VICTOR DOUGLAS BARROS SANTOS

RESISTÊNCIA DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS À CARBONATAÇÃO AOS 17 ANOS DE EXPOSIÇÃO NATUAL

Artigo apresentado no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em Engenharia Civil ou Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 05 / 07 /2017.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Enio Pazini Figueiredo Universidade Federal de Goiás (Orientador)

_____

Prof. Janes Cleiton Alves de Oliveira – Universidade Federal de Goiás

_____

Prof. José Dafico Alves – Universidade Estadual de Goiás

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

_____

Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo (Orientador)

Em: 13/07/2017

Scanned by CamScanner

Resistência à Carbonatação de Concretos com Adições Minerais após 17 anos de Exposição Natural

V. D. B. Santos[1], C. S. Azevedo[1], E. Pazini Figueiredo[1]

[1] Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, e-mail: vitodoglas@hotmail.com, epazini@terra.com.br

RESUMO

O Concreto armado é o material estrutural mais empregado nas construções civis, estando onipresente nos mais diversos ambientes e situações. A agressividade ambiental tem se intensificado com o desenvolvimento urbano e industrial, resultando no aparecimento precoce de manifestações patológicas em concretos convencionais. Para se opor a esta realidade, o concreto tem sido aprimorado, tanto no que se refere à introdução de novos insumos, como no avanço dos processos de produção e manutenção, com o intuito de aumentar a vida útil das estruturas de concreto. Ao longo dos anos, as adições minerais têm sido empregadas como materiais substitutos de parte do cimento Portland, devido aos vieses econômico, técnico e da sustentabilidade. O presente estudo tem por objetivo avaliar e discutir a resistência à carbonatação de concretos convencionais sem adição mineral (referência), com adição de cinza de casca de arroz, com adição de escória de aciaria e com adição de sílica ativa, após 17 anos de exposição natural.

A carbonatação foi avaliada pela aspersão de uma solução de fenolftaleína e pelo tratamento de imagens fotográficas com um *software*. A obtenção dos valores médios, máximos e mínimos da frente de carbonatação foi aprimorada pelo artifício computacional de dividir as imagens em colunas de 1 milímetro. A frente de carbonatação também foi medida com o auxílio de um paquímetro digital. Com os valores obtidos, encontrou-se a curva de potência que representasse o fenômeno desde sua origem, passando pelos valores obtidos com 1 ano e 17 anos de idade, para cada tipo de concreto estudado. Esta curva foi comparada com a curva teórica, empregando-se o modelo clássico de avanço da carbonatação, também uma função potência, a fim de se estimar pelas suas curvas, os cobrimentos necessários para atingir a vida útil de 50 anos, preconizada pela ABNT NBR 6118:2014. Os resultados encontrados mostraram que as adições minerais tornaram os concretos mais susceptíveis à carbonatação, com forte contribuição nas primeiras idades, permitindo um maior avanço global da frente de carbonatação, o que pode ocasionar a iniciação da corrosão pela carbonatação em tempos inferiores em relação a um concreto convencional.

Palavras chave: Concreto; Adições Minerais; Durabilidade; Resistência; Carbonatação Natural.

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most structural material employed in civil constructions, being omnipresent in the most diverse environments and situations. Environmental aggression has intensified with the urban and industrial development, resulting in the appearance of early pathological manifestations in conventional concrete. To oppose this reality, the concrete has been enhanced, both as regards the introduction of new inputs, as in advance of production and maintenance processes, in order to increase the service life of concrete structures. Over the years, the mineral additions have been employed as surrogate materials part of Portland cement, due to economic, technical and bias of sustainability. The present study aims to assess and discuss the carbonation resistance of conventional concrete (reference and without added mineral), with addition of rice husk ash, with addition of steelmaking slag and with addition of Silica fume, after 17 years of natural exposure.

The carbonation was evaluated by spraying a solution of phenolphthalein and by handling the photographic images with software. The average maximum and minimum values of the carbonation front is enhanced by the computer to share the images into 1 mm columns. The carbonation front also was measured with the aid of a digital caliper. With the values obtained, met the power curve that represented the phenomenon since your origin, values obtained with 1 year and 17 years of age. With the actual values of depth of carbonation obtained a curve and its representative of the equation for each type of concrete phenomena studied. This curve has been compared with the theoretical curve, using the classical model of advancement of carbonation according to power function in order to obtain the necessary coatings to achieve the lifespan of 50 years, recommended by NBR 6118 (ABNT, 2014). The results showed that the mineral additions made concrete more susceptible to carbonation, with a strong contribution in the early ages, allowing a greater global advancement of carbonation, which can result in the initiation of corrosion by carbonation in times lower than for a conventional concrete.

Keywords: Concrete; Mineral Additions; Durability; Resistance; Natural Carbonation

- **INTRODUÇÃO**

A agressividade ambiental tem se intensificado com o desenvolvimento urbano e industrial, resultando no aparecimento precoce de manifestações patológicas em concretos convencionais. Concomitantemente, tem se buscado melhor desempenho e maior durabilidade dos concretos. Com o intuito de aumento da durabilidade e devido ao viés ecológico, adições minerais oriundas de outros processos industriais tem substituído parcialmente o cimento Portland na produção de concretos. Dentre as variadas vantagens do emprego das adições minerais nos concretos, pode-se citar o aumento da resistência mecânica e a diminuição da permeabilidade por refinamento dos poros. No entanto, as adições minerais podem promover mudanças químicas nos concretos de forma a alterar suas resistências ao avanço da frente de carbonatação e dos íons cloretos.

Taylor (1997) explana que o dióxido de carbono ao penetrar no concreto é dissolvido na água dos poros da pasta de cimento, produzindo o CO_3^{2-}, conforme mostra a Equação (1). A água nos poros da pasta de cimento Portland apresenta alta alcalinidade, pH em torno de 13, devido às hidroxilas e aos íons Ca^{2+} que são obtidos a partir da dissolução dos aluminatos e silicatos hidratados formados na hidratação do cimento. Os álcalis de cálcio (Ca^{2+}) presentes na água dos poros do concreto irão reagir com o íon carbonato proveniente do CO_2, formando como subproduto o carbonato de cálcio, que apresenta pH em torno de 8,5. De tal modo os compostos formados na hidratação do cimento serão convertidos em produtos menos alcalinos, conforme Equação (2), ocasionando a redução do pH do concreto, diminuindo o caráter alcalino do concreto e reduzindo a condição mantenedora da película de óxido de ferro que compõe a camada passivadora das armaduras.

$$\mathrm{CO_2} + \mathrm{H_2O} \rightarrow 2\,\mathrm{H^+} + \mathrm{CO_3^{2-}} \qquad \text{Equação (1)}$$

$$\mathrm{Ca(OH)_2} + 2\mathrm{H^+} + \mathrm{CO_3^{2-}} \rightarrow \mathrm{CaCO_3} + 2\mathrm{H_2O} \qquad \text{Equação (2)}$$

Sabe-se que os fatores ambientais e as características do concreto endurecido exercem grande influência na velocidade de ocorrência da carbonatação e posterior corrosão da armadura. Nilson (1996), Taylor (1990) através de um gama variada de experimentos atestaram a importância da quantidade e tipo de cimento, da relação água cimento, da granulometria dos agregados, das condições de cura, da pressão, temperatura e concentração de CO_2 na atmosfera e da permeabilidade e umidade interna do concreto sobre a intensidade do avanço da frente de carbonatação. A quantidade disponível de compostos alcalinos para reagir com o CO_2 depende do tipo de cimento empregado na produção do concreto.

A bibliografia é praticamente unânime em concluir que os concretos feitos com cimentos com adições apresentam um desempenho inferior aos concretos feitos com cimento Portland puro, em igualdade de condições de ensaio, no que se refere à resistência a carbonatação (FIGUEIREDO, 2005; NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008; e ALONSO & ANDRADE, 1988). BAUER & MONTEIRO (1996) constataram em ensaio de curta duração que a adição de escória em teores de 24%, diminui a resistência à carbonatação do concreto, apesar do efeito benéfico de refinamento dos poros. Gastaldini et al. (1999) constataram que quando as adições são incorporadas por substituição ao cimento Portland, a reserva alcalina do concreto

diminui e este efeito se sobrepõe ao refinamento dos poros, resultando em uma frente de carbonatação mais rápida.

Diversos autores concluíram que as reações pozolânicas consomem os álcalis livres resultantes da hidratação do clínquer, diminuindo a alcalinidade da pasta e permitindo um maior avanço da frente de carbonatação. Apesar disso, praticamente todos os estudos publicados concluem com base em experimentos de curta duração.

Em ambientes como garagens de subsolos, encontram-se estas condições ideais à carbonatação, marcada pela alta concentração de CO_2 e pela umidade relativa do ar dentro dos parâmetros ideais a este fenômeno. Nestes ambientes o uso de concreto aparente é muito recorrente. O concreto aparente também é comumente encontrado nas superestruturas das obras de arte, fachadas e coberturas dos edifícios. Esta escolha construtiva se justifica pela valorização da estrutura aparente como elemento arquitetônico e pelo critério econômico. No entanto, esta prática deixa o concreto diretamente exposto aos agentes deletérios da atmosfera. Desta forma as estruturas de concreto armado devem ser projetadas, executadas e mantidas com maior atenção e cautela, visando especificações que levem à obtenção de estruturas mais duráveis.

A frente de carbonatação se inicia na superfície do concreto e vai avançando para dentro da estrutura, ocasionando a redução do pH. Quando passa do cobrimento, atingindo a armadura, despassiva-a e desencadeia o processo de corrosão que com o avanço do tempo, se não houver intervenção, culmina em perda de seção de aço e de aderência aço/concreto.

