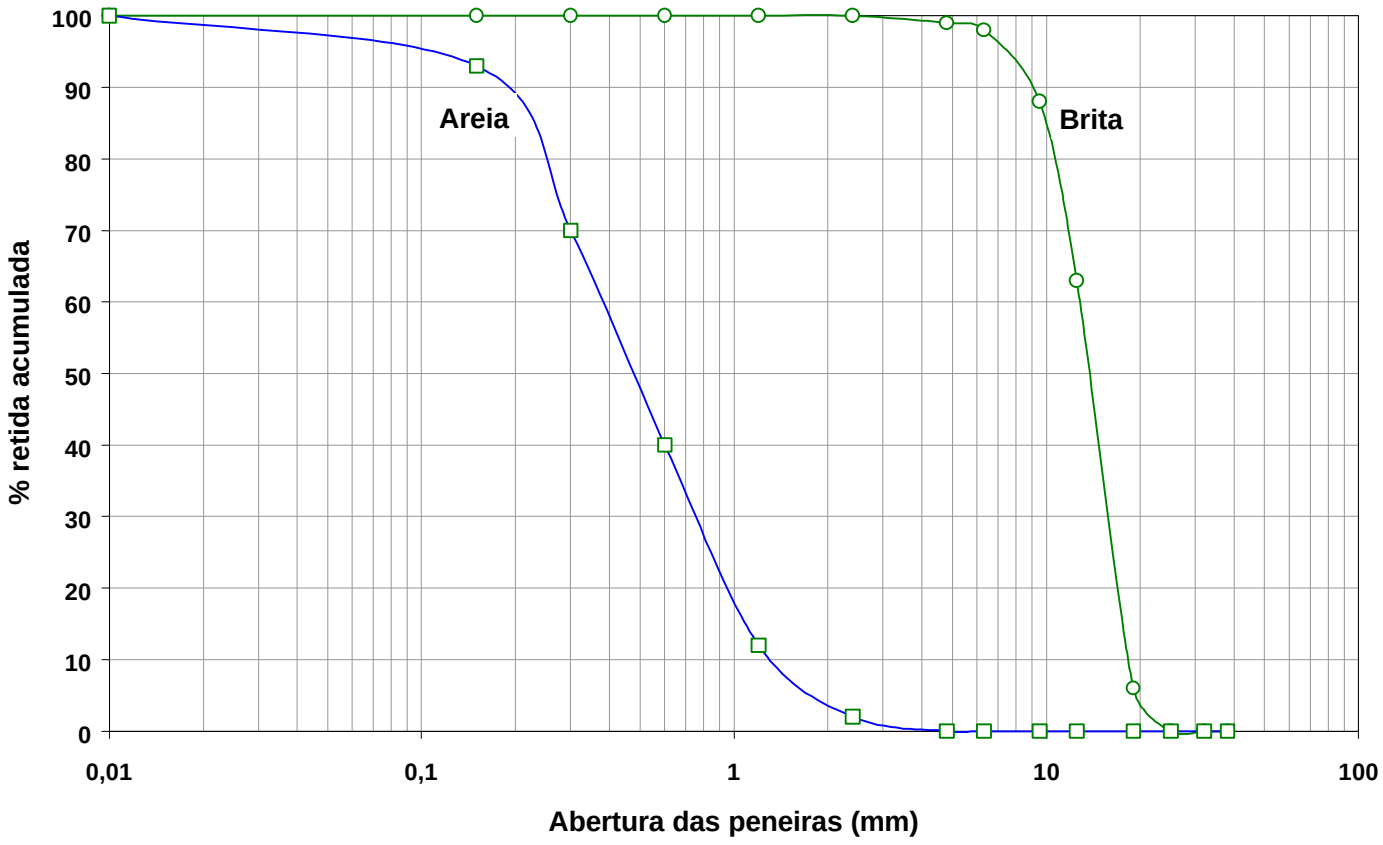

FIGURA 1 – Curva granulométrica dos agregados empregados no estudo

5.2 Cimentos

A *Tabela 4* apresenta os resultados das caracterizações físico-mecânicas das três amostras de cimento.

A *Tabela 5*, por sua vez, apresenta a composição química dos cimentos.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 4 – Características físico-mecânicas dos cimentos

Propriedade		Amostra 55550 (CP II-F-40)	Amostra 55988 (CP II-E-40)	Amostra 56732 (CP V-ARI PLUS)
Finura (%) (# 200)		0,5	0,3	0,3
Área específica (cm^2/g)		3780	4270	4880
Massa específica (g/cm^3)		3,13	3,04	3,11
Consistência normal (%)		26,3	29,9	28,8
Início de pega (h:min.)		2:15	3:00	1:25
Fim de pega (h:min.)		3:15	4:10	2;25
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	-	-	28,6
	3 dias	28,4	30,7	43,8
	7 dias	35,0	42,7	48,3
	28 dias	43,9	54,0	56,2
	91 dias	-	-	

TABELA 5 – Composição química dos cimentos

Ensaio	CP II-E-40	CP II-F-40	CP V-ARI
Perda ao fogo (PF) (%)	5,22	2,10	2,36
Dióxido de silício (SiO_2) (%)	20,82	19,65	19,25
Óxido de alumínio (Al_2O_3) (%)	6,53	4,67	5,10
Óxido de ferro (Fe_2O_3) (%)	2,45	3,07	3,04
Óxido de cálcio (CaO) (%)	59,43	60,70	64,84
Óxido de magnésio (MgO) (%)	1,92	5,35	0,42
Trióxido de enxofre (SO_3) (%)	1,50	2,94	3,00
Óxido de sódio (Na_2O) (%)	0,08	0,02	0,02
Óxido de potássio (K_2O) (%)	0,78	0,62	0,85
Enxofre S (%)	0,11	-	-
Resíduo insolúvel	0,45	0,45	0,21
CaO livre	0,95	1,69	1,26
CO_2	4,74	0,96	1,52
Equivalente alcalino	0,59	0,43	0,58

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Os resultados obtidos indicam que as amostras de cimentos portland compostos com escória e fíler e a amostra de cimento portland de alta resistência inicial obedecem integralmente à especificação das NBR 11578 e NBR 5733, respectivamente.

5.3 Escória Granulada de Alto-Forno

A *Tabela 6* apresenta as características químicas, físicas e mineralógicas da amostra de escória.

TABELA 6 – Características da escória granulada de alto-forno

Ensaio	Amostra 55989 (Escória)
Perda ao fogo (PF) (%)	-
Dióxido de silício (SiO_2) (%)	37,60
Óxido de alumínio (Al_2O_3) (%)	11,97
Óxido de ferro (Fe_2O_3) (%)	1,24
Óxido de cálcio (CaO) (%)	38,29
Óxido de magnésio (MgO) (%)	7,60
Trióxido de enxofre (SO_3) (%)	-
Óxido de sódio (Na_2O) (%)	0,18
Óxido de potássio (K_2O) (%)	0,65
Enxofre S (%)	0,58
Massa específica (g/cm^3)	2,90
Área específica (cm^2/g)	3910
Resíduo na peneira 75 µm (%)	1,0
Grau de vitrificação (%)	98,5
Índice de refração	variável 1,61 a 1,66, com predominância de 1,63
CaO/SiO_2	1,02
$(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2$	1,53

Os resultados indicam que a escória é básica (CaO/SiO_2 = 1,02) e apresenta alto grau de vitrificação obedecendo integralmente às especificações de escória para adição ao cimento previstas na NBR 5735/91, isto é, granulada e possui índice $CaO + MgO + Al_2O_3$/ SiO2 > 1. Entretanto, a amostra mostrou-se menos básica que a escória tradicionalmente utilizada pela indústria cimenteira, cuja relação CaO/SiO_2 é aproximadamente igual a 1,2. O índice de refração variável de 1,61 a 1,66 sugere a mistura de escórias ácida e básica, cujo resultado final atende à normalização.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

5.4 Proporcionamento das Misturas de Cimentos Experimentais

Para cada uma das amostras de cimento de partida foram preparadas misturas experimentais com adição de zero (referência), 10, 30 e 50% de escória em relação à massa total de aglomerante (cimento + escória).

As misturas foram homogeneizadas em homogeneizador de 300 litros de capacidade durante 2 horas em quantidade suficiente para os estudos de dosagem do concreto.

As misturas receberam as seguintes identificações :

TABELA 7 – Composição das misturas experimentais

Cimentos experimentais	Composição em porcentagem de massa			
	CP II-F-40	CP II-E-40	CP V-ARI PLUS	ESCÓRIA (55989)
55550	100	-	-	-
55550/10	90	-	-	10
55550/30	70	-	-	30
55550/50	50	-	-	50
55988	-	100	-	0
55988/10	-	90	-	10
55988/30	-	70	-	30
55988/50	-	50	-	50
56732	-	-	100	0
56732/10	-	-	90	10
56732/30	-	-	70	30
56732/50	-	-	50	50

6 CURVAS DE ABRAMS E CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS

6.1 Preparo dos Concretos

Os parâmetros fixados para preparação dos concretos foram os seguintes:

- Relação água/cimento = 0,40 – 0,50 – 0,70.
- Abatimento pelo tronco de cone = (80±10)mm.
- Teor de Argamassa = 50%.

Na sequência foram realizados os seguintes experimentos :

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

- Determinação da perda de abatimento
- Moldagens de corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm para serem rompidos nas idades de 03, 07, 28 e 91 dias de idade.
- Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 15x30 cm para serem submetidos, na idade de 28 dias, ao ensaio de módulo de deformação.
- Moldagem de corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50 cm para serem submetidos, na idade de 28 dias, ao ensaio de tração na flexão.
- Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm para serem submetidos, na idade de 28 dias, ao ensaio de absorção por capilaridade.
- Moldagem de corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm para serem submetidos, na idade de 28dias, aos ensaios de massa específica real, absorção e índice de vazios.

Com base nos parâmetros fixados, foram elaboradas as curvas de Abrams. Os concretos foram preparados em betoneira estacionária com capacidade de 50 litros, eixo vertical e mistura forçada, com valores de relação água/cimento supra citados.

A preparação dos concretos obedeceu a uma seqüência de colocação dos materiais conforme estabelecido na IT-GT-2004, do sistema de Qualidade ISO 9002 da ABCP. Primeiramente a betoneira (cuba, pás etc.) foi umedecida, sendo adicionado todo agregado graúdo e parte da água de amassamento (± 1/3 de água), com o acionamento da betoneira por 15s. Em seguida foi adicionado o cimento e uma outra parte da água de amassamento (± 1/3 de água), e a betoneira acionada por mais 45 segundos. Por último foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 3 minutos.