No presente estudo, verificou-se a resistência à carbonatação de concretos com cinza de casca de arroz (CCA), sílica ativa (SA) e escória de aciaria (EALD), em comparação a um concreto referência, sem adição, após 17 anos de exposição natural.

• METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em duas etapas. A primeira etapa contempla os ensaios de caracterização dos insumos do concreto referência e das adições, e a resistência à compressão, absorção, permeabilidade ao ar e resistência à carbonatação com um ano de idade dos concretos referência e com adições. Estes ensaios foram realizados por Azevedo (2001) em sua dissertação de mestrado. A versão das normas empregadas nestas avaliações eram as vigentes à época da realização destes ensaios. A segunda etapa foi realizada aos dezessete anos de idade, onde a profundidade de carbonatação foi novamente medida. Os resultados foram empregados para avaliar o desempenho dos concretos com adições minerais, frente ao concreto referência, bem como estimar os cobrimentos necessários para os concretos estudados atingirem uma vida útil de projeto de 50 anos.

• Caracterização dos insumos e dos concretos

A água utilizada para a produção dos concretos foi da rede pública de abastecimento da cidade de Goiânia. O agregado miúdo foi uma areia média de leito de rio e o agregado graúdo foi uma brita granítica de dimensão máxima característica de 19 mm. A Tabela 1 mostra as características físicas dos agregados.

Tabela 1. Características físicas dos agregados.

Características físicas	Areia	Brita
Dimensão máxima característica (mm)	4,80	19,00
Módulo de finura (mm)	2,08	7,00
Massa específica (g/cm³)	2,63	2,65
Massa unitária (g/cm³)	1,43	1,41

O aglomerante empregado foi o cimento Portland CPII – F 32 do fabricante Tocantins. A Tabela 2 apresenta as características físicas e químicas do cimento, determinadas no laboratório de FURNAS-CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

Tabela 2. Características físico-químicas do cimento Portland utilizado.

Características do cimento CP II-F32		
Massa específica (g/cm³)		3,08
Finura (Blaine): área específica (cm²/g)		3430,00
Finura: Granulometria a Laser (cm²/g)		3836,00
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	22,10
	7 dias	28,10
	28 dias	32,50
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	4,49
	Resíduo insolúvel	0,44
	Trióxido de enxofre (SO_3)	2,59
	Óxido de Magnésio (MgO)	6,55
	Dióxido de silício (SiO_2)	18,29
	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	2,73
	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	5,14
	Óxido de cálcio (CaO livre)	58,47
	Óxidode cálcio livre (CaO)	1,30
	Àlcalis totais óxido de sódio	0,18
	Àlcalis totais óxido de potássio	0,91
	Àlcalis totais equivalente alcalino em Na_2O	0,78
	Sulfato de cálcio ($CaSO_4$)	4,40

As adições minerais empregadas foram a cinza da casca de arroz (CCA), escória de aciaria LD (EALD) e a sílica ativa (SA).

A cinza de casca de arroz foi doada pela Universidade Federal de Santa Maria (RS). Ao ser recebida na Universidade Federal de Goiás este material já havia passado pelos processos de queima a céu aberto, sem controle de temperatura, e de moagem, não necessitando de outro tipo de processamento. Observou-se por difratograma de raios x a presença de muitas fases cristalinas na composição da cinza. No ensaio de atividade pozolânica do cimento, apresentou resultado superior a 75%, este parâmetro normativo a classifica como pozolânica. Na tabela 3, são mostradas características físico-químicas da CCA.

Tabela 3. Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz e índice de atividade pozolânica com Cimento Portland (Furnas-Centrais Elétricas S.A.).

Características da cinza de casca de arroz			
Massa específica (g/cm³)			2,16
Finura		Resíduo na peneira # 325 (%)	6,40
Componentes químicos (%)		Perda ao fogo	15,82
		Óxido de Magnésio (MgO)	0,50
		Dióxido de silício (SiO_2)	78,20
		Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	0,43
		Óxido de alumínio (Al_2O_3)	0,83
		Óxido de cálcio (CaO)	0,91
		Álcalis totais (Na_2O)	0,09
		Álcalis totais (K_2O)	1,22
		Álcalis totais (Equivalente Alcalino)	0,89
Índice de atividade pozolânica com cal (MPa)			4,60
Teor de umidade em materiais pozolânicos (%)			1,60
Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (%)			
Material cimentício - cinza de casca de arroz			79,1
Finura B.E.T (m²/g)	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)
31,576	12,390	1,790	37,44

A escória de aciaria LD (EALD) foi moída em moinho giratório de 11 esferas de aço, por período de 5 horas, a seco, acrescentando 5 kg por vez ao moinho. Realizou-se peneiramento com a peneira #200, utilizando-se no concreto somente o material passante. A tabela 4 apresenta a análise química da EALD empregada.

Tabela 4 Análise química da escória (Companhia Siderúrgica de Tubarão).

Elemento	%	Elemento	%
C	0,820	MgO	5,770
S	0,122	MnO	6,140
Fe	19,200	P_2O_5	2,100
Al_2O_3	2,050	Na_2O	0,019
(SiO_2)	12,400	K_2O	0,006
CaO	42,900	ZnO	0,011

A Sílica Ativa utilizada foi de fabricação nacional da marca Silmix. A mesma apresentou resultado positivo para o ensaio de atividade pozolânica. A área específica ensaiada pelo método Blaine e pelo granulômetro a laser, foram, respectivamente, 16050 cm²/g e 4221 cm²/g. As demais caracterizações físico-químicas se encontram na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades físico-químicas da sílica ativa (Furnas-Centrais Elétricas S.A.).

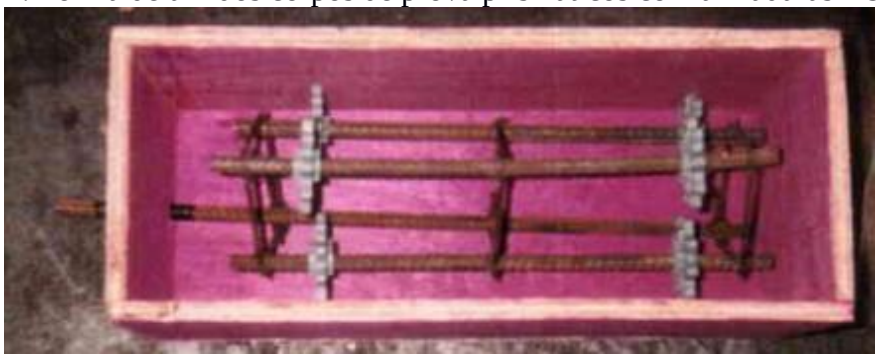
Características da Sílica Ativa		
Massa específica (g/cm³)		2,18
Finura (Blaine): área específica (cm²/g)		16.050,00
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	5,08
	Óxido de Magnésio (MgO)	0,67
	Dióxido de silício (SiO_2)	90,48
	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	0,20
	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	0,49
	Óxido de cálcio (CaO)	0,63
	Álcalis totais óxido de sódio	0,16
	Álcalis totais óxido de potássio	0,63
	Álcalis totais (equivalente alcalino em Na_2O)	0,57

O Aditivo superplastificante empregado foi de base polilamina sulfonada. A quantidade utilizada variou entre 1 e 1,5% em relação à massa de cimento, para cada traço. O uso se deu para todos os concretos com adições minerais, a fim de manter-se a mesma consistência entre eles.

- **Corpos de prova, dosagem e moldagem**

Para a realização dos ensaios de desempenho quanto à durabilidade em relação à resistência a carbonatação e os ensaios de permeabilidade ao ar, foram confeccionados corpos de prova prismáticos de concreto, nas dimensões de 15x20x40 cm, armados com barras de aço CA 50 de 10 mm de diâmetro e envolvidas por estribos de 4,2 mm de diâmetro, tendo estes corpos-de-prova um cobrimento de 2,5 cm. Para a obtenção deste cobrimento, foram utilizados espaçadores plásticos. As armaduras foram dispostas na forma de losango para que no centro de todas as faces dos corpos-de-prova existisse uma armadura. A Figura 1 mostra detalhes do corpo de prova prismático com a armadura inserida. As armaduras foram inseridas para o controle dos parâmetros eletroquímicos de potencial de corrosão (Ecorr) e resistência de polarização (icorr), caso a frente de carbonatação chegasse à armadura, o que não ocorreu em nenhuma das médias de profundidade de carbonatação após 17 anos.

Figura 1: Forma de um dos corpos de prova prismáticos com armaduras inseridas.



Foram confeccionados 44 corpos de prova cilíndricos e oito prismáticos. Dos corpos de prova prismáticos, 4 foram para o ensaio de profundidade de carbonatação e os outros 4 para o ensaio de tempo de permeabilidade ao ar. Quanto aos corpos de prova cilíndricos, 12 foram para o ensaio de absorção de água, aos 63 dias, e 32 foram para o ensaio de resistência à compressão, aos 7, 28, 63 e 91 dias.

Após a moldagem e cura, em câmara úmida, pelo período de 7 dias, os corpos de prova foram armazenados no laboratório. Acerca das condições climáticas e de armazenamento, controlou-se a umidade relativa do ar mantendo-a na faixa de 50±10%, durante o primeiro ano de idade.

Após 1 ano e até os 17 anos, os corpos de prova prismáticos destinados a avaliação da carbonatação foram mantidos abrigados de precipitações pluviométricas, no interior das dependências do laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG (LMC-UFG), em Goiânia (GO), região do centro oeste brasileiro. Tais condições se recorrem com verossimilhança às estruturas de concreto aparente que durante sua vida útil permanecem protegidas das intempéries, assim como àquelas que estão dispostas no interior das edificações.