Imediatamente após a mistura de cada um dos concretos realizaram–se ensaios para determinação das propriedades dos concretos no estado fresco. Determinaram–se o abatimento pelo tronco de cone, a perda do abatimento pelo tronco de cone, a massa específica e os teores de ar incorporado.

Com a verificação dos resultados do abatimento de cada um dos concretos e a aceitação de acordo com o valor previamente estabelecido, moldaram–se corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm) para determinação das resistências à compressão nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, segundo a NBR 5739/94. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida, desmoldados após 24 horas e mantidos em cura até a idade de ruptura.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s) . Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

6.2 Características do concreto

As características dos concretos no estado fresco e os valores de resistência à compressão são apresentadas nas *Tabelas 8 a 10*.

TABELA 8 - Características dos concretos – Relação a/c = 0,40

Identificação		Traço unitário cim :a :b1	Consumo de cimento (kg/m^3)	Umidade (%)	Abatimento (mm)	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)		
Cimento	Teor de Escória							3 dias	7 dias	28 dias
CP II-F-40 (55550)	0	1:1,105:2,105	515	9,5	90	1,1	2380	34,5	39,1	47,3
	10	1:1,198:2,198	496	9,1	75	1,4	2360	31,9	37,9	47,0
	30	1:1,128:2,127	508	9,4	90	1,0	2360	27,8	38,1	53,1
	50	1:1,174:2,174	498	9,2	70	1,1	2360	23,5	37,9	51,7
CP II-E 40 (55988)	0	1:1,000:2,000	534	10,0	85	0,7	2350	41,3	50,8	56,8
	10	1:1,128:1,127	507	9,4	70	1,2	2350	34,5	47,0	59,8
	30	1:1,083:2,084	515	9,6	80	0,9	2360	32,2	44,5	59,6
	50	1:1,041:2,041	523	9,8	90	0,8	2360	22,3	41,6	60,0
CP V-ARI PLUS (56732)	0	1:1,106:2,105	514	9,5	70	0,8	2370	47,7	53,6	62,0
	10	1:1,151:2,151	504	9,3	70	0,9	2380	46,1	49,3	63,5
	30	1:1,083:2,084	517	9,6	75	0,9	2380	38,6	47,6	62,7
	50	1:1,128:2,127	507	9,4	80	0,8	2370	30,5	37,5	56,5

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 9 – Características dos concretos - Relação a/c = 0,50

Identificação		Traço unitário cim :a :b1	Consumo de cimento (kg/m^3)	Umidade (%)	Abatimento (mm)	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m^3)	Resistência à compressão (MPa)		
Cimento	Teor de Escória							3 dias	7 dias	28 dias
CP II-F-40 (55550)	0	1:1,809:2,809	388	8,9	75	1,2	2350	23,9	28,9	39,4
	10	1:1,841:2,841	384	8,8	75	2,0	2320	22,6	28,7	36,7
	30	1:1,747:2,747	394	9,1	90	1,3	2340	18,2	25,6	44,3
	50	1:1,778:2,778	389	9,0	75	1,1	2350	14,1	24,8	45,2
CP II-E-40 (55988)	0	1:1,778:2,660	390	9,2	75	0,9	2350	32,8	44,2	46,4
	10	1:1,778:2,660	390	9,0	70	0,9	2370	26,0	40,7	46,3
	30	1:1,778:2,660	396	9,2	85	1,0	2340	21,5	35,7	46,6
	50	1:1,660:2,659	403	9,4	85	1,1	2330	15,7	31,6	47,9
CP V-ARI PLUS (56732)	0	1:1,632:2,631	409	9,5	80	0,9	2360	37,9	41,7	52,1
	10	1:1,718:2,718	398	9,2	70	1,0	2360	36,7	40,9	51,8
	30	1:1,688:2,688	401	9,3	80	0,9	2370	28,6	36,2	42,8
	50	1:1,717:2,718	396	9,2	70	0,9	2350	23,1	33,5	48,7

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 10 - Características dos concretos – Relação a/c = 0,70

Identificação		Traço unitário cim :a :b1	Consumo de cimento (kg/m^3)	Umidade (%)	Abatimento (mm)	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m^3)	Resistência à compressão (MPa)		
Cimento	Teor de Escória							3 dias	7 dias	28 dias
CP II-F-40 (55550)	0	1:2,763:2,764	285	9,3	80	1,3	2330	12,7	17,3	23,3
	10	1:2,763:3,764	285	9,3	70	1,3	2330	12,4	18,2	26,2
	30	1:2,723:3,724	287	9,4	70	1,3	2330	9,6	14,5	27,1
	50	1:2,805:3,804	282	9,2	85	1,1	2320	7,9	14,2	26,7
CP II-E-40 (55988)	0	1:2,723:3,722	287	9,4	80	0,9	2320	14,1	19,3	27,3
	10	1:2,684:3,684	289	9,5	80	1,2	2320	13,2	20,3	30,6
	30	1:2,646:3,646	291	9,6	70	1,1	2330	10,2	18,7	30,6
	50	1:2,182:3,181	325	11,0	70	1,1	2290	7,5	17,6	26,3
CP V-ARI PLUS (56732)	0	1:2,572:3,573	297	9,8	80	0,9	2330	21,7	25,2	34,2
	10	1:2,684:3,684	290	9,5	80	1,0	2320	22,1	25,2	33,1
	30	1:2,646:3,646	292	9,6	90	1,0	2310	15,9	21,0	29,9
	50	1:2,723:3,724	287	9,4	80	1,0	2330	10,1	15,6	28,1

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

6.3 Curvas de Abrams e suas Equações

As *Figuras 2 a 13* mostram a representação gráfica da evolução da resistência à compressão do concreto aos 3, 7 e 28 dias em função da relação a/c para cada uma das misturas experimentais, ao passo que a *Tabela 11* exibe as equações dessas curvas, e a *Tabela 12* exibe as equações de cálculo de consumo estimado de cimento (C) e a relação agregado/cimento (m).

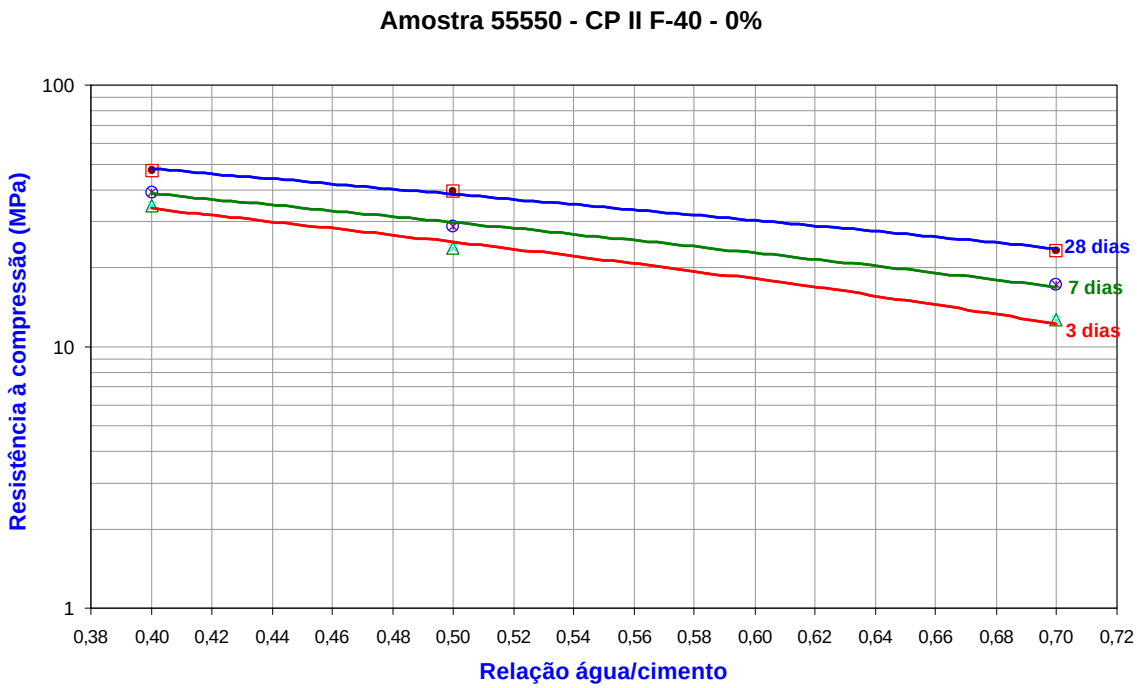

Figura 2 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II F-40** sem adição de escória

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

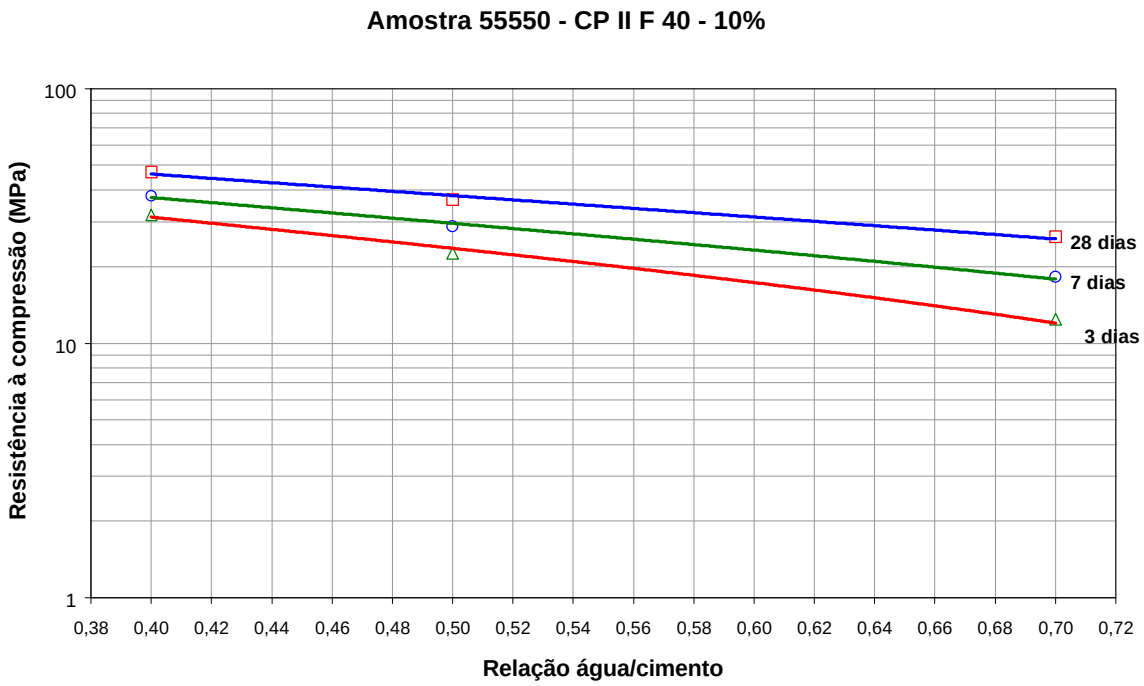

Figura 3 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II F-40** com adição de 10% de escória.

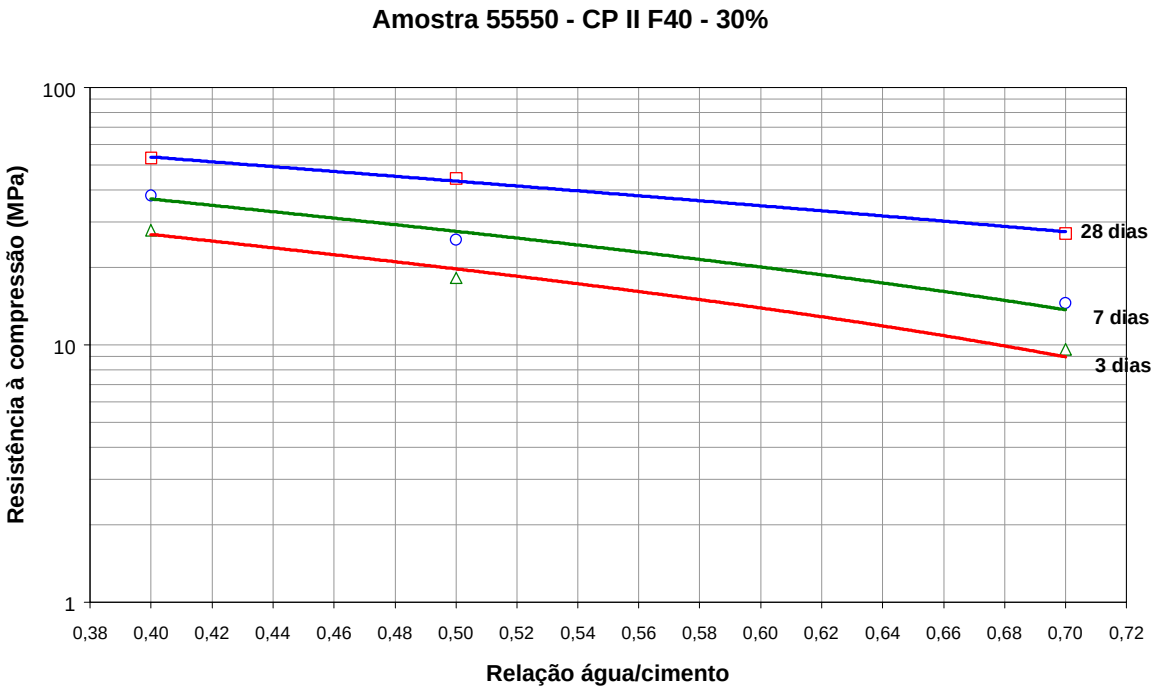

Figura 4 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II F-40** com adição de 30% de escória.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

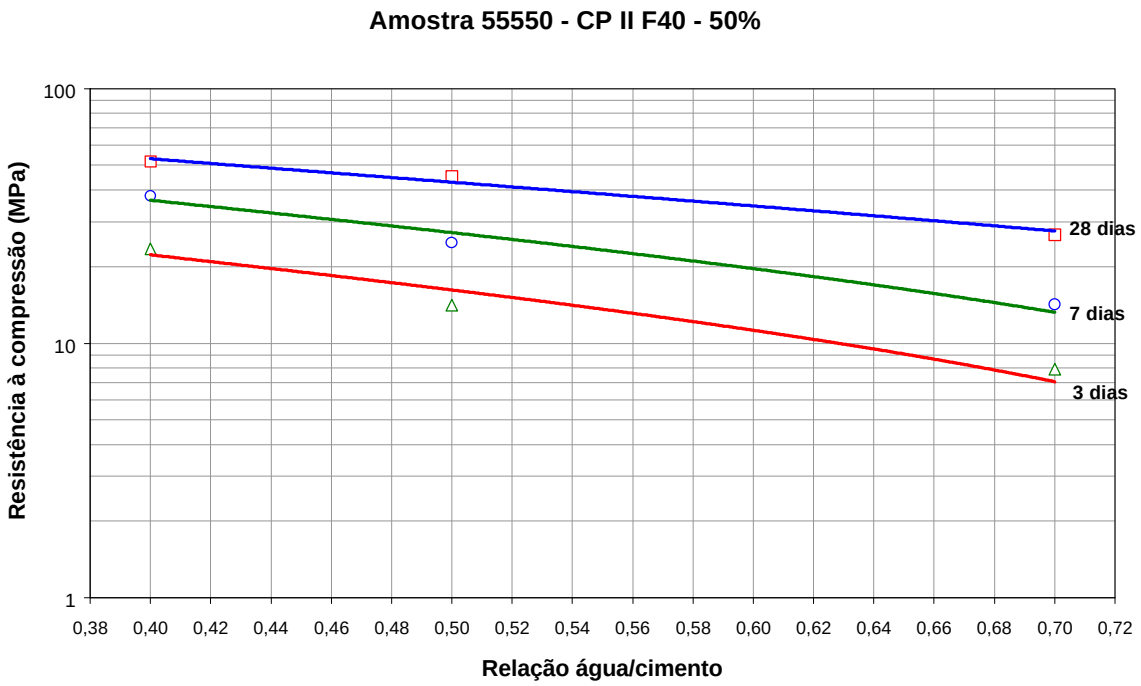

Figura 5 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II F-40** com adição de 50% de escória.

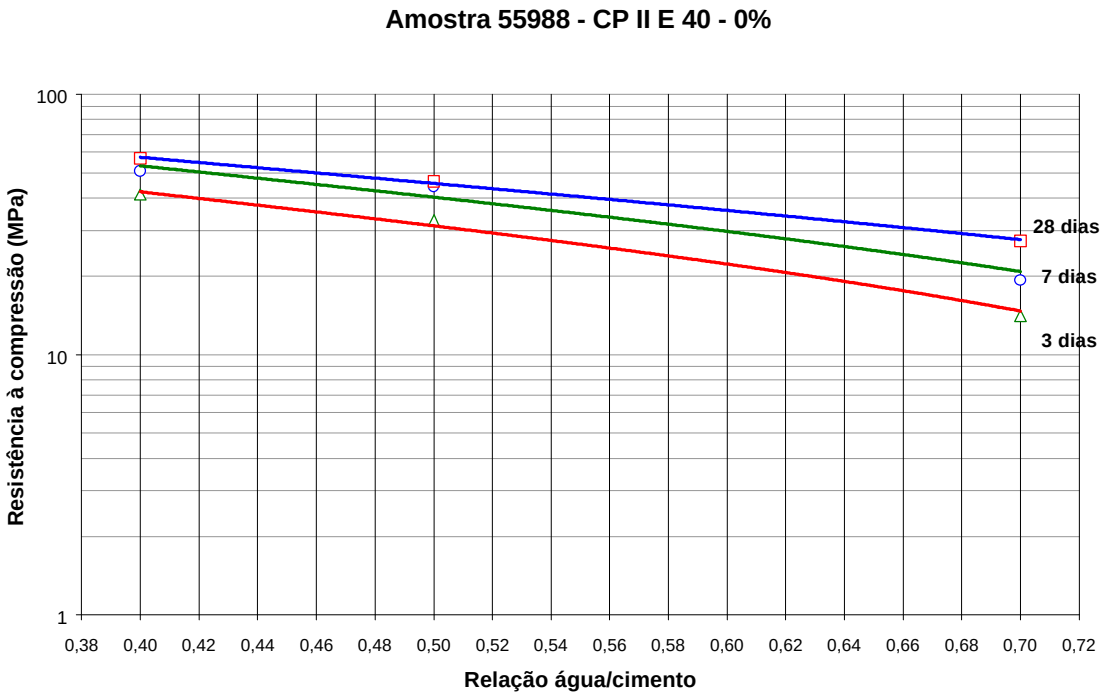

Figura 6 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II E-40** sem adição de escória.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

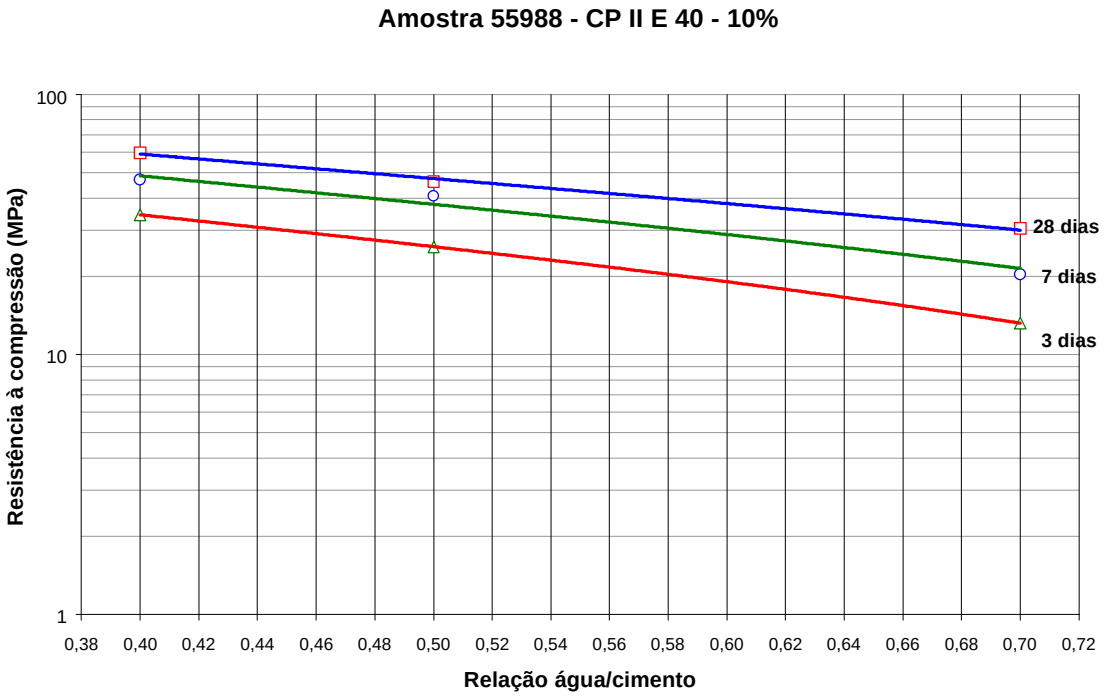

Figura 7 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II E-40** com adição de 10% de escória.