Os traços utilizados foram determinados levando em consideração a relação água/cimento desejada, os teores de adições minerais requeridos e a consistência. A metodologia de dosagem foi a de Alves (2006), que se apoia no método do ACI. O abatimento do tronco de cone foi fixado em 70 ± 10 mm. Para que não houvesse alteração da consistência foi empregado 1% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento, nos concretos com CCA e EALD e de 1,5% no concreto com S.A.

A moldagem dos corpos de prova foram realizadas em dias diferentes, obedecendo à seguinte ordem. Primeiramente foi misturado o concreto referência, em seguida os concretos com CCA e com SA e, por último, o concreto com EALD. Apesar de terem sido moldados em dias diferentes, todos os ensaios foram realizados na mesma idade. A moldagem se deu de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 1984).

Os traços estão relacionados na Tabela 6, sendo apresentados em relação proporcional à massa de cimento. O aditivo e a adição mineral são dados em porcentagem em relação à massa de cimento.

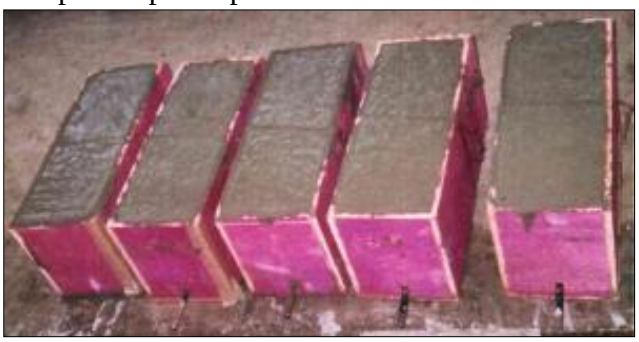
Tabela 6: Traços dos concretos, em massa.

Concreto	Relação a/aglom	Substituição do cimento (%)	Cimento	Areia	Brita	Aditivo (%)
Com casca de arroz	0,51	10	0,9	1,434	2,683	1,0
Com escória de aciaria	0,51	10	0,9	1,434	2,683	1,0
Com sílica ativa	0,51	10	0,9	1,434	2,683	1,5
Referência	0,51	-	1,0	1,434	2,683	-

As medições de abatimento de tronco de cone foram realizadas após a mistura de cada traço de concreto. Posteriormente, adensou-se os concretos por meio da

utilização de mesa vibratória. A Figura 2 mostra exemplares de corpos de prova prismáticos após a moldagem.

Figura 2: Corpos de prova prismáticos de concreto com sílica ativa.



- **Consistência**

Após a mistura de cada tipo de concreto, as medições do abatimento de tronco de cone foram realizadas segundo a NBR 7223 (ABNT, 1982). Foram feitas 8 medições de consistência, sendo 2 para cada tipo de concreto. A Figura 3 mostra a realização de uma destas avaliações da consistência.

Figura 3: Medição do abatimento de tronco de cone.

- **Resistência à compressão**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com os corpos de cilíndricos (15x30) cm. Conforme NBR 5739 (ABNT, 1980). Estes corpos de prova foram moldados e colocados em câmara úmida, ainda estando nas formas metálicas. Com 24 horas foram desmoldados e seguiram na câmara úmida.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados às idades de 7, 28, 63 e 91 dias (2 corpos de prova por idade) . No dia da realização do ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, capeados com enxofre e rompidos no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Goiás.

- **Absorção de água**

Os ensaios de absorção de água foram realizados nos corpos de prova cilíndricos (15x30) cm, de acordo com a NBR 9978 (ABNT, 1987). Os corpos de prova foram moldados e colocados em câmara úmida para cura conforme preconiza a NBR 9479 (ABNT, 1986), sendo no dia seguinte desmoldados. Após serem desmoldados voltaram para a câmara úmida. Os ensaios de absorção de água do concreto foram executados aos 63 dias de idade em 3 (três) corpos de prova por tipo de concreto. Primeiramente os corpos de prova sofreram secagem em estufa a 100°C, até obter-se massa constante. Logo após ocorreu a imersão em água por 72

horas e fervura por mais 5 horas. Os resultados, em porcentagem, foram obtidos através da seguinte expressão:

$$Absorção\ de\ àgua\ (\%) = \frac{Msat - Ms}{Ms} * 100 \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

Msat é a massa da amostra saturada, após fervura;
Ms é a massa da amostra seca em estufa.

No final, realizou-se a média dos valores encontrados nos três corpos de prova para cada tipo de concreto.

- **Permeabilidade ao ar**

A permeabilidade ao ar foi ensaiada pelo método de Figg. Esta metodologia mede de forma não destrutiva a permeabilidade do concreto. Adaptações às condições locais foram realizadas, de tal maneira a procurar reproduzir o método de Figg e diminuir as influências de erros internos do ensaio. Apesar de não ser um ensaio normatizado, esse método fornece um bom parâmetro para a avaliação da permeabilidade aos gases na camada de concreto que compõe o cobrimento da armadura.

De acordo com CATHER et al. (1984) que aperfeiçoaram a proposta inicial de Figg, o ensaio consiste em fazer furos (cavidades) de 10 mm de diâmetro por 40 mm de profundidade feitos com uma furadeira de baixa rotação na superfície do concreto. Os 20 mm superficiais são vedados com borracha e adesivo de base epóxi, de modo a formar uma câmara no interior do concreto de ϕ 10x20 mm. Para que exista uma comunicação da cavidade com o meio externo do concreto é utilizada uma agulha fixada na borracha de vedação.

Esse método tem como objetivo medir o tempo que o ar necessita para penetrar através do cobrimento do concreto e diminuir o vácuo imposto a uma cavidade executada no material (FIGG, 1973). No método original, o ar da cavidade é aspirado com uma bomba de sucção normal e o vácuo é medido com manômetro digital. Para essa pesquisa foi feita uma adaptação utilizando um aspirador mecânico e um vacuômetro analógico.

A medida da permeabilidade consiste em aspirar o ar da cavidade, medindo-se o tempo descendido para que a pressão interna passasse de 40 a 80 mmHg. Esse valor foi dividido por dois para se aproximar ao intervalo original e possibilitar o uso de classificação da qualidade do concreto em função do tempo de permeabilidade, proposto por CATHER et al (1984) mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação da qualidade da argamassa e concreto em função do tempo de permeabilidade (CATHER et al., 1984).

Categoria	Tempo médio de permeabilidade(s)	Interpretação	Tipo de material
0	< 30	Pobre	Argamassa porosa
1	30 - 100	Moderada	Concreto ~ 20 MPa
2	100 - 300	Boa	Concreto 30 - 50 MPa
3	300 - 1000	Ótima	Concreto bem adensado e bem curado
4	> 1000	Excelente	Concreto modificado por polímeros

- **Ensaio de averiguação da profundidade de carbonatação**

A conferência e determinação da profundidade de carbonatação, foi realizada através da aspersão de indicador químico de pH. Adotou-se indicador de fenolftaleína, devido à viabilidade técnica e econômica.

A preparação desta solução seguiu as recomendações de RILEM (1988). Uma solução com 1% de fenolftaleína foi adicionada ao álcool etílico em uma concentração de 70%. ANDRADE (1992) relata que uma solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico é incolor em pH inferior a 8,3. Sendo que para valores de pH superiores a 9,5 torna-se vermelho-carmim e entre 8,0 e 9,5 fica com coloração variável de rosa a vermelho-carmim. Como prática do LMC-UFG, adota-se o uso da fenolftaleína, baseando-se na virada de coloração com pH 9,0, em média. Esta prática é razoável ao passo em que as faixas de coloração são parâmetros que tem em sua análise perspectiva subjetiva, pautada no tom de cor variável de incolor, rosa e até vermelho Carmim, sendo este a coloração mais intensa e escura.

A solução foi aspergida imediatamente após o rompimento. Evitando interferência de carbonatação superficial que ocorre naturalmente, mas que demanda certo tempo. Nas regiões de pH superior a 9, o concreto apresentou uma tonalidade vermelho-carmim. Nas regiões onde, devido à carbonatação, o pH apresentou valores inferiores a 9, o concreto manteve-se incolor.

No ensaio de averiguação da profundidade de carbonatação com um ano de idade, a aplicação da fenolftaleína foi feita logo após limpeza das superfícies e fratura de 5 locais diferentes dos corpos de prova. A leitura da profundidade de carbonatação foi feita logo após a aplicação do indicador e medida com o auxílio do paquímetro. Para análise estatística, tomou-se as medidas da profundidade de carbonatação nestes cinco pontos diferentes de um mesmo corpo de prova, visando a obtenção da média. A Figura 4 mostra um dos corpos-de-prova com a solução de fenolftaleína aplicada, como pode ser observado pela coloração vermelho carmim.

A metodologia de coleta de dados entre este ensaio realizado com 1 ano de idade fora aprimorada e modernizada buscando maior refinamento e precisão para a etapa realizada aos 17 anos de idade.

Figura 4: Corpo de prova recém fraturado com indicador de pH de fenolftaleína aplicado, com 1 ano de idade.

No ensaio realizado aos 17 anos, a ruptura foi feita através de golpes de marreta em talhadeira. Buscou-se realizar fratura rompendo toda a seção transversal do corpo de prova, em ângulo o mais próximo possível de 90º, visando a obtenção de medidas mais precisas (RILEM, 1988).