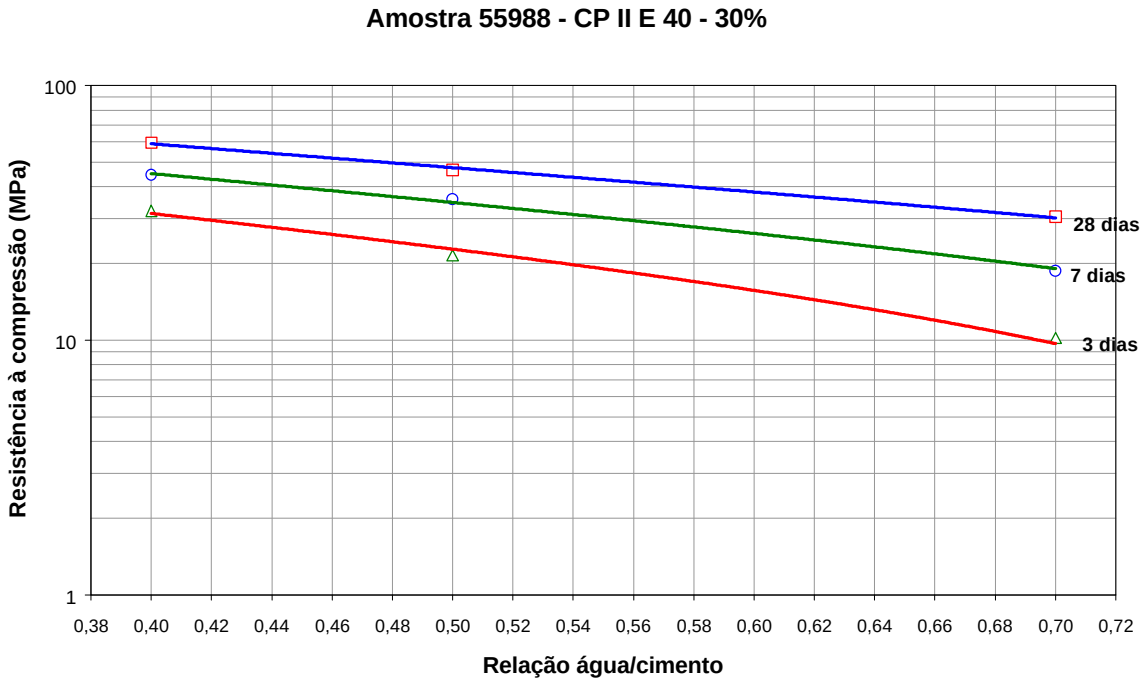

Figura 8 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II E-40** com adição de 30% de escória

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

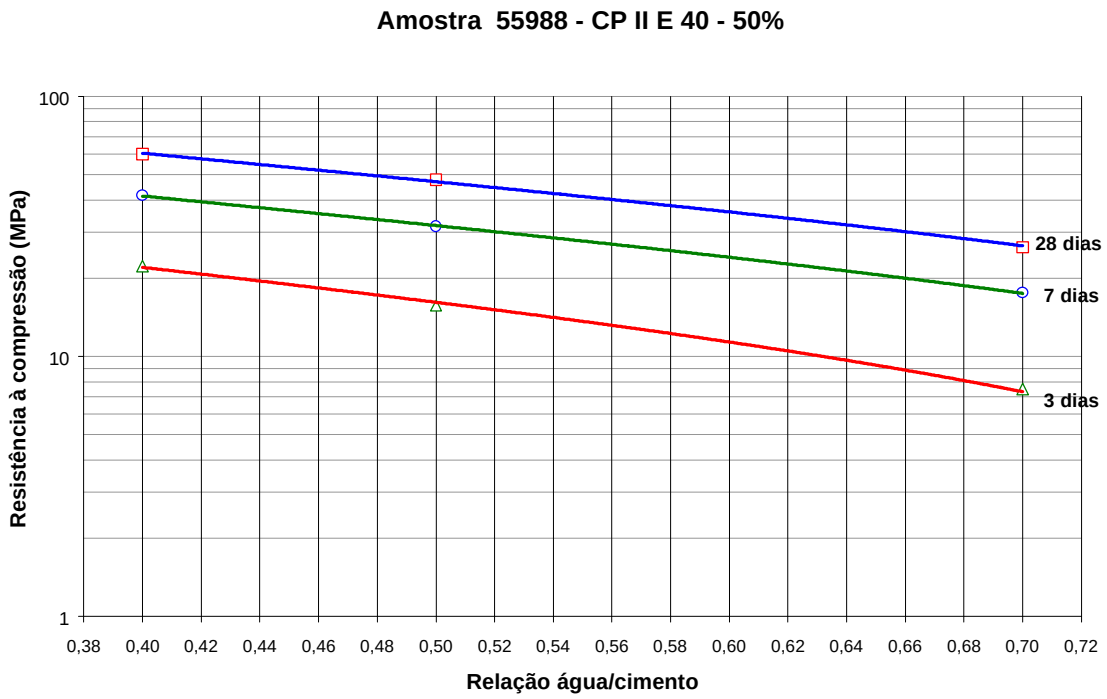

Figura 9 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP II E-40** com adição de 50% de escória.

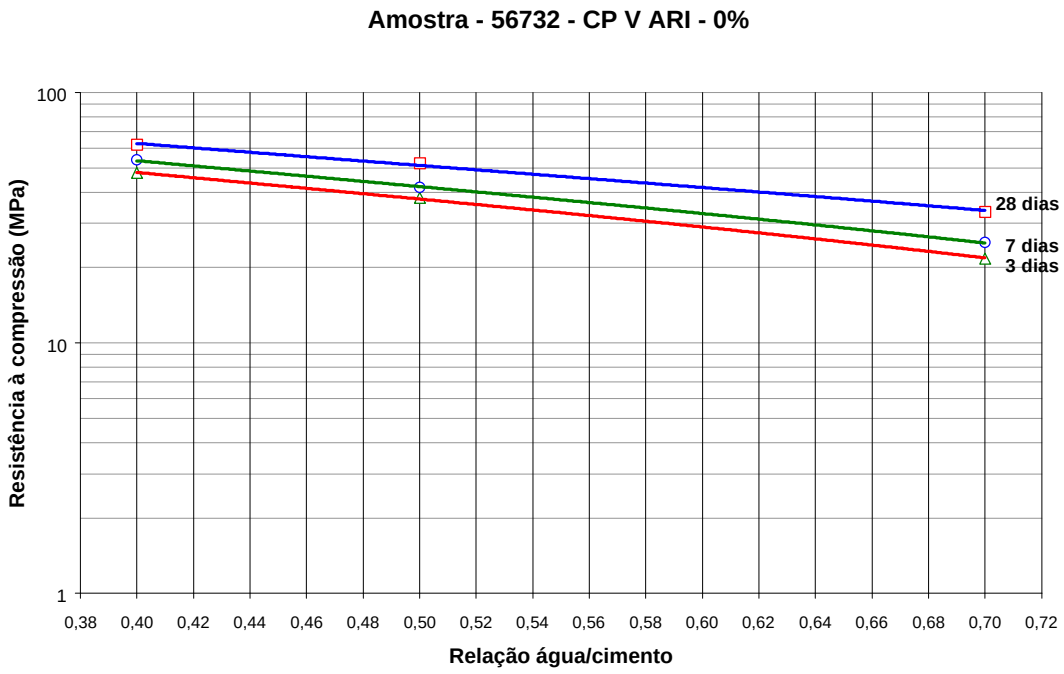

Figura 10 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP V ARI** sem adição de escória.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

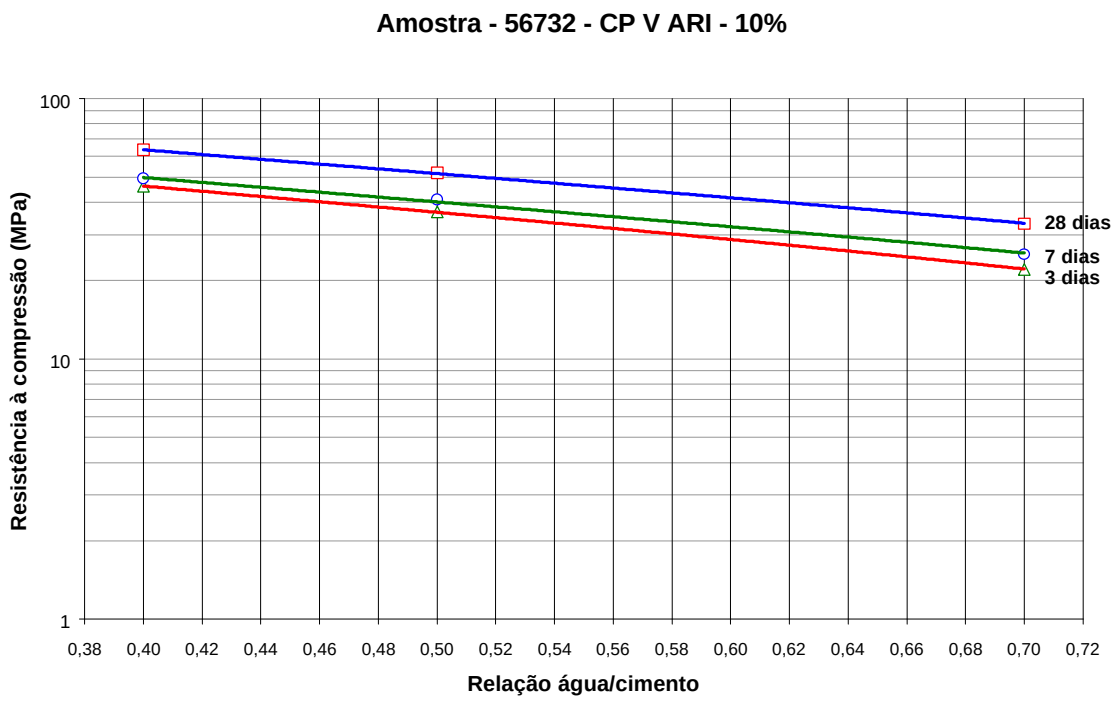

Figura 11 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP V ARI** com adição de 10% de escória.

Figura 12 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP V ARI** com adição de 30% de escória.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

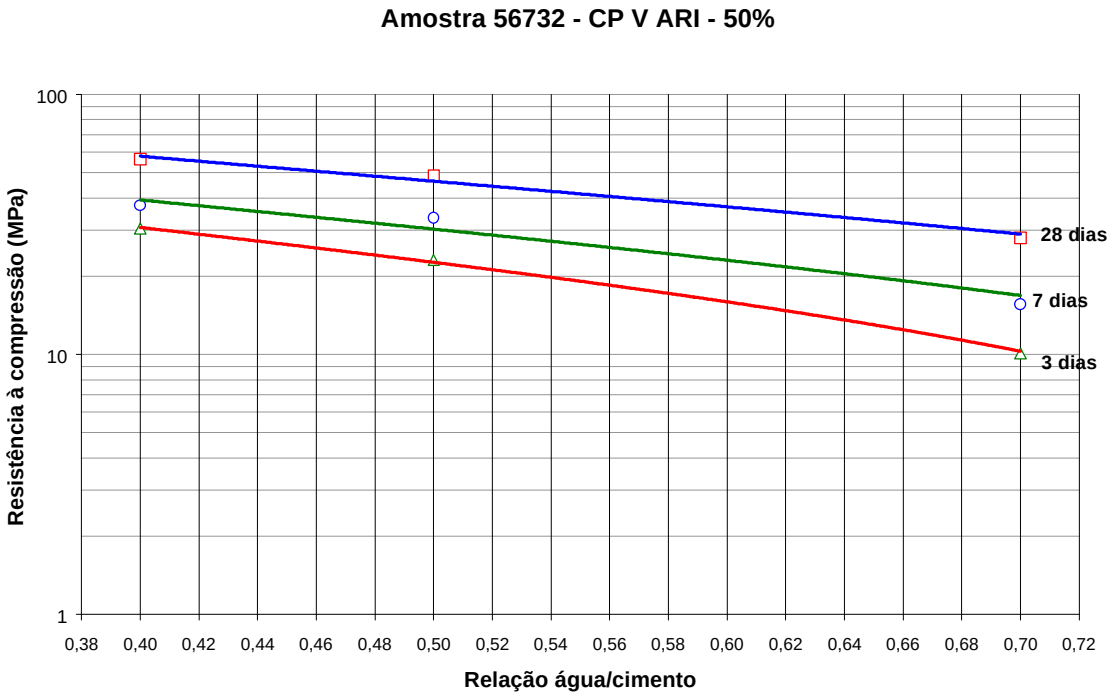

Figura 13 – Evolução da resistência à compressão em relação ao fator a/c do concreto dosado com cimento **CP V ARI** com adição de 50% de escória.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 11 – Equações das curvas de Abrams

Concreto dosado com cimento	Teor de escória	Idade (dias)	Equação f_{cj} (MPa)	Correlação (r^2)
CP II-F-40	0	3	Log_{fc3} = -1,4360 a/c + 2,1060	0,9985
		7	Log_{fc7} = -1,1710 a/c + 2,0549	0,9982
		28	Log_{fc28} = -1,0415 a/c + 2,1014	0,9932
	10	3	Log_{fc3} = -0,8297 a/c + 1,9942	0,9897
		7	Log_{fc7} = -1,0515 a/c + 1,9930	0,9974
		28	Log_{fc28} = -1,3587 a/c + 2,0417	0,9988
	30	3	Log_{fc3} = -1,5178 a/c + 2,0383	0,9946
		7	Log_{fc7} = - 1,3754 a/c + 2,1169	0,9922
		28	Log_{fc28} = - 0,9871 a/c + 2,1279	0,9951
	50	3	Log_{fc3} = - 1,5324 a/c + 1,9566	0,9765
		7	Log_{fc7} = - 1,3911 a/c + 2,1171	0,9876
		28	Log_{fc28} = - 0,9832 a/c + 2,1228	0,9806
CP II-E-40	0	3	Log_{fc3} = - 1,5954 a/c + 2,2779	0,9836
		7	Log_{fc7} = - 1,4579 a/c + 2,3232	0,9605
		28	Log_{fc28} = - 1,0736 a/c + 2,1916	0,9960
	10	3	Log_{fc3} = - 1,4024 a/c + 2,1057	0,9982
		7	Log_{fc7} = - 1,2575 a/c + 2,2004	0,9705
		28	Log_{fc28} = - 0,9598 a/c + 2,1546	0,9970
	30	3	Log_{fc3} = - 1,6578 a/c + 2,1671	0,9996
		7	Log_{fc7} = - 1,2764 a/c + 2,1717	0,9925
		28	Log_{fc28} = - 0,9577 a/c+ 2,1539	0,9984
	50	3	Log_{fc3} = - 1,5813 a/c + 1,9831	0,9998
		7	Log_{fc7} = - 1,2489 a/c + 2,1209	0,9998
		28	Log_{fc28} = - 1,2094 a/c + 2,2712	0,9956
CP V-ARI PLUS	0	3	Log_{fc3} = - -1,1503 a/c + 2,1447	0,9979
		7	Log_{fc7} = - 1,0927 a/c + 2,1663	1,0000
		28	Log_{fc28} = - 0,9055 a/c + 2,1606	0,9967
	10	3	Log_{fc3} = - -1,0696 a/c + 2,0947	0,9993
		7	Log_{fc7} = - 0,9829 a/c + 2,0929	0,9964
		28	Log_{fc28} = -0,9473 a/c + 2,1842	0,9995
	30	3	Log_{fc3} = - -1,2827 a/c + 2,0989	1,0000
		7	Log_{fc7} = -1,1843 a/c + 2,1511	1,0000
		28	Log_{fc28} = -1,0301 a/c + 2,1842	0,9573
	50	3	Log_{fc3} = - -1,6280 a/c + 2,1523	0,992
		7	Log_{fc7} = -1,3221 a/c + 2,1355	0,9535
		28	Log_{fc28} = -1,0373 a/c + 2,1826	0,9831

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 12 – Equações de consumo e relação agregado/cimento

Identificação do cimento	Teor de escória(%)	Relação água/cimento	Relação agregado/cimento	Consumo (kg/m³)
CP II-F-40	0	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}841 \times \frac{a}{c} - 0{,}9967$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4733m + 0{,}4111}$
		0,50		
		0,70		
	10	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}264 \times \frac{a}{c} - 0{,}6056$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4777m + 0{,}3842}$
		0,50		
		0,70		
	30	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}515 \times \frac{a}{c} - 0{,}8760$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4757m + 0{,}4124}$
		0,50		
		0,70		
	50	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}784 \times \frac{a}{c} - 0{,}9136$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4720m + 0{,}4248}$
		0,50		
		0,70		
CP II-E-40	0	0,40	$\mathbf{m} = 11{,}276 \times \frac{a}{c} - 1{,}3864$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4672m + 0{,}4782}$
		0,50		
		0,70		
	10	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}273 \times \frac{a}{c} - 0{,}7919$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4766m + 0{,}4317}$
		0,50		
		0,70		
	30	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}253 \times \frac{a}{c} - 0{,}8359$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4793m + 0{,}4144}$
		0,50		
		0,70		
	50	0,40	$\mathbf{m} = 7{,}2629 \times \frac{a}{c} + 0{,}3811$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}5091m + 0{,}3239}$
		0,50		
		0,70		
CP V-ARI PLUS	0	0,40	$\mathbf{m} = 9{,}7357 \times \frac{a}{c} - 0{,}6537$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4847m + 0{,}3860}$
		0,50		
		0,70		
	10	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}140 \times \frac{a}{c} - 0{,}7060$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4783m + 0{,}3995}$
		0,50		
		0,70		
	30	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}297 \times \frac{a}{c} - 0{,}8801$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4777m + 0{,}4143}$
		0,50		
		0,70		
	50	0,40	$\mathbf{m} = 10{,}557 \times \frac{a}{c} - 0{,}9181$	$\mathbf{C} = \frac{1000}{0{,}4740m + 0{,}4271}$
		0,50		
		0,70		

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Com base nas equações das curvas de Abrams pode–se calcular a relação água/cimento para uma determinada resistência nas idades de 3, 7 e 28 dias. Como ilustração segue exemplo de cálculo para determinação da relação a/c para a idade de 28 dias:

⇨ $a/c = \dfrac{2{,}3064 - \log fc28}{1{,}5323}$

⇨ *adotando-se* $fc_{28} = 30MPa$, *tem-se* $a/c = 0{,}54$

Através da correlação entre a relação agregado/cimento x relação água/cimento (Lei de Lyse) obtem–se uma equação que permite calcular a proporção de agregado (m) em relação ao teor de cimento:

⇨ $m = 9{,}8950 \bullet \dfrac{a}{c} - 0{,}9962$ $m = 4{,}3471$

A equação para determinar o consumo de cimento (C) (Lei de Molinari) é obtida através da correlação entre a relação agregado/cimento x consumo de cimento:

⇨ $C = \dfrac{1000}{0{,}4923m + 0{,}3823}$ $C = 396\ kg/m^3$

Com base nas equações obtidas pode-se estimar as relações água/cimento, agregado/cimento e o consumo de cimento para uma determinada resistência na idade de 28 dias. No item 7 são mostrados detalhadamente os consumos de cimento calculados para diferentes níveis de resistência bem como as resistências do concreto para consumos fixos de cimento.

6.4 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à compressão do concreto é a propriedade que é mais utilizada em projetos estruturais, mas para alguns casos específicos de aplicação como pavimentos de concreto para usos rodoviários, em aeroportos e pisos industriais, a resistência à tração na flexão do concreto adquire grande importância. Como exemplo pode se citar que a resistência à tração dos concretos aplicados em pavimentações rodoviárias em 2000 foi cerca de 4,5 – 5,0 MPa, para a resistência de projeto. Existe uma relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, mas essa relação não é

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

direta, pois depende do nível de resistência do concreto. Em outras palavras, quando a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração na flexão também aumenta, porém a uma razão decrescente.

Vários fatores influenciam a resistência à tração na flexão, salientando-se o efeito benéfico de agregados britados em relação a seixos rolados ,bem como o fato de agregados de origem calcária se comportarem melhor em relação aos agregados de origem granítica devido à existência de reações epitáxicas. Pôr outro lado, a resistência à tração na compressão é mais sensível à cura inadequada do que a resistência à compressão.