Após rompimento aspergiu-se a solução indicadora. Realizou-se as medidas da profundidade de carbonatação com paquímetro digital no ponto que visualmente a carbonatação se encontrava mais profunda. Sempre tomando a frente de carbonatação na pasta de cimento, uma vez que o agregado compõe barreira física inerte, intransponível ao CO_2. Em seguida, partiu-se para a tomada de dados por fotografias. Dispôs-se a câmera digital de alta definição em tripé nivelado por nível de bolha. A câmera fora posicionada frente ao corpo de prova, tomando-se os devidos cuidados para evitar possíveis angulações que venham atrapalhar a tomada de medidas, por meio de efeitos óticos, e as fotos foram tiradas.

As fotografias das faces rompidas dos corpos de prova foram exportadas para o *software* AutoCad da empresa AutoDesk©. Com o auxílio deste software pôs-se as fotografias em escala. Através do comando polyline, delineia-se o contorno limítrofe da região não carbonatada, que nas fotografias compreende a área de coloração vermelho carmim. Criou-se uma linha na extremidade superior da face do corpo de prova, que configura a face de entrada dos gases atmosféricos para os pontos analisados. Em seguida, traçou-se um polígono a partir do contorno da região de pH inferior a 9,0, região onde a colaração se encontrava em tonalidade vermelho carmim, com intensidade significativa. Criou-se linhas verticais saindo da linha na face superior do corpo de prova indo até o polígono, com distância constante entre si de 1 mm. Desta forma, estas linhas configuram a profundidade de carbonatação para este ponto em questão.

A análise da frente de carbonatação neste trabalho se ateve ao fenômeno ocorrendo em duas dimensões. Fez-se necessário a eliminação do efeito de ponta. Que consiste no avanço em maiores proporções da frente de carbonatação nas arestas do corpo de prova, que é prismático, tal fenômeno se dá devido à entrada do gás carbônico da atmosfera pelas duas faces adjacentes à aresta. Para tal retirou-se da análise 4,5 cm de cada lado, do contorno desta frente de carbonatação. Com isto também se evitou a influência de algum efeito de desagregação que poderia ter ocorrido na parte debaixo do corpo de prova e de exsudação, na parte de cima do corpo de prova. Sendo a dimensão da largura lateral igual a 20 cm, ao final, fazendo as supracitadas

considerações, trabalhou-se com 11 cm efetivos para a medida da profundidade de carbonatação. A Figura 5 mostra as fotografias após terem sido analisadas segundos os refinamentos propostos.

Figura 5: Fotografias dos corpos de prova após processo de rompimento, averiguação da profundidade de carbonatação e tratamento com refinamento em software. As cotas de medidas apresentam-se em (mm).

Os valores de profundidade desta frente de carbonatação foram exportados para o software Microsoft Excel, através de um recurso de programação denominado Rotina COTA, utilizado dentro do software Autocad. Esta rotina gerou a cota, ou seja, a dimensão de cada linha que configurava a profundidade de carbonatação. No software Excel fez-se a análise estatística. Determinou-se o valor referente à média das profundidades. O valor máximo foi considerado como sendo a média dos cinco valores máximos, sendo denominado de Max_5.

Os valores médios da profundidade de carbonatação com 1 e 17 anos foram usados para a análise do fenômeno de avanço da frente de carbonatação no concreto. A média para o ensaio com 1 ano, constitui-se da média dos cinco pontos medidos com o paquímetro. Já a média para o ensaio aos 17 anos, constitui-se da média das 111 medidas dadas pelas cotas das linhas a cada milímetro.

Foram feitas duas análises gráficas a partir dos valores experimentais, pela curva real e pela curva teórica clássica. A análise pela curva teórica se baseou no consagrado modelo de estimativa da carbonatação mostrado na equação (4).

$$e_{co_2} = k\sqrt{t} \qquad \text{Equação (4)}$$

Onde:

e_{co_2} = Espessura de carbonatação;
k = Constante intrínseca do concreto analisado, a ser obtida por medições experimentais;
t = tempo

Uma característica relevante desta Equação (4) é o expoente fixo igual a 0,5, aplicado ao tempo. Tomando a média da carbonatação aos 17 anos e substituindo na equação, obteve-se o K. Com este coeficiente k definido para cada tipo de concreto, pode-se traçar a curva do fenômeno de carbonatação segundo modelo da Equação (4) para cada tipo de concreto. Logo, as curvas traçadas partir da origem passaram perfeitamente pelo ponto de carbonatação aos 17 anos, apresentando R^2=1.

A curva real consistiu em uma análise que releva o efeito das adições no modelo tradicional de estimativa do avanço da frente de carbonatação. Para tal, tomando-se a Equação (4) e deixando livre, o coeficiente k e o expoente do tempo, por regressão, encontrou-se a curva que passa perfeitamente pelos pontos equivalentes à carbonatação com 1 ano e com 17 anos de exposição, obtendo também R^2=1. De tal maneira obteve-se a equação da curva real.

A partir das equações da curva teórica e da curva real, realizou-se a estimativa da frente de carbonatação para a vida útil do concreto. Projetando a profundidade da carbonatação para um horizonte de vida útil de 50 anos, preconizado pela ABNT NBR 6118:2014. Desta forma, estimando os cobrimentos necessários para garantir a camada passivadora do concreto e garantindo a proteção contra a corrosão das armaduras devido à carbonatação.

• APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentam-se os resultados de consistência, resistência à compressão, absorção de água, permeabilidade ao ar pelo método de Figg e medidas de profundidade de carbonatação com respectiva análise gráfica.

• Consistência

Ao final de cada moldagem foi realizado ensaio do abatimento de tronco de cone, conforme NBR 7223 (ABNT, 1982). Totalizaram-se 8 medidas de abatimento de tronco de cone. Os valores obtidos estão discriminados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados dos abatimentos de tronco de cone

Concreto	Abatimento de tronco de cone (mm)	Média dos valores encontrados (mm)	% de aditivo plastificante*
C. Referência	67-65	66	0
C. Sílica ativa	70-75	73	1,5
C. Cinza de casca de arroz	60-80	70	1
C. Escória de aciaria LD	78-75	77	1

*Em relação à massa de aglomerante

Analisando os valores da Tabela 8 observa-se que a consistência dos concretos foi mantida dentro da tolerância determinada, devido ao uso de aditivo superplastificante nos concretos com adição juntamente com o tipo de adição mineral. Como já descrito no programa experimental, o valor do abatimento do tronco de cone foi fixado em 70±10 mm.

Durante a confecção dos corpos-de-prova foram feitas análises visuais com o intuito de produzir um concreto coeso e não segregável.

Nos concretos com a adição de sílica ativa foi necessária uma maior quantidade do superplastificante para obtenção da trabalhabilidade previamente fixada. Isso provavelmente se deu pela grande quantidade de material fino presente no concreto, o que requer uma quantidade de água maior para molhagem ocasionado pela maior superfície específica dos grãos ou maior adição de aditivo superplastificante.

Para os concretos com substituição do cimento pelas adições minerais, o uso do superplastificante é necessário para se obter a mesma consistência do concreto de referência. Isto devido à área especifica das adições minerais que resulta em uma demanda de água elevada quando os materiais estão incorporados no concreto, o que é superado com o uso do superplastificante.

De acordo com MALHOTRA (1998) o uso de adições minerais como a S.A e da C.C.A. no concreto, gera a demanda quase que obrigatória do uso de superplastificante.

- **Resistência à compressão**

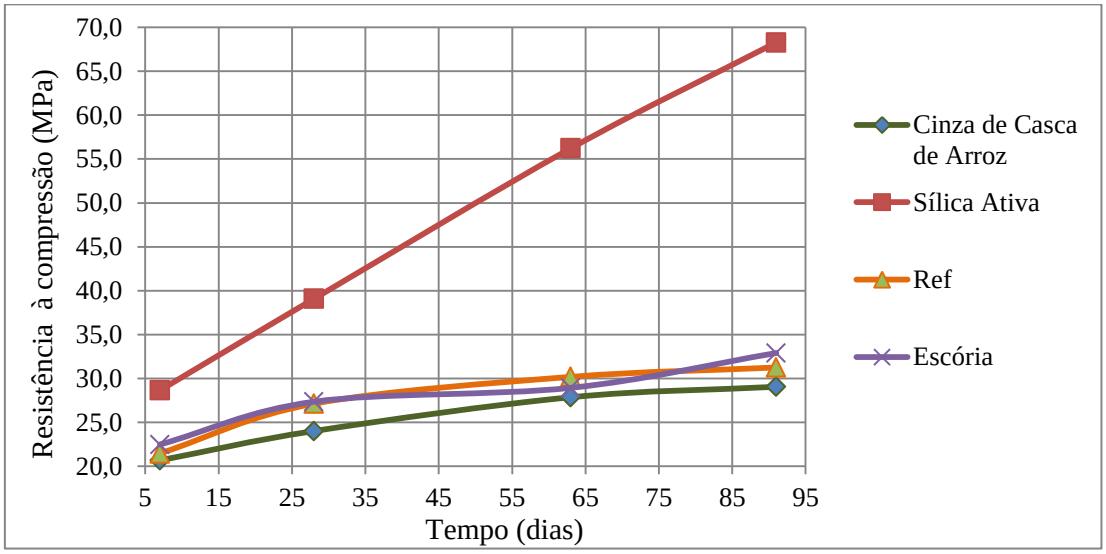
Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, dos concretos referência e dos concretos com adições de sílica ativa, cinza de casca de arroz e escória de aciaria LD, curados em câmara úmida por 7, 28, 63 e 91 dias, retirados da cura para a realização deste ensaio. A tabela mostra a média e os desvios padrão relacionados aos dois corpos de prova ensaiados, a cada idade.

Tabela 9: Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto.

Concreto	Idades (dias)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Com casca de arroz	7	20,67	0,56
	28	24,01	2,57
	63	27,86	0,32
	91	29,05	0,56
Com escória de aciaria	7	22,48	0,08
	28	27,35	0,08
	63	28,93	1,05
	91	32,9	1,04
Com sílica ativa	7	28,65	0,48
	28	39,08	0,8
	63	56,22	0,57
	91	68,28	1,76
Referência	7	21,46	1,36
	28	27,13	2,16
	63	30,18	0,24
	91	31,25	1,63

Já a Figura 6 apresenta graficamente a evolução da resistência à compressão dos concretos estudados de 7 até 91 dias de idade. Onde, mostra-se de forma mais intensa o enorme ganho de resistência á compressão do concreto com sílica ativa, frente aos demais concretos com adições minerais estudados e o concreto referência. Apresentando resistência maior aos sete dias e crescendo acentuadamente até os 91 dias de idade. Isso também foi comprovado por MONTEIRO et al. (1999); MELGAREJO & DAL MOLIN (2000) que, com o uso da sílica aviva, obtiveram maior resistência à compressão, relacionando esse resultado com a diminuição da espessura e da porosidade da zona de transição, devido às reações pozolânicas entre o $Ca(OH)_2$ e a sílica ativa, e ao efeito microfiller que torna o concreto menos heterogêneo e mais resistente.

Figura 6: Gráfico da evolução da resistência à compressão de 7 até 91 dias para todos os concretos estudados.



Observa-se na Tabela 10, que o concreto com sílica ativa, apresentou um crescimento de sua resistência logo nas primeiras idades, onde com 7 dias apresentava uma resistência superior (28,65MPa) ao concreto referência (21,46MPa). Esse crescimento pode ser explicado pela sua maior reatividade, grande superfície específica e, consequentemente, pela sua rápida hidratação, o que as classificam como superpozolanas. Além desse efeito pozolânico, possui um efeito filler, responsável pela reorganização interna dos vazios capilares deixados pela água de amassamento.

De acordo com MARTAS & DJANIKIAN (1995) o efeito microfiller, é responsável por um maior empacotamento dos sólidos presentes. As pequenas partículas de sílica ativa, com sua geometria esférica, preenchem efetivamente os vazios que se formam entre os grãos de cimento, que são partículas maiores e angulosas, o que provoca a redução dos espaços disponíveis para a água, contribuindo para o aumento da coesão do concreto e da compacidade da pasta e da zona de transição.

Resultado análogo foi encontrado por VIEIRA (1994). Devido a grande área específica da sílica ativa e de ser praticamente constituída de sílica amorfa, esta adição reage com grande rapidez com o hidróxido de cálcio formado durante a

hidratação do cimento, dando origem ao silicato de cálcio hidratado, que fecha os grandes vazios capilares do concreto.

Também pode-se ver na Figura 6 que o concreto com sílica ativa foi 33,5% mais resistente aos 7 dias de idade do que o concreto de referência. Este valor passou para 44,01% aos 28 dias de idade, 86,28% aos 63 dias e 118,5 % aos 91 dias. Isso é bastante benéfico para a estrutura de concreto, visto que em algumas situações, um concreto com elevada resistência, pode significar, um concreto com vida útil mais elevada, além de que, um concreto que apresente resistência elevada nas idades iniciais pode ser necessário em casos de urgência de desforma e entrega da estrutura.

A Figura 6 também mostra que a resistência à compressão obtida aos 3 meses de idade (91 dias), com o concreto com sílica ativa cresceu 138,3% em relação aos 7 dias. No caso do concreto de referência esse crescimento foi de 45,62%, enquanto que no concreto com cinza de casca de arroz foi de 40,54% e com escória de aciaria LD foi de 46,35%.

O concreto com escória de aciaria LD, ou somente EALD, apresentou valores muito próximos ao concreto de referência. Aos 7 dias de idade apresentou um aumento de 4,8% da resistência à compressão em relação ao concreto referência e um acréscimo de 5,3% aos 91 dias de idade. Dos 7 aos 91 dias de idade, o concreto com escória de aciaria LD apresentou um crescimento de 46,35%, enquanto o crescimento da resistência no concreto de referência foi de 45,62%. Atribui-se estes resultados ao fato de que as reações da escória ocorrem em idades mais avançadas (LIBORIO et al. 2000), podendo ocorrer resistências mais elevadas após os 91 dias de idade.

BAUER (1995) diz que as reações de hidratação da escória de alto forno são relativamente lentas em comparação com a evolução do grau de hidratação dos compostos do cimento.

GEYER et al (1999) encontraram valores satisfatórios de resistência à compressão em concretos com substituição de escória de aciaria elétrica na porcentagem de 10%. Com substituições de 40% a resistência foi inferior ao concreto de referência, chegando a conclusão que existe uma quantidade adequada de escória que pode ser adicionada ao concreto sem causar queda na sua resistência. Neste estudo, os autores observaram crescimento em média de 66,94% de resistências dos 91 dias aos 180 dias.
Apesar do pequeno aumento da resistência à compressão dos concretos com substituição pela EALD, em relação ao concreto referência, é interessante observar que com o uso de um resíduo industrial, encontrado em grandes proporções no Brasil, pode-se obter um concreto de resistência próxima ao concreto convencional. Isso possibilitaria uma economia na confecção dos concretos e se apresenta também com o viés de alternativa mais sustentável.

Em relação a cinza de casca de arroz, MEHTA (1992); COOK (1984) entre outros autores, dizem que concretos com essa adição só apresentam resistências elevadas quando a casca é queimada com controle de tempo e temperatura. De acordo com MALHOTRA (1998), resistências acima de 20 MPa podem ser alcançadas no primeiro dia com o uso da cinza de casca de arroz. Para isso é necessária uma elevada quantidade de superplastificante, uma vez que a CCA normalmente demanda

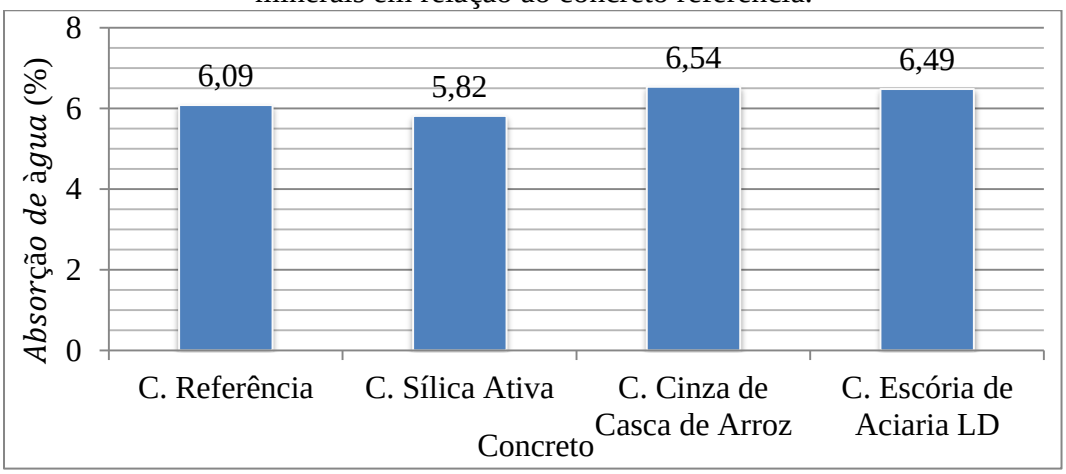
muita água em função da sua elevada superfície específica e carbono oriundo da combustão.

A Figura 6 mostra que o concreto com Cinza de casca de arroz obteve um decréscimo de sua resistência aos 7 dias de idade de 3,68% em relação ao concreto referência. A mesma figura mostra que aos 91 dias o concreto com CCA foi 7,04% menos resistente que o concreto de referência. Mostra ainda que a resistência deste concreto cresceu 40,54% dos 7 aos 91 dias de idade, valor inferior aos 45,62% do concreto referência.

- **Absorção de água**

Os ensaios de absorção de água foram executados aos 63 dias de idade, e os resultados estão mostrados na Figura 7.

Figura 7: Resultados dos ensaios de absorção de água nos concretos com adições minerais em relação ao concreto referência.



Determinar as condições da superfície do concreto pelo ensaio de absorção apresenta vantagens, pois se obtém resultados em curto período, sendo também um importante indicativo da durabilidade do concreto.

Os resultados obtidos são analisados em função das adições utilizadas, com objetivo de fazer comparações entre as adições minerais. Os concretos confeccionados com adições minerais apresentam conduta muito peculiar uma vez que os resultados são influenciados pelo tipo e quantidade das adições minerais.

Observa-se nos resultados da Figura 7 que todos os concretos tiveram um desempenho muito parecido, sendo o concreto com sílica ativa o que apresentou um menor índice de absorção de água em relação ao concreto de referência, embora muito próximo.

Isso pode ser explicado devido aos pequenos grãos das partículas de sílica ativa, comparadas aos do cimento Portland, que proporciona um empacotamento da microestrutura, contribuindo para diminuição da porosidade, e dificultando a absorção da água.

Os resultados de absorção estão coerentes com os de resistência à compressão, uma vez que, nessa pesquisa a resistência à compressão esta relacionada com a absorção.

Concretos mais resistentes normalmente são menos porosos e, por sua vez, menos absorventes e mais duráveis.

Os resultados de absorção, no que se refere ao efeito barreira, dão razões para que se espere uma maior resistência à penetração dos íons Cloreto, sulfatos e de gases como o dióxido de carbono e o oxigênio.

A Figura 7 mostra que o concreto com sílica ativa teve queda de 4,43% em relação ao concreto de referência na absorção de água. Isso comprova que a absorção de água é inversamente proporcional à resistência a compressão. A Figura 7 mostra ainda que os concretos com EALD apresentaram absorção de água 6,5% maior que o concreto referência. Provavelmente devido a maior porosidade, facilitando a passagem de água pelos poros do concreto.

O melhor desempenho frente à absorção do concreto com S.A. em relação ao concreto com EALD pode ser devido à maior reatividade da sílica ativa frente à escória de aciaria LD, razão pela qual o tamponamento e bloqueio dos poros devido às reações pozolânicas seriam tão importante quanto o efeito filler, apresentado nas escórias.

O ensaio de absorção de égua nos concretos com substituição do cimento pela cinza de casca de arroz, apresentaram resultados superiores ao do concreto com substituição da escória de aciaria LD. Na Figura 7, vê-se que a absorção do concreto com cinza de casca de arroz aumentou 7,39% com relação ao concreto de referência.

Como já mencionado anteriormente, a cinza de casca de arroz apresenta uma área de reação grande, não apresentando um bom efeito filler, que devem estar em sua forma amorfa para apresentarem uma reatividade adequada (MEHTA & MONTEIRO, 2008). COOK (1984) diz que o processo de queima da casca pode interferir nas características da cinza, sendo que o principal objetivo da queima é a obtenção da sílica amorfa para atuar como pozolana.

Estas considerações podem explicar os resultados elevados da absorção de água da cinza em estudo, uma vez que a CCA apresenta em sua maioria sob a forma de material cristalino, proveniente de uma queima a céu aberto sem controle de temperatura.

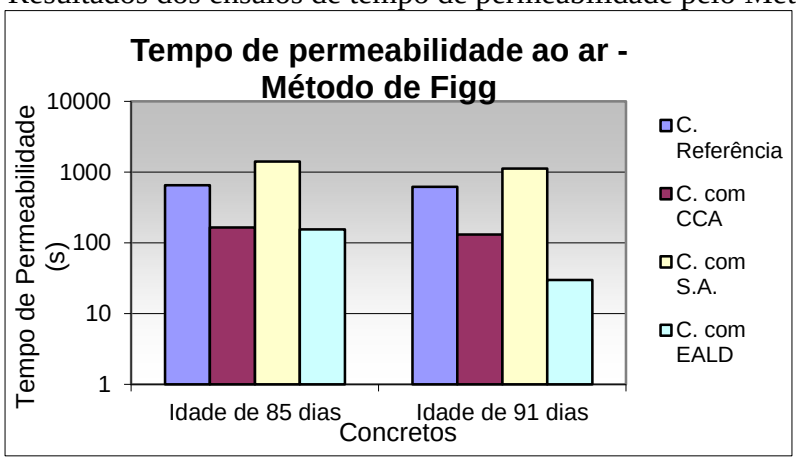
RÊGO (2001) observou em concretos com relação a/c de 0,35, que a absorção diminui à medida que aumenta-se o teor de substituição de CCA, isso devido à finura das partículas de CCA, que conseguem tamponar os poros diminuindo assim a absorção do concreto. Porém quando se aumenta a relação a/c, aumenta-se a absorção à medida que aumenta o teor de substituição. Isso pode ser explicado pelo fato dos poros desses concretos serem relativamente grandes quando comparados ao concreto de menores relações a/c. Assim as partículas da CCA não conseguem tamponar os poros do concreto para fechar o caminho de penetração da água e consequentemente a absorção do concreto.

- **Permeabilidade ao ar**

Os ensaios de permeabilidade ao ar forma realizados nos corpos de prova cilíndricos nas idades de 85 e 91 dias. Todas as medidas foram realizadas com os concretos em equilíbrio com umidade relativa de 50±10%.

Os resultados dos tempos de permeabilidade são apresentados na Figura 8. Nesta, mostra-se as diferenças de permeabilidade ao ar entre os distintos tipos de concretos estudados.

Figura 8: Resultados dos ensaios de tempo de permeabilidade pelo Método Figg.



Comparando as médias dos resultados obtidas para o concreto de referência em relação aos concretos com as adições minerais, observa-se que aos 85 dias o concreto com sílica ativa teve seu tempo de permeabilidade acrescido de 116,%, enquanto que os concretos com cinza de casca de arroz e com escória de aciaria LD registraram tempos de 74,65% e 76,19%, respectivamente, inferiores ao concreto de referência. Isto quer dizer que o concreto com escória de aciaria LD é mais permeável no ar que o concreto com CCA, que por sua vez é mais permeável que o concreto referência. O concreto com S.A. mostrou-se menos permeável ao ar.

Aos 91 dias, o concreto com sílica ativa teve sua permeabilidade acrescida de 79,6% em relação ao concreto referência e os concretos com cinza de casca de arroz e com escória de aciaria LD, decresceram em 78,8% e 95,18%, respectivamente. Observa-se que os comportamentos frente à permeabilidade ao ar mantiveram-se em relação aos obtidas aos 85 dias.

Isso pode ser explicado pela própria microestrutura do meterial. Concretos com volume de poros menores apresentam baixa interconexão da rede porosa, o que contribui para uma melhor homogeneidade do material.

Seguindo a classificação dada por CATHER et al. (1984) mostrada na Tabela 7, pode-se qualificar os concretos conforme a Tabela 11. Para esta qualificação foram empregadas as médias aritméticas dos tempos de permeabilidade nas duas idades estudadas.

Tabela 11: Classificação dos materiais através do tempo de permeabilidade.

Concreto	Tempo médio de permeabilidade (s)	Interpretação
C. Cinza de Casca de Arroz	149	Boa
C. Escória de Aciaria LD	93	Moderada
C. Sílica Ativa	1265	Excelente
C. Referência	637	Ótima

- **Carbonatação**

Os resultados dos ensaios de averiguação da profundidade da frente de carbonatação mínima, média e máxima com 1 e com 17 anos de idade, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação.

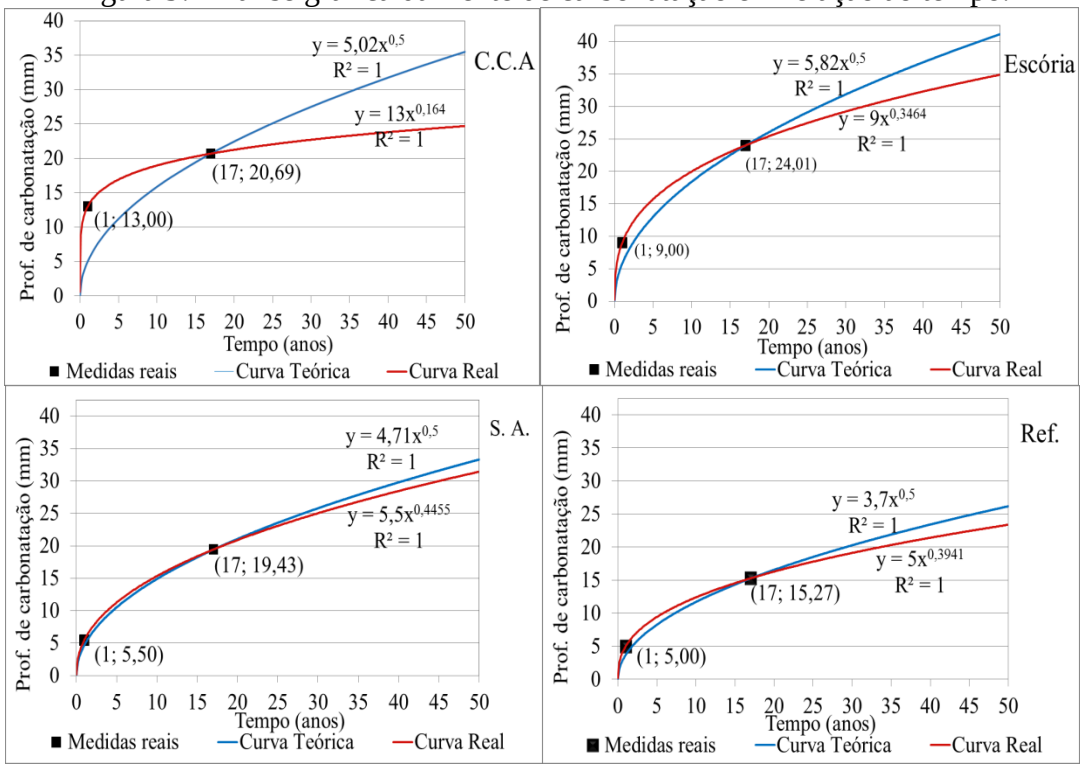
Concretos	Prof. carbonatada 1 ano de idade		Prof. carbonatada 17 anos de idade		
	Média (mm)	Máx (mm)	Mín (mm)	$Máx_5$ (mm)	Média (mm)
C. Cinza de Casca de Arroz	13,0	20	16,31	23,43	20,69
C. Escória de Aciaria LD	9,0	12	20,05	26,79	24,01
C. Sílica Ativa	5,5	6	13,87	24,26	19,43
C. Referência	5,0	7	10,87	19,33	15,27

Observa-se para a profundidade de carbonatação média e máxima aos 17 anos que o concreto com escória de aciaria LD foi o que apresentou maior avanço da frente de carbonatação. Em seguida, na ordem decrescente, vieram o concreto com cinza de casca de arroz e o com sílica ativa. Diferentemente, nas primeiras idades, com 1 ano de moldado, o concreto com cinza de casca de arroz se mostrou o menos resistente quanto ao avanço da frente de carbonatação, seguido do concreto com escória de aciaria LD e do com sílica ativa.

A avaliação dos valores mínimos, médios e máximos da frente de carbonatação, coloca o concreto de referência com unânime melhor desempenho quanto à carbonatação em relação aos concretos com adições, tanto com os resultados de primeiras idades, 1 ano, quanto de idade mais avançada com 17 anos de exposição natural.

A Figura 9 mostra o avanço da frente de carbonatação em relação ao tempo, segundo o modelo original teórico, denominado como curva teórica e o modelo experimental, denominado como curva real.

Figura 9: Análise gráfica da frente de carbonatação em relação ao tempo.

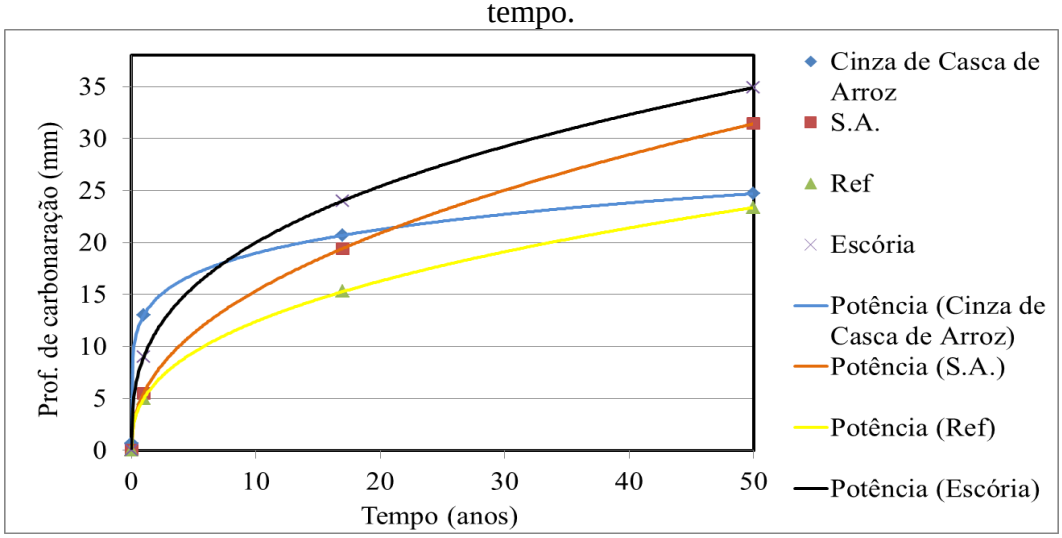


A análise gráfica mostra que em relação às primeiras idades, as adições minerais em geral permitiram um maior avanço da carbonatação. Tal fenômeno pode ser averiguado no intervalo de tempo de até um ano de idade, onde a curva real se apresentou acima da curva teórica, mostrando que durante este intervalo a carbonatação nos concretos com adições minerais ocorreu de maneira mais acelerada, alcançando maiores profundidades neste período. Percebe-se também que em idades mais avançadas, o modelo teórico leva a valores maiores de carbonatação. Tal constatação pode ser observada nos gráficos da Figura 9, pois em todos os casos, a curva real em idades mais avançadas se encontrou abaixo da curva teórica clássica. Desta forma, faz-se necessário repensar o modelo teórico.

O processo de obtenção das equações que representam as curvas mostrou que quanto à obtenção do coeficiente k de ambos os modelos teóricos e empíricos utilizados, que é de suma importância os resultados da carbonatação com um ano de idade. Ao passo que com esta idade o tempo é igual a 1. Quando o tempo é igual a 1 e é elevado a um coeficiente de potência de qualquer número, continua sendo 1. O termo tempo elevado à potência se torna uma constante igual a 1 e a equação passa a ser resumida em eco_2 =K. Logo, para a leitura da carbonatação com um ano de idade, a profundidade de carbonatação é numericamente igual ao coeficiente K.

A Figura 10 traz a comparação entre os concretos por meio das curvas reais de carbonatação versus o tempo.

Figura 10: Análise gráfica da frente de carbonatação dos concretos em relação ao tempo.



Utilizando-se dos valores médios da profundidade de carbonatação e realizando-se as devidas análises gráficas e estatísticas, pode-se estimar a profundidade que a frente de carbonatação atingirá aos 50 anos de idade. A Tabela 13 resume os resultados obtidos

Tabela 13: Resumo dos ensaios de profundidade de carbonatação com 1 e 17 anos de idade e os cobrimentos necessários à vida útil de projeto de 50 anos.

Concretos	Projeção da carbonatação em 50 anos pela curva teórica		Projeção da carbonatação em 50 anos pela curva real	
	K	Prof. carbonatada estimada (mm)	Equação	Prof. carbonatada estimada (mm)
C. Cinza de casca de arroz	5,02	35,50	$e_{CO_2} = 13x^{0,165}$	24,69
C. Escória de aciaria LD	5,82	41,15	$e_{CO_2} = 9x^{0,3464}$	34,90
C. Sílica ativa	4,71	33,30	$e_{CO_2} = 5,5x^{0,4455}$	31,42
C. Referência	3,70	26,16	$e_{CO_2} = 5x^{0,3941}$	23,36

Segundo classificação de agressividade ambiental (C.A.A.) da NBR 6118 (ABNT, 2014), a região metropolitana de Goiânia (GO), onde se deu envelhecimento natural dos corpos de prova deste estudo, se enquadra na classe de agressividade II. Esta classificação remonta a ambientes urbanos de pequeno risco de deterioração da estrutura, onde a agressividade é moderada. A partir desta classificação pode-se averiguar o cobrimento necessário indicado por esta normativa a ser respeitado pelos componentes e elementos estruturais edificados em tal meio. A Tabela 14 apresenta os valores normativos. As espessuras de cobrimentos expressas nesta tabela se referem aos cobrimentos nominais. Cobrimento nominal é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Assim, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais estabelecidos, para Δc = 10 mm. Desta maneira compreende-se que os cobrimentos efetivos reais esperados pela norma compreende os valores expressos menos os 10mm de tolerância de execução.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estipula duas situações em que esta tolerância de execução de 10 mm seja reduzida para Δc=5 mm, permitindo-se, então, a redução dos cobrimentos nominais especificados em até 5 mm. Estas duas situações se referem a quando houver um controle adequado de qualidade e limites rígidos de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução da estrutura de concreto ou quando se der o emprego de concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido. Desta forma tem-se a possibilidade de obtenção de cobrimentos executados menores que os nominais.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica, para estruturas de concreto armado desta mesma classe de agressividade, que os concretos apresentem relações água/cimento, em massa, menor ou igual a 0,60, e que a resistência à compressão seja maior ou igual a 25 MPa. Os concretos analisados neste estudo foram moldados com relações a/c iguais a 0,51. Aos 28 dias somente o concreto com cinza de casa de arroz apresentou resistência menor que o especificado, com 24 MPa, tendo aumentado para 27,86 MPa aos 63 dias.

A Tabela 14 traz o cenário em que se somam 10 mm (Δc) aos cobrimentos mínimos estimados para a obtenção de uma vida útil de proteção igual a 50 anos, encontrados neste estudo, tanto pela análise real quanto pela teórica clássica.

Tabela 14: Cobrimentos nominais para atingir uma VUP de 50 anos, estimado pela curva teórica, real e especificado NBR 6118 (ABNT, 2014) para estruturas de concreto armado.

Concretos	Cobrimento nominal estimado pela curva teórica (mm) Δc=10mm	Cobrimento nominal estimado pela curva real (mm) Δc=10mm	Cobrimento nominal NBR 6118 (ABNT, 2014) (mm) com Δc=10 mm	
			Lajes	Demais elem. Estruturais*
C. Cinza de casca de arroz	45	35	25	30
C. Escória de aciaria LD	51	45	25	30
C. Sílica ativa	43	41	25	30
C. Referência	36	33	25	30

*Compreende vigas, pilares e elementos estruturais em contato com o solo.

Notoriamente percebe-se que os valores de cobrimento especificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), no que tange à critérios de proteção preventiva contra a carbonatação, se encontram defasados e subestimados, para os concretos estudados. Viu-se que os cobrimentos normativos estão todos inferiores aos que foram estimados neste trabalho. Sendo que já aos 17 anos, os valores de profundidade de carbonatação se mostraram avançados e alguns bem próximos do que se prevê nesta norma. O concreto com EALD, por exemplo, apresentou 24 mm de profundidade média de carbonatação aos 17 anos. Ressalta-se a importância de reavaliar estes cobrimentos normativos e de propor a separação por composição do concreto, tendo em vista a variabilidade da velocidade de carbonatação devido às adições minerais.7

- **CONCLUSÕES**

O presente trabalho abordou a questão da utilização da sílica ativa, da cinza de casca de arroz e da escória de aciaria LD em concretos, com vista à durabilidade quanto à carbonatação. Analisando-se os resultados obtidos no programa experimental, e com base na revisão bibliográfica, as seguintes considerações podem ser feitas.

- **Quanto à caracterização das adições minerais e a consistência dos concretos estudados**

Na realização do ensaio observou-se que, para os concretos com substituição do cimento pelas adições minerais, ocorreu perda de consistência do concreto, sendo necessária a utilização de aditivo superplastificante. Foi necessária uma maior proporção do superplastificante nos concretos com adições de sílica ativa, devido à alta quantidade de material fino.

- **Quanto à resistência à compressão**

Observa-se que para o concreto com sílica ativa ocorreu um aumento acentuado em sua resistência à compressão em relação às demais adições minerais estudadas. O concreto com cinza de casca de arroz apresentou resultados de resistência à compressão inferiores ao concreto referência em todas as idades estudadas. Isso pode ter ocorrido devido a cinza utilizada não ter passado pelo processo de queima com tempo e temperatura controlada.

O concreto com escória de aciaria LD, apresentou um aumento insignificante na resistência à compressão quando comparado ao concreto referência, para as idades de 7 a 91 dias. A escória necessita de um tempo maior para sua reação de hidratação.

Observa-se que dos 7 aos 28 dias os concretos com sílica ativa obtiveram um ganho de resistência à compressão de 44,01% em relação ao concreto referência. O concreto com cinza de casca de arroz dos 7 aos 28 dias, decresceu sua resistência à compressão em relação ao concreto referência na ordem de 11,50%. O concreto com escória de aciaria LD apresentou um aumento insignificante de 0,81% em relação ao concreto referência.

Aos 91 dias de idade o concreto com sílica ativa obteve um crescimento na ordem de 138,3% de sua resistência à compressão em relação aos 7 dias de idade. Apresentando um aumento superior ao concreto referência, que foi de 45,62%. O concreto com cinza de casca de arroz apresentou um aumento de sua resistência dos 7 aos 91 dias de 40,54%. O concreto com escória de aciaria LD obteve resistência à compressão superior ao concreto referência, dos 7 aos 91 dias, apresentando um crescimento de resistência à compressão de 46,35%.

- **Quanto à absorção de água**

Para os concretos com adição de sílica ativa os resultados apresentaram uma menor absorção de água em relação ao concreto referência. O efeito micro filler da sílica ativa se fez presente, tamponando os poros do concreto e consequentemente diminuindo sua absorção.

Para as adições de cinza de casca de arroz e escória de aciaria LD os resultados mostraram-se contrários aos encontrados na sílica ativa, uma vez que, a absorção de água foi maior que o do concreto de referência.

- **Quanto à permeabilidade ao ar**

As análises das médias dos resultados obtidos para o concreto de referência em relação aos concretos com as adições minerais, mostra que o concreto com sílica ativa apresentou tempo de permeabilidade maior que o tempo do concreto de referência, enquanto que os concretos com cinza de casca de arroz com escória de aciaria LD, mostraram-se inferiores ao concreto referência.

Isto quer dizer que o concreto com escória de aciaria LD é mais permeável ao ar que o concreto com CCA, que por sua vez é mais permeável que o concreto de referência. O concreto com S.A. mostrou-se menos permeável ao ar, com influência positiva na redução da permeabilidade do concreto.

- **Quanto à profundidade de carbonatação**

Os resultados dos ensaios realizados com 1 ano de idade, adotando-se a média dos valores encontrados, mostram que o concreto com cinza de casca de arroz foi o que apresentou uma maior profundidade de carbonatação, seguido pelo concreto de escória de aciaria LD e pela sílica ativa. Observa-se também que pela média dos valores das profundidades de carbonatação obtidas com 1 e 17 anos, o concreto de referência apresentou-se em melhores condições em relação aos concretos com adições minerais, o que demonstra que os concretos com adições minerais apresentam desempenhos inferiores ao concreto convencional, no que se refere à resistência a carbonatação.

Observou-se nos ensaios realizados aos 17 anos de idade para a profundidade de carbonatação média que o concreto com escória de aciaria LD foi o que apresentou maior avanço da frente de carbonatação. Em seguida vieram o concreto com cinza de casca de arroz e o com sílica ativa.

A avaliação dos valores mínimos, médios e máximos da frente de carbonatação, coloca o concreto de referência com unânime melhor desempenho quanto à carbonatação em relação aos concretos com adições minerais, tanto quanto aos resultados de primeiras idades, 1 ano, quanto de idade mais avançada como de 17 anos de exposição natural.

- **Conclusões gerais**

Várias pesquisas têm demonstrado que a utilização das adições minerais proporciona melhorias significativas aos concretos devido ao maior refinamento dos poros e a uma menor permeabilidade, podendo ser observado aumento da vida útil das estruturas devido em partes à melhora da resistência à compressão e a diminuição da penetração dos agentes agressivos, influenciando na durabilidade das estruturas de concreto amado.

Os resultados mostram a existência de uma correlação entre os parâmetros estudados e a eficiência de cada uma das adições minerais sobre as propriedades do concreto armado, visando a durabilidade das estruturas, uma vez que foram encontrados melhorias em relação ao concreto referência.

No que tange à resistência ao avanço da carbonatação as adições minerais não apresentaram contribuição. Entende-se que mesmo contribuindo para a melhoria da barreira física que reduz a entrada de agentes deletérios no concreto, o desempenho quanto à carbonatação foi ruim devido à redução da reserva alcalina por parte das adições minerais. Enquanto isto, o concreto referência apresentou-se o mais resistente ao avanço da frente de carbonatação, com melhores projeções de VUP para o período de 50 anos.

A partir dos resultados obtidos pode-se constatar que o uso das adições minerais, em substituição ao cimento, promove alterações na estrutura da pasta com reflexos no comportamento mecânico e na durabilidade do concreto em relação à despassivação das armaduras.

• Resumo dos ensaios realizados

Para uma melhor visualização e entendimento dos comportamentos das adições minerais aqui estudadas, em relação ao concreto referência, apresenta-se, na Tabela 15, um resumo dos resultados encontrados nos ensaios realizados na dissertação de mestrado de Azevedo (2001) e nos ensaios que foram realizados no presente estudo.

Tabela 15: Classificação das adições minerais nos ensaios realizados, em relação ao concreto referência.

Concreto	Resistência à compressão	Absorção de água	Permeabilidade método de Figg	Profundidade de carbonatação
C. Cinza de casca de arroz	Pior	Pior	Pior	Pior
C. Escória de aciaria LD	Semelhante	Pior	Pior	Pior
C. Sílica ativa	Melhor	Melhor	Melhor	Pior

• REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT_____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT_____. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de-prova cilíndricos de concreto. Rio Janeiro, 1980.

ABNT_____. **NBR 9479**: Câmaras úmidas para a cura de corpos-de-prova de cimento e concreto. NBR 9479. Rio de Janeiros 1986.

ABNT_____. **NBR 7223**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT_____. **NBR 9978**: Argamassa e concreto endurecidos e determinação da absorção de água por imersão-índice de vazios e massa especifica. Rio de Janeiro, 1987.

Alves, J.D. **Materiais de construção**. 8 ed., Goiânia, ED. da Universidade Federal de Goiás, 2006.

ANDRADE, C. **Manual para diagnostico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Trad. de Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, nov. 1992.

AZEVEDO, C. S. **Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão da armadura do concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2001.

BAUER, E. **Avaliação da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CATHER, F. et al. **Improvements to the permeability of determining the air permeability of concrete. Magazine of concrete Research.** V.36, n 129. P241-245, 1984.

COOK, D. Produtiion of cements based on rice ash. In: International Conference on Development Low-cost & Energy Saving Construction Materials, 1984, Rio de Janeiro. **Proceedings**. Rio de Janeiro, p 1-20, 1984.

FIGG, J.W. Methods of measuring the air and water permeability in cooncrete. **Magazine of Concrete Research**. V.25, No 85, p.213-219, 1973.

FIGUEIREDO, E. J. P., **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**, Tese de Doutorado, USP, 1994.

GEYER, R.T.; PAUSA, R.R.; RODRIGUES, S.S.; VIANNA, W.D. Avaliação da durabilidade do concreto com adição de escória de aciaria através do estudo de viga de concreto armado. In: 41° reunião do IBRACON, Salvador, 1999. **Anais**. Salvador, 1999.

LIBORIO, J. B. L.; SILVA, I. J.; MELO, A. B.; AMARAL, C. K**. Influênc a de algumas sillcas atJva na reslstêncla à compressão de concretos de alto desempenho - CAD**. In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural-JUBILEO - Prof. Julio Ricaldoni, 2000. Uruguai, p1-7.

MALHOTRA V. M. Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho. **Revista Téchne**. Trad. Leonardo Goy e Paulo Eduardo F. de Campos, No 36, p.36-43, 1998.

MONTEIRO, E.C B.; PIMENTEL, H.; BENICIO, A.; HELENE, P. R. L. Estudo da influência do tipo de cimento em relação à frente de penetração dos íons cloretos. In:

V Congresso IBEROAMERICANO de Patologia das Construções e VII Congresso de Controle de Qualidade, 1., Montevideo, 1999. **Anais**. Montevideo, 1999. p.288-304.

MEHTA, P. K. **Rice husk-ash - A unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) Advances in Concrete Technology, Ottawa, Energy Mines and Resources, 1992, p. 407-432.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3ª edição. São Paulo, Ed. IBRACON, 2008. 674p.

MELGAREJO, G. A. & DAL MOLIN, D.C.C. Avaliação do efeito da adição de sílica ativa no desempenho do concreto como proteção da armadura contra a corrosão em presença de cloretos. In: 42º reunião do IBRACON, Fortaleza, 2000. **Anais**. Fortaleza, 2000.

NEVILLE, A.M. **Propriedade do concreto**. Trad. de Salvador E. Giammusso. 2 ed. rev. e atual. São Paulo, Pini, 1997.

REGO, J. H. S. **Viabilidade da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como adição mineral ao cimento**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2001.

RILEM - RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS. CPC 18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, s. n.,p.453-55, 1988. (RILEM Recommendation CPC-18).

VIEIRA, F. M.P. **Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de micros sílica.** Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia. UFRGS.