A *Tabela 13* mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão aos 28 dias de idade.

Tabela 13 – Resistência à tração na flexão dos concretos

Identificação do cimento	Teor de escória(%)	Relação água/cimento	Resistência à tração na flexão aos 28 dias(MPa)
CP II-F-40	0	0,40	6,1
		0,50	4,8
		0,70	3,3
	10	0,40	5,9
		0,50	4,7
		0,70	3,3
	30	0,40	6,2
		0,50	5,1
		0,70	3,5
	50	0,40	6,2
		0,50	5,4
		0,70	3,4
CP II-E-40	0	0,40	6,5
		0,50	5,2
		0,70	3,6
	10	0,40	6,4
		0,50	5,8
		0,70	4,0
	30	0,40	6,8
		0,50	5,3
		0,70	3,7
	50	0,40	5,7
		0,50	4,8
		0,70	2,9

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

CP V-ARI PLUS	0	0,40	6,0
		0,50	4,8
		0,70	3,8
	10	0,40	6,8
		0,50	5,3
		0,70	3,8
	30	0,40	6,5
		0,50	4,9
		0,70	3,7
	50	0,40	5,5
		0,50	5,0
		0,70	3,6

Os resultados mostram que independentemente do tipo de cimento, a resistência à tração na flexão decresce com o aumento da relação água/cimento.

Para uma mesma relação água/cimento, a resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias se mostrou constante com o aumento do teor de escória quando se utilizou o cimento CP II-F-40. Por outro lado, há uma ligeira tendência do CP II-E-40 e CP V-ARI apresentarem maior resistência com o teor de escória de 10%, constituindo o teor otimizado para essa propriedade. Entretanto com 50% de escória, ocorre queda expressiva de resistência com o CP II-E-40, para qualquer relação água/cimento, ao passo que a resistência se conserva com o CP V-ARI, para esse teor de escória.

6.5 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão e a deformação reversível. Em materiais homogêneos, o módulo de elasticidade é a medida das forças de ligação interatômicas e não é afetado por mudanças microestruturais. Isto não é válido para materiais multifásicos como o concreto. O módulo de elasticidade à compressão, varia de $14x10^3$ a $40x10^3$ MPa. O significado do limite de elasticidade em projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente. Portanto, o engenheiro deve conhecer o módulo de elasticidade do material porque ele influi no cálculo estrutural.
O módulo de elasticidade, determinado conforme a ASTM C-469/94, foi realizado somente na idade de 28 dias. Os resultados obtidos para todos os traços são apresentados na *Tabela 14.*

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Tabela 14 -Módulo de Deformação dos concretos

Identificação do cimento	Teor de escória(%)	Relação água/cimento	Módulo de Deformação aos 28 dias de idade (GPa)
CP II-F-40	0	0,40	27,0
		0,50	24,7
		0,70	21,1
	10	0,40	27,4
		0,50	24,4
		0,70	22,2
	30	0,40	28,5
		0,50	26,0
		0,70	22,4
	50	0,40	28,4
		0,50	27,4
		0,70	21,7
CP II-E-40	0	0,40	29,6
		0,50	28,1
		0,70	22,6
	10	0,40	30,2
		0,50	26,6
		0,70	24,0
	30	0,40	30,0
		0,50	28,7
		0,70	24,1
	50	0,40	30,2
		0,50	27,9
		0,70	21,5
CP V-ARI PLUS	0	0,40	30,0
		0,50	27,7
		0,70	21,9
	10	0,40	30,3
		0,50	26,6
		0,70	23,4
	30	0,40	29,4
		0,50	27,5
		0,70	23,0
	50	0,40	27,5
		0,50	28,8
		0,70	22,7

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Os resultados mostraram que independentemente do tipo de cimento há um decréscimo do módulo de deformação com o aumento da relação água/cimento.
Não há uma variação significativa no valor do módulo de deformação com o aumento do teor de escória para os vários tipos de cimento.

Comparativamente, há uma tendência do CPII-F-40 apresentar menor módulo de deformação em relação aos demais em igualdade de condições.

6.5 Absorção por Capilaridade e Absorção por Imersão e Fervura dos Concretos

Devido à relação da porosidade e permeabilidade com a durabilidade foram desenvolvidos ensaios de absorção por capilaridade e por imersão e fervura nos concretos.

A existência de poros de naturezas diferentes implica que alguns contribuem para a permeabilidade e outros não, sendo, portanto imprescindível fazer distinção entre a porosidade e permeabilidade. Porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupado pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. Se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, estes contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade resultante é alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, eles são ineficazes para o deslocamento de fluidos e, portanto, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo com uma porosidade alta.

Em suma, o ensaio de capilaridade relaciona-se à permeabilidade do concreto enquanto que o ensaio de absorção de água está ligado ao volume de vazios (poros).
Os resultados dos ensaios de capilaridade e absorção de água por fervura são apresentados na *Tabela 15,* a seguir.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 15 -Determinação da absorção por capilaridade e absorção por imersão e fervura

Identificação do cimento	Teor de escória(%)	Relação água/cimento	Capilaridade (g/cm^2)	Absorção após imersão (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica (g/cm^3)
CP II-F-40	0	0,40	0,189	2,9	6,8	2,42
		0,50	0,216	3,9	9,0	2,43
		0,70	0,277	5,5	12,2	2,36
	10	0,40	0,251	4,0	9,1	2,46
		0,50	0,212	5,5	12,3	2,53
		0,70	0,212	6,1	13,5	2,54
	30	0,40	0,231	5,6	12,7	2,59
		0,50	0,210	5,7	12,9	2,59
		0,70	0,388	5,9	13,1	2,58
	50	0,40	0,214	4,6	10,5	2,54
		0,50	0,307	4,3	9,7	2,49
		0,70	0,360	5,0	11,1	2,50
CP II-E-40	0	0,40	0,382	3,4	8,0	2,48
		0,50	0,442	3,4	7,9	2,52
		0,70	0,618	5,0	11,3	2,55
	10	0,40	0,393	3,7	8,4	2,52
		0,50	0,246	3,2	7,5	2,48
		0,70	0,324	5,1	11,3	2,47
	30	0,40	0,336	3,7	8,5	2,48
		0,50	0,348	3,8	8,7	2,50
		0,70	0,482	4,5	10,3	2,54
	50	0,40	0,162	2,5	5,8	2,44
		0,50	0,310	4,2	9,6	2,47
		0,70	0,261	4,0	9,0	2,40
CP V-ARI PLUS	0	0,40	0,186	4,6	10,6	2,46
		0,50	0,221	6,0	13,4	2,54
		0,70	0,394	4,8	10,8	2,45
	10	0,40	0,215	3,3	7,5	2,44
		0,50	0,124	4,0	9,1	2,46
		0,70	0,425	6,4	14,2	2,57
	30	0,40	0,271	3,1	7,2	2,46
		0,50	0,557	4,6	10,5	2,52
		0,70	0,232	5,8	13,0	2,45
	50	0,40	0,299	3,6	8,3	2,51
		0,50	0,304	3,7	8,4	2,44
		0,70	0,721	5,2	11,7	2,50

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

6.6 Perda de Abatimento dos Concretos

A perda de abatimento pode ser definida como perda de fluidez do concreto fresco com o passar do tempo. A diminuição do abatimento é um fenômeno normal em todos os concretos porque resulta do enrijecimento gradual e pega da pasta de cimento portland hidratada, que se associa à formação dos produtos de hidratação como etringita e silicato de cálcio hidratado. A perda de abatimento ocorre quando a água livre de uma mistura de concreto é consumida pelas reações de hidratação, por adsorsão na superfície dos produtos de hidratação e por evaporação.

Sob condições normais, o volume dos produtos da hidratação é pequeno durante a primeira meia hora após a adição da água ao cimento e a perda de abatimento é insignificante. Depois disso, o concreto começa a perder abatimento a uma determinada taxa que é função principalmente da hidratação, da temperatura, da composição do cimento e de aditivos presentes.

A *Tabela 16* apresenta os resultados obtidos:

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 16 – Determinação da Perda de Abatimento

Cim Am.	(%) de Escor.	Rel. a/c	Abat. inicial	Abatimento em mm decorridos: (min)													
				15	30	45	60	75	105	120	135	150	165	180	195	210	225
55550 F-40	0	0,40	90	60	40	30	20										
		0,50	75	45	35	25	15										
		0,70	80	55	45	35	25	20									
55550 F-40	10	0,40	75	50	30	25	20										
		0,50	75	50	30	20											
		0,70	70	55	40	30	25	20									
55550 F-40	30	0,40	90	55	45	35	30	15									
		0,50	80	65	50	35	20										
		0,70	70	50	40	40	30	25	20								
55550 F-40	50	0,40	75	50	35	25	20										
		0,50	75	45	30	20											
		0,70	85	55	55	55	55	55	55	55	50	45	40	35	30	25	20
55988 E-40	0	0,40	80	50	45	30	20										
		0,50	75	55	35	20											
		0,70	80	45	35	25	20										
55988 E-40	10	0,40	70	40	25	20											
		0,50	70	50	30	25	15										
		0,70	70	60	55	55	55	55	55	45	45	35	30	20			
55988 E-40	30	0,40	80	55	40	40	30	20									
		0,50	85	55	45	35	30	20									
		0,70	70	55	45	30	30	25	20								
55988 E-40	50	0,40	80	75	55	45	35	30	20								
		0,50	70	60	40	25	20										
		0,70	70	60	50	40	40	30	25	20							
56732 ARI	0	0,40	70	40	30	20											
		0,50	80	55	35	25	15										
		0,70	80	55	40	40	30	15									
56732 ARI	10	0,40	70	40	30	20											
		0,50	70	50	30	20											
		0,70	80	65	60	50	45	40	35	25	25	20					
56732 ARI	30	0,40	75	60	40	35	30	20									
		0,50	85	60	50	40	30	20									
		0,70	90	80	65	55	55	45	35	30	25	20					
56732 ARI	50	0,40	80	65	40	30	20										
		0,50	70	60	45	30	25	20									
		0,70	80	60	50	40	30	25	20								

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Os resultados não mostram uma correlação direta entre a perda de abatimento e as demais características do concreto (tipo de cimento, relação água/cimento, teor de escória, etc.). Entretanto mostraram as seguintes tendências gerais:

- há menor perda de abatimento quanto maior a relação água/cimento;
- há menor perda de abatimento quanto maior o teor de escória adicionado;
- o concreto também conserva melhor as propriedades de trabalhabilidade quando se empregaram cimentos CP II-F-40 E CP II-E-40 com relação água/cimento = 0,70.

7 DESEMPENHO TÉCNICO-ECONÔMICO DOS CIMENTOS NO CONCRETO

A *Tabela 17* apresenta os consumos de cimento por metro cúbico de concreto, já incluindo a adição de escória, variando-se as resistências à compressão aos 28 dias. Adotou-se a faixa de 20 a 50MPa, em intervalos de 5MPa, sendo os valores de resistência, calculados a partir das curvas de Abrams e equações de Lyse e Molinari para todas as amostras. Encontram-se destacados os consumos de cimento para valores fixos de dosagem de 20 MPa e 40 MPa. Os resultados são ilustrados na *Figura 14*

A *Tabela 18* apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias para consumos de cimento no concreto variando entre 200 e 500kg/m^3, em intervalos de 50kg/m^3, também calculados com base nas equações citadas. Encontram-se destacados os valores de resistência à compressão para o consumo de 300kg/m^3. A *Figura 15* ilustra também os resultados obtidos

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 17 –Consumo de cimento dos concretos em função da resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de cimento	Teor de escória (%)	Consumo de cimento(kg/m³), para resistência à compressão (MPa) aos 28 dias de idade						
		20	25	30	35	40	45	50
CPII-F-40	0	257,6	293,7	331,7	372,4	416,8	465,7	520,3
	10	238,6	276,4	317,5	363,1	414,7	474,1	543,8
	30	238,9	270,7	303,6	338,5	375,9	416,5	461,0
	50	235,4	266,9	299,7	334,5	371,8	412,4	457,1
CPII-E-40	0	238,1	268,5	299,7	332,5	367,2	404,5	444,9
	10	226,8	255,5	284,9	315,6	348,1	382,9	420,4
	30	227,8	256,9	286,8	318,2	351,4	387,2	425,9
	50	287,0	313,7	339,5	364,8	390,1	415,4	441,0
CP-V-ARI	0	215,1	242,5	270,7	300,3	331,7	365,4	401,8
	10	218,2	244,7	271,6	299,5	328,7	359,7	392,8
	30	237,5	266,8	296,7	327,8	360,5	395,3	432,7
	50	235,6	264,7	294,5	325,5	358,1	392,8	430,1

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

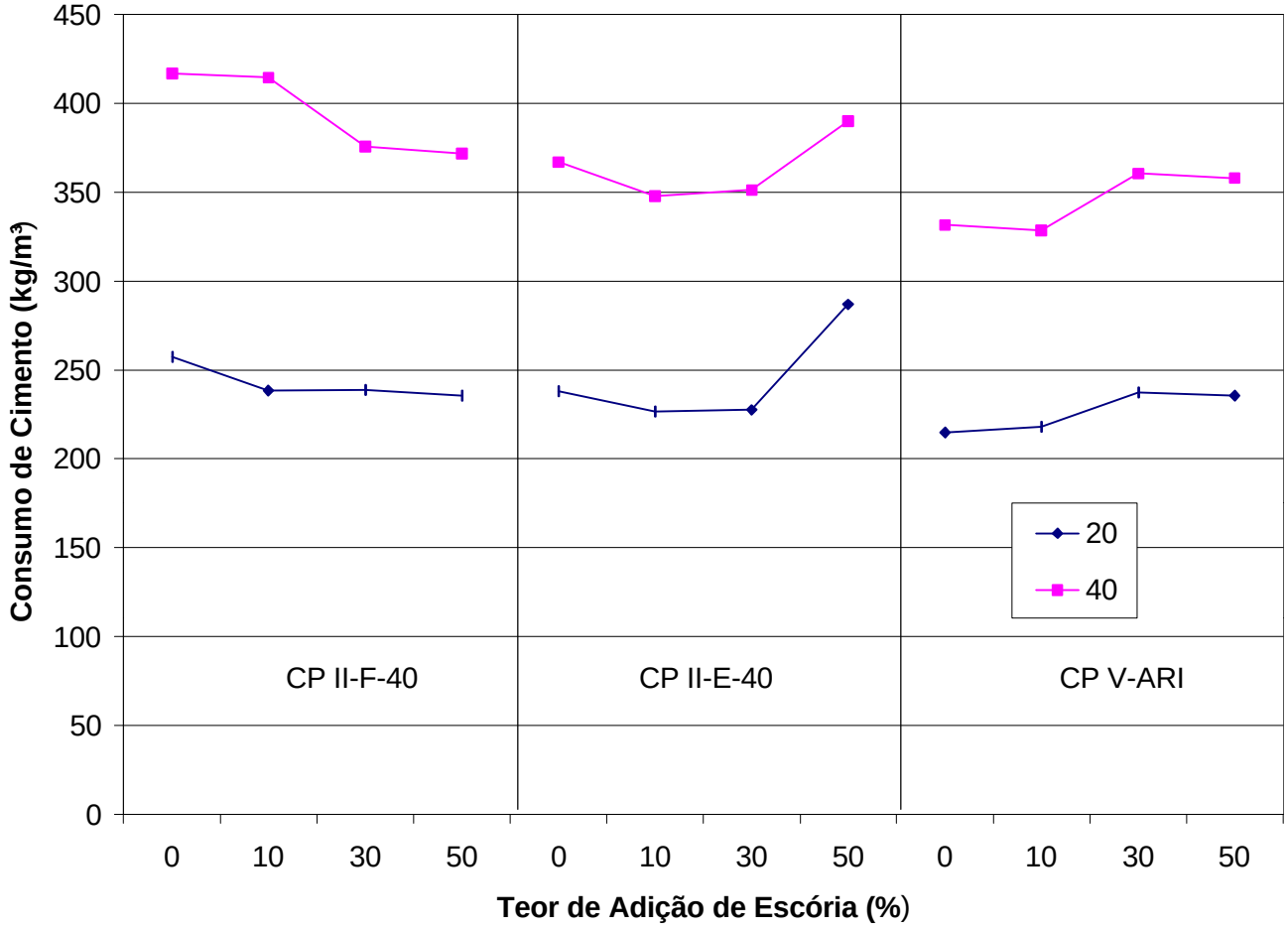

FIGURA 14- Consumo de cimento em função da resistência à compressão aos 28 dias e teor de escória

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

TABELA 18 –Resistência á compressão do concreto aos 28 dias em função consumo de cimento

Identificação das amostras		Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias Com consumo de cimento de (kg/m^3)						
CIMENTO	TEOR DE ESCORIA	200	250	300	350	400	450	500
CPII-F-40	0	11,9	18,9	25,9	32,3	38,2	43,5	48,2
	10	14,6	21,5	27,9	33,6	38,6	43,1	47,0
	30	13,8	21,8	29,5	36,6	43,0	48,8	54,0
	50	14,3	22,3	30,0	37,1	43,5	49,2	54,4
CPII-E-40	0	13,7	22,0	30,0	37,6	44,4	50,6	56,2
	10	15,3	24,0	32,5	40,3	47,3	53,7	59,3
	30	15,2	23,8	32,1	39,8	46,7	52,9	58,5
	50	6,4	13,6	22,4	32,1	42,0	51,7	61,2
CPV-ARI PLUS	0	17,2	26,3	34,9	42,8	49,8	56,0	61,5
	10	16,6	26,0	35,1	43,5	51,0	57,8	63,9
	30	13,7	22,1	30,5	38,4	45,6	52,2	58,1
	50	13,9	22,5	30,9	38,8	46,0	52,5	58,4

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

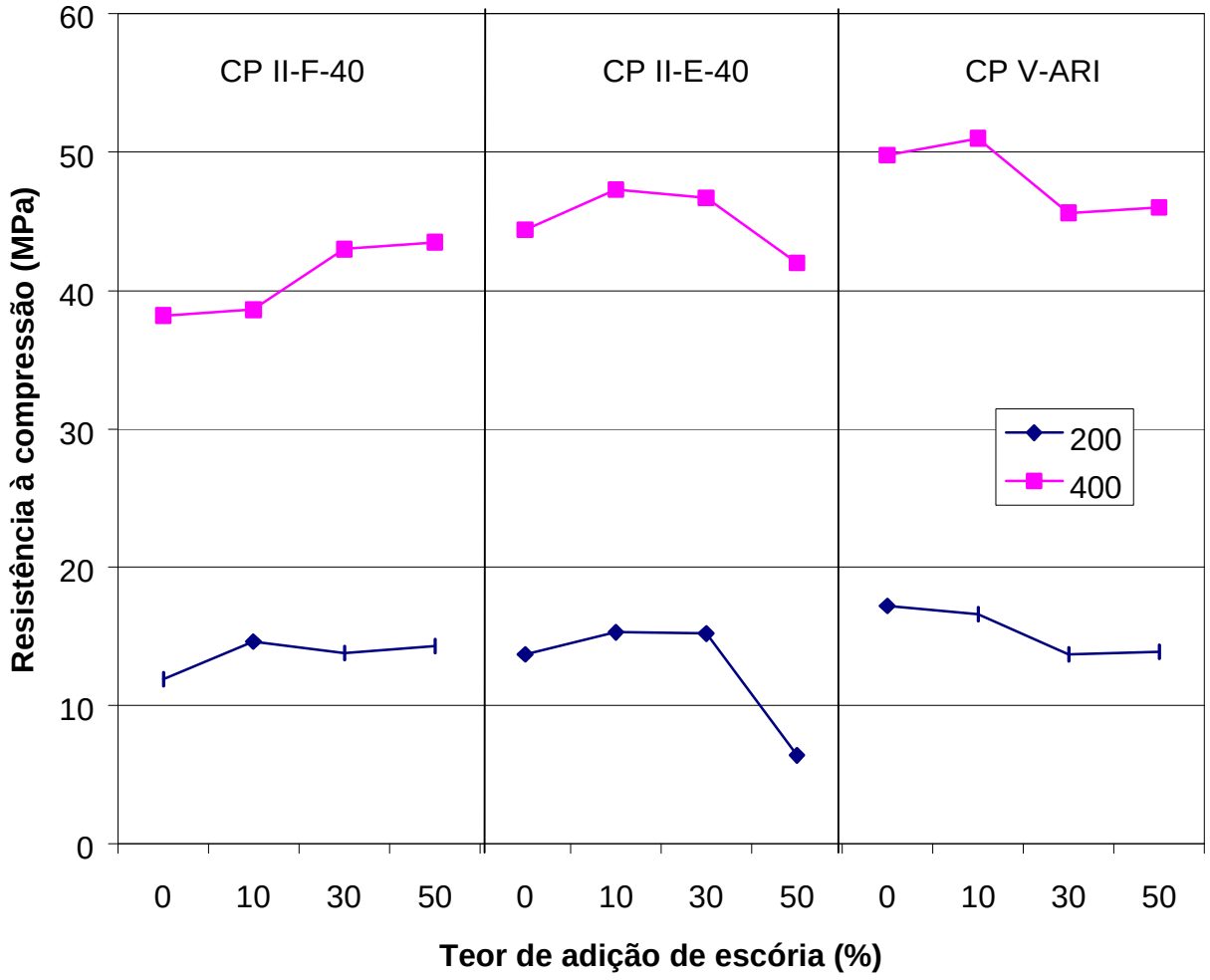

FIGURA 15 - Resistência à compressão aos 28 dias em relação ao consumo de cimento e teor de escória

Dos resultados obtidos depreende-se que:

- Com raras exceções, quanto maior é a resistência de dosagem, maior é a diferença de consumo de cimento (já inclusa a escória) para uma determinada resistência entre as diferentes amostras de cimento;

- Para uma resistência de dosagem de 20 MPa, o consumo de cimento, (já inclusa a escória), varia de 215,1 kg/m³ (CP V-ARI sem adição de escória) até 287 kg/m³ (CP II-E-40 com 50% de escória);

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

- Para uma resistência de dosagem de 40 MPa, o consumo de cimento (já inclusa a escória) varia de 358,7 kg/m³ (CP V-ARI com 10% de escória) até 416,8 (CP II-F-40);

- O cimento CP II-E-40 com 50% de escória requer um consumo total de aglomerante 33% maior em relação ao do cimento CP V-ARI sem adição para resistência de dosagem de 20 MPa, ao passo que o consumo aumentou apenas 18% para resistência de dosagem de 40 MPa;

- Para uma resistência de dosagem de 20 MPa, não há aumento significativo de consumo de aglomerante (cimento + escória), com o aumento do teor de escória, exceto para o cimento CP II-E-40 quando se adicionou 50% de escória;

- Para um consumo de 300 kg/m³ de aglomerante, o cimento CP V-ARI e o CP V-ARI com 10%, são os que proporcionaram maior resistência (34,9 e 35,1 MPa) ao passo que o CP II-E-40 com 50% de escória é o que apresentou menor resistência.

Com base na *Tabela 17* calcularam-se os custos do cimento no concreto em termos de R$/m^3 para concretos com resistências de dosagem de 20 e 40 MPa. Os resultados são apresentados na *Tabela 19* e ilustrados na *Figura 16*

Por orientação do Interessado, o preço de cada cimento de partida foi considerado homogêneo para todas as amostras e corresponde a R$ 190,00 por tonelada de cimento, ao passo que para a escória processada foi adotado o preço de R$ 120,00 por tonelada. Caso mudem esses valores ,a Tabela 19 pode ser atualizada a partir de simples operações aritméticas pela adoção de novos parâmetros.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

Tabela 19-Custo do cimento no concreto (incluindo a escória)

Identificação das amostras		Desempenho econômico do cimento no concreto em R$/m^3	
CIMENTO	TEOR DE ESCÓRIA	Concreto com 20 MPa	Concreto com 40 MPa
CPII-F-40	0	48,94	79,19
	10	46,53	75,90
	30	40,33	63,53
	50	36,49	57,63
CPII-E-40	0	45,24	69,77
	10	41,50	63,70
	30	38,50	59,39
	50	44,49	60,47
CPV-ARI PLUS	0	40,87	63,02
	10	39,93	60,15
	30	40,14	60,92
	50	36,52	55,51

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

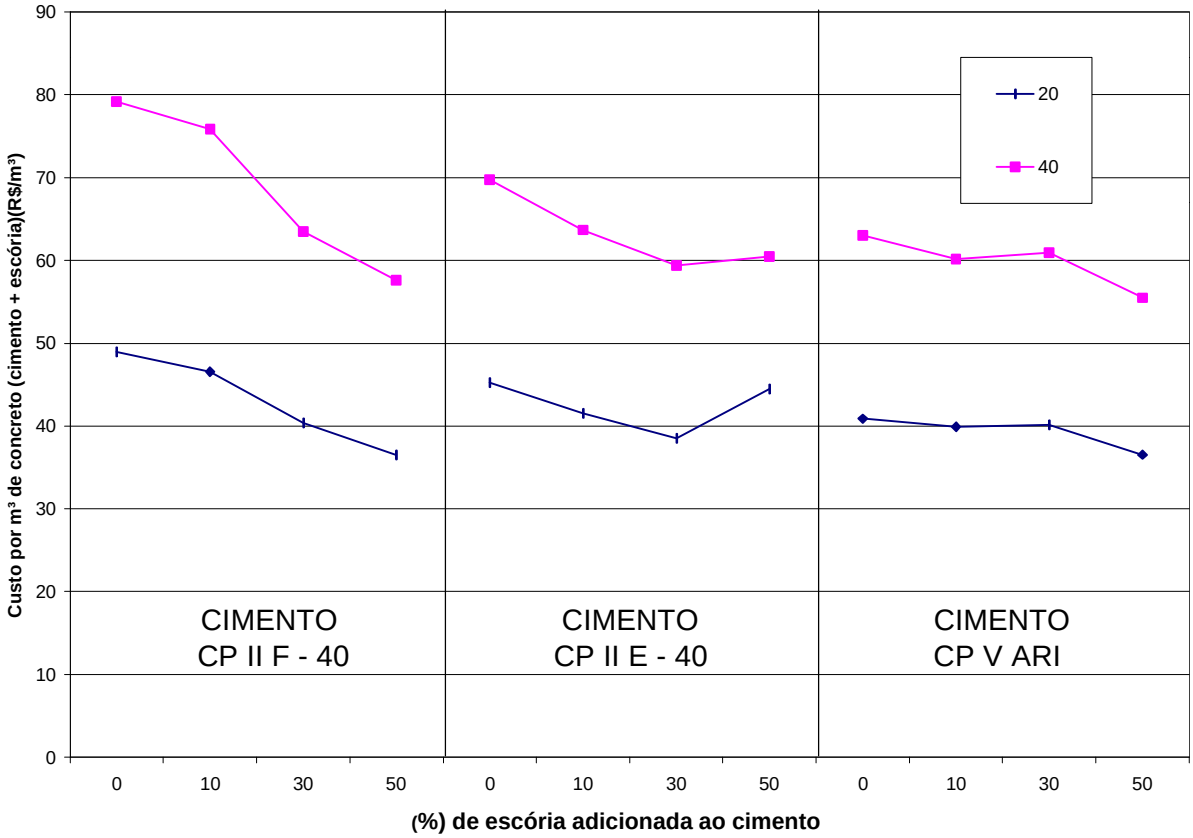

FIGURA 16 – Custo do cimento por m³ de concreto em função do consumo de cimento com adição de escória para concretos com fck 20 e 40 MPa

Da Tabela 19 e Figura 16 depreende-se que:

- de uma maneira geral o custo do aglomerante (cimento + escória) diminuiu com o aumento do teor de escória;

- tanto para o concreto com 20MPa quanto para 40 MPa de resistência de dosagem o cimento CP II-F-40 é o que apresenta maior custo no concreto em igualdade de condição. Há uma exceção com 50 % de adição de escória, o CP II-E-40 apresenta maior custo em relação aos demais;

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

- Para o concreto na faixa de fck = 20MPa, considerando-se o preço do concreto igual a R$ 137,00/m³, a economia gerada é de 6,3%, 4,9% 0,5% no preço final quando se adiciona 30% de escória nos cimentos CP II-F-40, CP II-E-40 e CP V-ARI, respectivamente;

- Para concretos na faixa de fck =40 MPa, considerando-se o preço do concreto igual R$ 185,00/m³, a economia gerada é de 8,5%, 5,6% e 1,1% no preço final quando se adiciona 30% de escória nos cimentos CP II-F-40, CP II-E-40 e CP V-ARI, respectivamente.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos são válidas as seguintes considerações:

- os cimentos utilizados neste estudo obedecem integralmente às respectivas especificações da ABNT e, particularmente com relação à resistência à compressão, excederam expressivamente as exigências mínimas de norma
- a escória utilizada é uma mistura de escória ácida e básica, que no conjunto obedece às especificações da NBR 5735/91 para esse material;
- considerando-se os parâmetros fixados na dosagem do concreto (abatimento de 80+/-10 mm, teor de argamassa igual a 50% e relação água/cimento = 0,40, 0,50 e 0,70), o teor de ar incorporado sempre ficou abaixo de 2,0% para todos os concretos;
- com relação à resistência à tração na flexão, o teor de escória otimizado é de 10% para os cimentos CP II-E-40 e CP V-ARI ao passo que o aumento do teor de escória no cimento CP II-F-40 não influiu nessa propriedade;
- igualmente não há variação significativa no módulo de deformação com o aumento do teor de escória para todos os cimentos;
- em igualdade de condições, o concreto conserva melhor suas propriedades de trabalhabilidade com o teor crescente de escória nos distintos cimentos;
- para consumos de aglomerante (cimento + escória) de 200 kg/m³, os teores ótimos de escória para obtenção de máxima resistência à compressão aos 28 dias são ,respectivamente ,de 50% para o CP II-F-40, 30% para o CP II-E-40 e de 10% para o CP V-ARI;

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório

- para consumos mais altos (400 kg/m³), a mesma tendência se mantém, exceto para o CP II-E-40 cujo teor ótimo de escória passa de 30% para 20% (por inferência);
- para concretos com f_{ck} 20 e 40 MPa aos 28 dias, o consumo mínimo de aglomerante verifica-se para a mistura de 50% escória e CP II-F-40, mistura de 10 a 30% de escória com CP II-E-40 e de 0 a 10% de escória com CP V-ARI;

- o custo de aglomerante no concreto diminui com o aumento do teor de escória no cimento;
- para concretos com f_{ck} 20 e 40 MPa aos 28 dias, o CP II-F-40 é o cimento que apresenta maior custo no concreto em termos absolutos ,em iqualdade de condições com os parâmetros de preços adotados e o CP V-ARI, o menor.

Em suma, de uma maneira geral, o CP II-F-40 é o cimento que melhor responde tanto em desempenho técnico quanto econômico com o teor crescente de escória.

São Paulo, 23 de maio de 2001

Rubens Curti
Engenheiro

Geól. Arnaldo F. Battagin
Chefe do Laboratório

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório