



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TAIZA NAIANA DA SILVA FERREIRA**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DO CONCRETO  
BRANCO COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS.**

**Belém  
2014**

**TAIZA NAIANA DA SILVA FERREIRA**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DO CONCRETO  
BRANCO COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isaura Nazaré Lobato Paes.

**Belém**

**2014**

**TAIZA NAIANA DA SILVA FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA  
DURABILIDADE DO CONCRETO BRANCO COM ADIÇÕES  
POZOLÂNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do  
Pará como requisito parcial exigido pelo Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC para a  
obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil

Orientador. Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isaura Nazaré Lobato Paes.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**Banca Examinadora:**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isaura Nazaré Lobato Paes  
Orientadora - UFPa

Prof. Dr. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira  
Examinador externo - UnB

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima de Souza  
Examinador Externo - UFPa

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Examinador Interno - UFPa

Belém  
2014

“Se eu fui capaz de ver mais longe é porque  
estava de pé em ombros de gigantes.”

(Sir Isaac Newton)

A Deus.  
Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus o maior Engenheiro do universo, que me guiou e amparou em todos os momentos difíceis me fortalecendo e não permitindo que eu desistisse, pois proporcionou a todos nós inteligência, racionalismo e fé, sem os quais nada disso poderia ter sido feito.

Aos meus pais José Arlindo e Jurema Ferreira, por todo o carinho, dedicação e por está sempre ao meu lado, pois deram um grande apoio e se fizeram presentes em todos os momentos de minha vida.

A professora Isaura Nazaré Lobato Paes pela orientação e pela disposição para me direcionar ao longo desta pesquisa e em todos os momentos que precisei.

Ao professor Paulo Sérgio Lima de Souza, pelo apoio e inestimável contribuição para o desenvolvimento desse trabalho.

A todo o corpo docente, pela competência, companheirismo e apoio constante na orientação e construção do êxito no mestrado.

A minha Avó Maria Judith, por todo o carinho e por compreender minha ausência em alguns momentos.

A minha sobrinha Laura Rafaelly, anjinho que Deus colocou em minha vida, para tornar meus dias mais alegres, e que mesmo com muita saudade quando me ausentava, aceitava minha falta esperando estar de novo comigo.

A minha irmã Taiana Ferreira, por estar presente em muitos momentos e confortando quando a falta da família era muito intensa.

Às amigas do PPGEK Kátia Rosário, Gisele Almeida, pela valorosa amizade e contribuição na realização deste trabalho e outras pesquisas relevantes e por estarem sempre dispostos a me ajudar, a colaborar, seja em trabalhos práticos, como na realização dos ensaios, seja com palavras de incentivo, sempre oportunas e nos momentos certos.

Ao meu amigo e irmão João Alex Garcia, que Deus colocou na minha vida no momento certo, já sabendo as atribuições que eu iria passar e que não haveria pessoa mais indicada para me ajudar a superar tais problemas.

Ao corpo administrativo, pela colaboração e assistência durante esses cinco anos, em especialmente à dona Cleide que sempre se disponibiliza a ajudar quando precisamos de seu auxílio.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil, em especial ao Sr. "Maneca", pela ajuda indispensável durante toda a etapa de realização dos ensaios laboratoriais desta pesquisa e de outros trabalhos das disciplinas do mestrado.

À Marly incansável na organização do LEC e LEMAC, deixando tudo sempre pronto para que pudesse ser utilizado da melhor forma possível

A minha grande amiga e colega do meu antigo trabalho na Universidade Estadual do Pará (UEPa) , Ângela Prazeres que teve participação importantíssima nessa etapa da minha vida, pois sempre me incentivou, por meio de palavras de apoio e conselhos.

Aos amigos do Instituto Federal do Pará (IFPa) Harry Kinsey, Bruno Silva e Elias Mota, que na ausência da família, estiveram presentes e sempre ajudaram no que era preciso quando morava na cidade de Altamira.

Aos alunos do PET Gabriela, João e Emanuelle pela contribuição e ajuda na preparação dos CP's ensaiados na pesquisa.

A todos os colegas e amigos que a participaram, direta e indiretamente na construção desse trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem a finalidade de verificar o comportamento do concreto de cimento Portland Branco com adição de metacaulim e sílica ativa, avaliando o comportamento mecânico, a absorção de água e o nível de porosidade e durabilidade em concretos com este aglomerante.

Para isso, foram realizados ensaios no estado plástico (consistência e massa específica) e endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, penetração de cloretos e carbonatação).

Foram realizadas avaliações de sua resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral nas idades de 7 e 28 dias através do método IPT/EPUSP que utiliza os traços 1:5, 1:3,5 e 1:6,5. O módulo de elasticidade aos 28 dias. Além destes foi avaliada a permeabilidade por meio de ensaio de absorção; durabilidade através do ensaio acelerado de cloretos e da carbonatação; a porosidade foi verificada com a realização da microscopia eletrônica de varredura.

De maneira geral, verificou-se que mesmo a resistência dos concretos de menor proporção agregado/aglomerante (traço pobre), está acima das resistências mais usuais na região metropolitana de Belém que é em torno de 25 a 30 MPa, visto que o cimento branco utilizado é o estrutural, por isso, justifica-se o alcance destes valores mesmo com traço pobre.

Com relação à permeabilidade, os resultados demonstraram que assim como a resistência, esta é dependente do tipo de cimento empregado e das adições utilizadas. Os valores mais elevados de permeabilidade foram obtidos nos concretos referência (sem adição).

Para estudar a porosidade viu-se que concreto referência apresenta-se menos compacto e com mais poros perceptíveis, principalmente os com maiores proporções agregado/aglomerante. Já nas micrografias dos concretos CMT e CSA, é possível observar uma menor quantidade de poros na região ocupada pela pasta

Por fim, foi feita uma comparação das propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e porosidade do Cimento Portland Branco (CPB).

**Palavras-Chave:** *Cimento Portland Branco, Resistência, durabilidade.*



## ABSTRACT

The present work aims at investigating the behavior of White Portland cement concrete with addition of metakaolin and silica fume , evaluating the mechanical behavior , the behavior regarding water absorption and porosity level and durability in concrete with this binder.

For this purpose, assays were performed in plastic state ( consistency and density ) and hardened ( compressive strength , diametral tensile strength by , modulus of elasticity, water absorption, carbonation and penetration of chloride ) . Reviews of its compressive strength and tensile strength at the ages of 7 and 28 days by IPT / EPUSP method that uses traces 1:5 , 1:3.5 and 1:6,5 were performed .

The modulus of elasticity at 28 days . Besides these permeability was evaluated by absorption test ; through accelerated durability testing of chlorides and carbonation , porosity was verified by carrying out the scanning electron microscopy.

In general , it was found that even the resistance of concrete with the lowest aggregate / binder ( poor trait ) , the proportion is above the more usual resistance in the metropolitan region of Belém which is around 25-30 MPa , whereas white cement used is structural , so it is justified to reach these values even with poor trait.

With regard to permeability, the results demonstrated that as resistance , this is dependent on the type of cement used and the additions used. The highest permeability values were obtained in specific reference ( without addition) .

To study the porosity was seen that concrete reference presents more compact and less noticeable pores , especially those with higher aggregate / binder ratios . Already in the micrographs of CMT concrete and CSA , you can see a smaller amount of pores in the region occupied by folder

Finally, a comparison was made of the mechanical properties , water absorption capacity and porosity of white Portland cement (CPB) .

Keywords : White Portland Cement , Strength, durability .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Deslocamento de revestimento cerâmico na fachada.....	18
Figura 2.1-	Exterior do museu Iberê Camargo em Porto Alegre.....	26
Figura 2.2-	Interior do museu Iberê Camargo em Porto Alegre.....	26
Figura 2.3-	Principais manifestações patológicas na Amazônia.....	29
Figura 2.4-	Diagrama de Pourbaix do ferro a 25° C.....	32
Figura 2.5-	Modelo de vida útil da armadura frente a corrosão .....	33
Figura 2.6-	Representação um poro no transporte de umidade.....	38
Figura 2.7-	Moléculas adsorvidas.....	40
Figura 2.8-	Condição de absorção dos materiais.....	40
Figura 2.9-	Transporte de água unidirecional.....	45
Figura 2.10-	Esquema do processo de carbonatação.....	53
Figura 2.11-	Aparência do CPB utilizado na pesquisa.....	57
Figura 3.1-	Fluxograma das variáveis envolvidas na pesquisa.....	61
Figura 3.2-	Determinação de abatimento de tronco de cone.....	70
Figura 3.3-	Aparência de corpos de prova de CPB.....	70
Figura 3.4-	Ruptura dos CPs no ensaio de resistência à compressão.....	71
Figura 3.5-	Ruptura por fendilhamento no ensaio de resistência à tração...	72
Figura 3.6-	Determinação do módulo de elasticidade .....	72
Figura 3.7-	Realização do ensaio de absorção de água.....	73
Figura 3.8-	Preparação dos CPs para o ensaio de cloretos.....	74
Figura 3.9-	Método acelerado acelerado de penetração de cloretos.....	75
Figura 3.10-	Imagem das etapas do ensaio de cloretos.....	76
Figura 3.11-	Imagem da câmara de carbonatação utilizada nos ensaios.....	77
Figura 4.1-	Valores de massa específica nas idades de 28 dias.....	80
Figura 4.2-	Valores de resistência à compressão do concreto referência....	82
Figura 4.3-	Resistência à compressão do concreto com metacaulim.....	82
Figura 4.4-	Resistência à compressão do concreto com sílica ativa.....	83
Figura 4.5-	Gráfico sumarizando os resultados de resistncia à compressão	83
Figura 4.6-	Efeito da variável “adição” na resistência à compressão.....	86
Figura 4.7-	Resistência à tração por c. diametral do concreto referência....	88

Figura 4.8-	Resistência à tração por c. diametral do concreto CMT.....	88
Figura 4.9-	Resistência à tração por c. diametral do concreto CSA.....	89
Figura 4.10-	Gráfico resumando os resultados de resistência à tração.....	89
Figura 4.11-	Efeito da variável “adição” na resistência à tração.....	90
Figura 4.12-	Valores para a o módulo de elasticidade dos concretos.....	92
Figura 4.13-	Comparação dos módulos de elasticidade dos concretos.....	93
Figura 4.14-	Influência da variável “adição” no módulo de elasticidade	94
Figura 4.15-	Absorção capilar do concreto referência aos 28 dias.....	96
Figura 4.16-	Absorção capilar do concreto com metacaulim aos 28 dias.....	97
Figura 4.17-	Absorção capilar do concreto com sílica aos 28 dias.....	97
Figura 4.18-	Influência da variável “adição” na absorção capilar.....	98
Figura 4.19-	Valores de penetração de cloretos no concreto referência.....	101
Figura 4.20-	Penetração de cloretos no concreto com metacaulim.....	101
Figura 4.21-	Penetração de cloretos no concreto com sílica ativa.....	102
Figura 4.22-	Gráfico resumando os resultados de penetração de cloretos..	102
Figura 4.23-	Influência da variável “adição” na penetração de cloretos.....	103
Figura 4.24-	Carbonatação do concreto referência em 42 dias.....	106
Figura 4.25-	Carbonatação do concreto com metacaulim em 42 dias.....	106
Figura 4.26-	Carbonatação do concreto com sílica ativa em 42 dias.....	107
Figura 4.27-	Aparência dos CPs após o ensaio de carbonatação.....	108
Figura 4.28-	Influência da variável “adição” na carbonatação.....	109
Figura 4.29-	Influência da variável “idade” na carbonatação	110
Figura 4.30-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CR 1:5.....	112
Figura 4.31-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CR 1:3,5	112
Figura 4.32-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CR 1:6,5.	112
Figura 4.33-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CMT 1:5	113
Figura 4.34-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CMT 1:3,5	113
Figura 4.35-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CMT 1:6,5	113
Figura 4.36-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CSA 1:5	114
Figura 4.37-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CSA 1:3,5	114
Figura 4.38-	Microscopia Eletrônica de Varredura e espectro do CSA 1:6,5	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos.....	23
Tabela 2.2-	Classificação dos cimentos brancos fabricados no Brasil.....	24
Tabela 2.3-	Permeabilidade em função do volume de vazios.....	47
Tabela 2.4-	Principais compostos do cimento branco.....	55
Tabela 3.1-	Determinação da quantidade de CPs para cada ensaio.....	60
Tabela 3.2	Características físicas e mecânicas do CPB estrutural.....	62
Tabela 3.3-	Composição química do CBP estrutural segundo a NBR.....	62
Tabela 3.4 -	Características da areia utilizada na pesquisa.....	63
Tabela 3.5-	Características do seixo utilizado na pesquisa.....	64
Tabela 3.6-	Características do ensaio à brasão los Angeles do seixo.....	64
Tabela 3.7-	Caracterização química e física do metacaulim.....	65
Tabela 3.8--	Caracterização química e física da sílica ativa.....	66
Tabela 3.9-	Caracterização do aditivo superplastificante.....	66
Tabela 3.10-	Determinação do teor de argamassa do traço referência.....	68
Tabela 3.11-	Classificação do concreto quanto a penetração de cloretos...	75
Tabela 4.1-	Valores de índice de consistência e massa específica.....	79
Tabela 4.2-	Valores médios da resistência à compressão em 7 e 28 dias	81
Tabela 4.3-	Análise de variância da resistência à compressão axial.....	86
Tabela 4.4	Valores médios da resistência à tração por comp. diametral	87
Tabela 4.5-	Análise de variância da resist. à tração por comp. diametral	90
Tabela 4.6-	Valores do módulo de elasticidade aos 28 dias.....	92
Tabela 4.7-	Análise de variância do módulo de elasticidade.....	93
Tabela 4.8-	Valores de absorção encontrados aos 28 dias.....	96
Tabela 4.9-	Análise de variância da absorção capilar.....	98
Tabela 4.10-	Ensaio de penetração de cloretos nos concretos.....	100
Tabela 4.11-	Análise de variância da penetração de cloretos.....	103
Tabela 4.12-	Profundidade de carbonatação alcançada nos concretos.....	105
Tabela 4.13-	Análise de variância da carbonatação dos concretos.....	108

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- a/c** – Relação água-cimento
- ABNT**- Associação Brasileira de Normas Técnicas
- cm<sup>3</sup>** – Centímetro cúbico
- CP** – Corpo-de-prova.
- °C** – Graus Celsius
- CPB** – Cimento Portland Branco
- CR** – Concreto Referência
- CMT** – Concreto com adição de metacaulim
- CSA** – Concreto com adição de Sílica Ativa
- C<sub>2</sub>S** – Silicato dicálcico
- C<sub>3</sub>S** – Silicato tricálcico
- C<sub>3</sub>A** – Aluminato tricálcico
- C<sub>4</sub>AF** - Ferroaluminato tetracálcico
- C-S-H** - Silicato de Cálcio Hidratado
- CO<sup>2</sup>**. Gás Carbônico
- dm<sup>3</sup>** – Decímetro cúbico
- DMC** – Dimensão máxima característica do agregado.
- EDS** - Espectrografia por Dispersão de Energia
- fc** – Resistência do concreto à compressão obtida em corpos de prova.
- ft** – Resistência do concreto à tração por compressão diametral.
- h** - altura
- I.P.T.** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- MEV**- Microscopia Eletrônica de Varredura
- MPa** – Mega Pascal
- NBR**- Norma Brasileira Regulamentadora
- RAA**- Reação Álcali-Agregado
- %** – Percentual.
- γ**- Massa específica
- σ** - tensão superficial

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	Considerações iniciais.....	17
1.2	Justificativa.....	20
1.3	Considerações iniciais.....	20
1.4	Estrutura da pesquisa.....	20
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1	Cimentos Branco sua aplicação para a produção de concreto branco aparente.....	22
2.2	Corrosão de armaduras.....	28
2.3	Corrosão de armaduras no concreto armado.....	30
2.3.1	Fases de processo de corrosão.....	32
2.3.2	Corrosão por efeito de cloretos no concreto armado.....	34
2.3	Teores limites para a despassivação da armadura.....	37
2.4	Mecanismos de transporte de cloretos no concreto.....	38
2.4.1	Absorção capilar.....	39
2.4.2	Difusão.....	41
2.4.2.1	Tipos de difusão. ....	43
2.4.2.2	Mecanismos de difusão.....	43
2.4.2.3	Fatores que favorecem a difusão.....	44
2.4.2.4	Fatores que dificultam a difusão.....	44
2.4.3	Permeabilidade.....	45
2.4.4	Migração iônica.....	47
2.5	Fatores que influenciam a penetração de cloretos.....	48
2.5.1	Relação a/c .....	48
2.5.2	Composição química do cimento.....	49

2.5.3	Carbonatação.....	49
2.5.4	Temperatura.....	50
2.5.5	Fissuras.....	50
2.6	Mecanismos da carbonatação.....	53
2.7	Resistência mecânica.....	54
2.8	Zona de Transição do concreto branco.....	57
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
3.1	Considerações iniciais.....	59
3.2	Definição do programa experimental.....	60
3.2.1	Fluxograma das etapas envolvidas na pesquisa.....	61
3.2.2	Caracterização do material.....	61
3.2.2.1	Cimento.....	62
3.2.2.2	Areia.....	63
3.2.2.3	Seixo.....	63
3.2.2.4	Adições minerais.....	65
3.2.2.4	Aditivo.....	66
3.2.2.5	Água.....	67
3.3	Planejamento dos experimentos.....	67
3.3.1	Dosagem.....	67
3.3.2	Determinação do teor de argamassa.....	67
3.3.3	Determinação do teor de aditivo.....	69
3.4	Avaliações no concreto no estado plástico.....	70
3.5	Ensaio de propriedades mecânicas.....	71
3.5.1	Resistência à compressão axial.....	71
3.5.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	71
3.5.3	Módulo de Elasticidade.....	72
3.6	Avaliação da durabilidade dos concretos.....	73
3.6.1	Absorção de água.....	73
3.6.2	Ensaio acelerado de penetração de cloretos.....	73
3.6.3	Ensaio acelerado de carbonatação.....	76
3.7	Caracterização da microestrutura porosa do concreto branco.....	77
3.7.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V).....	77

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
4.1	Propriedades no concreto fresco.....	79
4.2	Propriedades no concreto endurecido.....	81
4.2.1	Ensaio Mecânicos.....	81
4.2.1.1	Ensaio de resistência à compressão axial.....	81
4.2.1.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	87
4.2.1.3	Módulo de Elasticidade.....	92
4.2.1.4	Relação entre resistência à compressão e o módulo.....	95
4.2.2	Ensaio de durabilidade.....	96
4.2.2.1	Absorção capilar.....	96
4.2.2.2	Penetração acelerada de íons cloretos.....	100
4.2.2.3	Carbonatação.....	104
4.2.3	Análise microestrutural.....	111
4.2.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	111
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>116</b>
5.1	Conclusões.....	116
5.1.1	No estado fresco.....	116
5.1.2	No estado endurecido.....	116
5.2	Propostas para pesquisas futuras.....	119
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>
7	Anexos.....	126



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1- Considerações Iniciais

Com a crescente busca de inovações na indústria da construção civil, tem-se a necessidade de se encontrar tecnologias que sejam úteis não só no quesito segurança, mas também quanto à parte econômica e estética. Ultimamente estão sendo inseridos na construção civil, vários processos que diminuem as etapas construtivas, com a finalidade de fornecer maior rapidez e economia à obra, a curto e médio prazo.

Neste sentido, em outros países como Estados Unidos e alguns da Europa, como França e Alemanha, já é bastante grande o uso do Cimento Portland Branco (CP B), devido este poder ser utilizado em concretos estruturais, pré-fabricados, artefatos de cimentos, painéis de fechamento, blocos de concreto, pisos e argamassas de revestimento. Além destes, este tipo de cimento permite a produção de concretos coloridos com a adição de pigmentos na cor desejada, o que o torna útil do ponto de vista estético (DEL BOSQUE *et al*, 2013).

A utilização do cimento branco no Brasil, também se encontra em crescente desenvolvimento, porém, ainda está se buscando base científica e tecnológica para sua correta produção e emprego, por meio de vários experimentos nas universidades e centros de pesquisas do país, em especial, nas regiões sul e sudeste.

Como exemplo de pesquisas com o uso deste material, pode-se citar os estudos de BARIN (2011) e PASSUELO (2004). Nestes, os pesquisadores relacionam as propriedades mecânicas do concreto branco com as do concreto cinza (tradicional), chegando a resultados integralmente favoráveis à utilização do concreto branco.

Uma das aplicações do concreto branco que mais tem sido objeto de estudos é sua utilização como acabamento final de fachada. Esta vertente ao uso do concreto branco tem sido motivada devido a constantes problemas de manifestações patológicas observadas nos revestimentos à base de argamassa. Nesta conjuntura, em especial na região metropolitana de Belém (PA), é comum encontrar revestimentos em argamassa, com acabamento final em cerâmica, com sérios problemas de descolamento da base.

A falta ou perda do desempenho do revestimento normalmente acarreta prejuízos econômicos importantes, muitas vezes afetando a integridade das construções, causando eventuais prejuízos a habitabilidade e ao conforto do usuário (ASHTEYAT *et al*, 2011). (VEIGA E GASTALDINI, 2012).

Recentemente têm sido relatados, em todo o Brasil, vários casos de manifestações patológicas em revestimentos de argamassa. Um dos problemas citado é apresentados na Figura 1.1.



Figura 1.1- Descolamento de revestimento cerâmico na fachada (Madeiro, 2012).

Desta forma, nos últimos anos vem crescendo, por parte da indústria da construção civil, a busca por um desenvolvimento tecnológico enfocando a obtenção de novos materiais e tecnologias com vistas a ganhos de qualidade nos seus produtos e a redução dos custos dos processos construtivos. Essas empresas construtoras estão procurando, com isso, atingir uma posição competitiva no mercado da construção civil (VEIGA E GASTALDINI, 2012).

Nesta vertente, o concreto branco é um dos elementos estruturais que vem num crescente de utilização na construção civil. Como consequência deste uso, também é um dos mais estudados a fim de se obter o conhecimento de suas características físicas, mecânicas e de durabilidade. Como, exemplo destas, cita-se as pesquisas de KIRCHHEIM (2003) que avaliou a penetração de cloretos em concreto com cimento branco com adição de escória de alto forno e a pesquisa de SIQUEIRA (2008) que considerou a carbonatação e a absorção capilar de água em concreto branco estrutural.

Desta forma, o presente trabalho se concentra na avaliação do concreto branco com relação as suas características mecânicas e de durabilidade e está inserido na linha de pesquisa de Construção Civil e Materiais do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Pará.

## **1.2. Justificativa**

Devido a constantes mudanças e avanços na tecnologia, procuram-se sempre produtos inovadores e com algumas vantagens sobre os outros. É com esse intuito busca-se inserir o cimento portland branco na produção de concretos, para tornar seu uso comum e a diminuição do preço deste material que é se comparado ao cimento cinza, mais elevado.

## **1.3 Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto branco estrutural com as adições pozolânicas de sílica ativa e metacaulim.

E como objetivos específicos têm-se:

- Concreto no estado plástico: comparação da consistência ( $90\pm 10$  mm) dos concretos estudados com os do estudo piloto e estudo massa específica;
- Concreto no estado endurecido (determinação da resistência à compressão axial; determinação da resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) e,
- Durabilidade dos concretos por meio dos ensaios de absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos e carbonatação.

## **1.4 . Estrutura da Pesquisa**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos que estão descritos a seguir: O primeiro apresenta as disposições preliminares sobre a necessidade e importância da pesquisa. O segundo é referente à revisão bibliográfica de trabalhos que trataram de assuntos referentes à esta dissertação relacionados à carbonatação e penetração de cloretos. O terceiro capítulo é o programa experimental, onde serão descrito todos os ensaios que serão feitos para determinar as características químicas e físicas do CP B.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados e análise estatística e serão feitas as discussões dos mesmos encontrados neste tipo de concreto tanto no estado fresco, quanto no endurecido. No quinto capítulo serão apresentadas conclusões dos resultados encontrados e propostas para trabalhos futuros. No sexto e último capítulo serão colocadas as referências utilizadas para dar base à pesquisa.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Cimentos Portland Branco e sua aplicação para a produção do concreto branco aparente**

A construção civil no Brasil está em processo de modernização, que inclui procedimentos rígidos, racionalização de atividades, redução de desperdícios e novos fornecedores e produtos com tecnologia avançada. Com isto os projetos arquitetônicos e de engenharia também passam por uma transformação.

Uma das conseqüências dessa situação é a entrada no mercado brasileiro do cimento branco. Este é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições específicas durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem do produto e na utilização do caulim no lugar da argila (PASSUELO, 2004).

O cimento branco é produzido pela pulverização de um clínquer de cimento Portland branco onde, por meio da diminuição do teor de óxido de ferro deste clínquer. Antes disponível apenas como não estrutural e usado na imensa maioria das vezes como rejunte, o novo cimento branco atende a todas as especificações técnicas do cimento cinza e por sua constante e alta alvura permite fidelidade na composição com agregados, pigmentos coloridos ou materiais como mármore e granito (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A quantidade de clínquer no cimento branco é, em geral, reduzida devido à substituição por fíler calcário em sua composição, o que contribui com a alvura do material, porém não contribui com as propriedades relacionadas à durabilidade. Diferentemente das pozolanas, o fíler não forma silicato de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) secundário com o passar do tempo, exercendo apenas um efeito físico na microestrutura do concreto de preenchimento dos poros, e com uma redução de material cimentício pela substituição de clínquer por fíler no CP B.

A finura dos aglomerantes afeta a velocidade de hidratação, trabalhabilidade, consistência, segregação, resistência, retração e a quantidade de ar incorporado.

Tal finura vai influenciar na velocidade de hidratação, porque a hidratação se inicia na superfície das partículas, logo a área total da superfície do cimento representa o material disponível para a hidratação. Terá influência também na evolução da resistência inicial, para isso, é preciso um cimento mais fino. Por fim, esta maior velocidade inicial resultará em um desprendimento maior do calor de hidratação.

A Tabela 2.1 demonstra as propriedades físicas do cimento portland branco em comparação ao CP IV.

Tabela 2.1- Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos (RIZZON e ANDRADE, 2007).

<b>Parâmetros</b>		<b>Unidade</b>	<b>CP B</b>	<b>CP IV</b>
Área específica Blaine		cm <sup>2</sup> /g	3271	5080
Início de pega		h:min	02:34	07:10
Fim de pega		h:min	04:17	–
Massa específica		g/cm <sup>3</sup>	2,99	2,82
Resistência mecânica (MPa)	3 dias	MPa	23,76	18,60
	7 dias	MPa	29,48	21,70
	28 dias	MPa	40,40	34,30

No Brasil o Cimento Portland Branco é regulamentado pela norma NBR 12989 (ABNT, 1993), sendo classificado em dois tipos: Cimento Portland Branco Estrutural e Cimento Portland Branco Não Estrutural, conforme apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2– Classificação dos Cimentos Portland Branco fabricados no Brasil.

Tipo de Cimento Portland	Código de identificação	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer Branco + Gesso	Material Carbonático	
Branco Estrutural	CPB-25 CPB-32 CPB-40	100-75	0-25	NBR 12989
Branco Não Estrutural	CPB	74-50	26-50	

Com o uso do cimento branco, pode-se produzir o concreto branco, este promove um acabamento diferenciado, dispensando as atividades de pintura e revestimento da edificação (fachada). De acordo com Kirchheim (2003), o concreto branco se adequa a obras de elevado prestígio e visibilidade, que se destaquem pelo seu valor estético e técnico. Este material é resistente e concilia funções de estrutura, revestimento e produto final. Além disto, possui elevada compacidade e homogeneidade das superfícies que garantem uma longevidade superior à obra.

Proporciona também a existência de ambientes muito refletivos, possibilitando a redução da necessidade de iluminação artificial e favorecendo a diminuição do desperdício de energia elétrica, ponto este muito importante para as questões de meio ambiente e sociedade. Nero e Nunes (2000) concordam que as possibilidades de funções para o concreto branco são voltadas para fins arquitetônicos, obras civis de grande porte, produtos pré-moldados, entre outros. É um material cujas possibilidades, em termos de aparência estética e capacidade estrutural, somente são atingidas quando se opta por uma adequada prescrição e controle de etapas fundamentais nas diferentes fases do processo, que se entendem da concepção à execução.



O Concreto Branco corresponde aos requisitos da arquitetura moderna em razão de poder assumir uma vasta gama de cores, através da utilização de pigmentos inorgânicos ou, em número mais restrito, pela simples utilização de inertes naturais selecionados. No Brasil, a utilização de concreto cromático se iniciou no ramo de peças pré-fabricadas, principalmente através dos pavimentos Intertravados de concreto colorido.

As obras em concretos cromáticos que têm se destacado são aquelas produzidas em cimento Portland branco estrutural sem que qualquer tipo de pigmento acrescentado à mistura, produzindo então um concreto de cor extremamente clara (concreto branco aparente).

Nesta esfera, arquitetos reconhecidos internacionalmente, entre eles Álvaro Siza, Santiago Calatrava e Richard Meyer, têm utilizado o concreto branco, definindo um estilo diferenciado em seus projetos arquitetônicos. Pode-se citar como projetos mais recentes destes arquitetos a construção do aeroporto “La Paloma”, em Sondika, e da Igreja “Dives in Misericórdia”, em Roma (Passuelo, 2004).

Atualmente vem crescendo muito as obras que empregam concreto aparente com cimento Portland branco, basta ver os conjuntos habitacionais, residências, escolas e prédios públicos executados no Brasil e no mundo. Pode-se citar o Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre-RS, iniciada em 2003, a obra mais importante em Concreto Branco atualmente em execução no Brasil. As Figuras 2.1 e 2.2 mostram a fachada e o interior desta edificação toda construída com este tipo de concreto.



Figura 2.1: O exterior (fachada) do museu Iberê Camargo, em Porto Alegre (Brasil).  
Fonte: <http://storio.deviantart.com>



Figura 2.2: O interior do museu Iberê Camargo, em Porto Alegre (Brasil). Fonte:  
<http://storio.deviantart.com>

Sabe-se que o uso do concreto branco aparente depende de cuidados especiais desde a escolha dos materiais até o perfeito planejamento da sua execução. Por outro lado, a grande quantidade de finos utilizada, necessária para dar bom

acabamento, acaba por fornecer a este concreto algumas características particulares importantes para sua durabilidade<sup>1</sup>.

Isaia e Helene (1993) destacam que a “durabilidade adquire especial importância quando enfocada sob o aspecto estrutural, tornando-se propriedade crítica se houver perda de desempenho que signifique tanto diminuição da segurança quanto redução da vida útil da construção”. Justificam que as conseqüências desta situação podem ser cruciais porque a segurança de uma estrutura envolve aspectos referentes à sobrevivência (proteção à vida) e à integridade (proteção à propriedade).

Neste sentido, nos últimos anos, diversos materiais foram investigados de forma a ser acrescentado ao proporcionamento do concreto, a fim de incrementar ainda mais as suas características de resistência e durabilidade. Como exemplo, pode-se citar o crescente desenvolvimento da indústria de aditivos químicos, a utilização de fibras com função estrutural e de combate à fissuração e, principalmente, o emprego de adições minerais com características pozolânicas<sup>2</sup>, como o metacaulim e a sílica ativa.

Cabe salientar que se por um lado, há um aumento expressivo na produção e uso de concretos com cimento branco; por outro, mesmo com diversos estudos já realizados, ainda existem lacunas no conhecimento de seu comportamento em serviço, especialmente em relação às formas de interação entre seus materiais constituintes (cimento, agregados, água e aditivos) ao longo da vida útil da edificação e diferentes condições de exposição.

---

<sup>1</sup> O CIB W80/RILEM 71-PSL (1983) conceitua durabilidade como “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às exigências dos usuários, em cada situação específica”.

<sup>2</sup> Pozolanas são consideradas rochas sedimentares de natureza ácida, contendo um elevado teor de sílica reativa (SiO<sub>2</sub>), capaz de reagir com o óxido de cálcio (CaO), dando origem a silicatos amorfos de carácter cimentante.

Entre as manifestações patológicas mais comuns observadas nas edificações executadas com concreto branco, as mais comuns são: corrosão; manchamento por micro-organismos; fissuras e trincas (LIMA, 2011).

Neste sentido, a corrosão de armaduras, assim como para o concreto com cimento Portland cinza, representa também grande preocupação no que se refere à durabilidade. Além da segurança estrutural, o efeito estético que a patologia provoca, em especial aquelas feitas com cimento Portland branco, é ainda mais sério, pois as manchas indesejáveis de ferrugem escorrendo nesses elementos causam um mal estar não só aos proprietários dessas obras, mas, sobretudo aos profissionais que tentam melhorar a aparência e o seu desempenho ao longo do tempo. Logo, estudos e pesquisas nesta área tornam-se de suma importância.

## **2.2 Corrosão de Armaduras**

A corrosão pode ser definida como a interação destrutiva ou a interação que implique inutilização de uso, de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica. Sendo a corrosão, normalmente, um processo espontâneo, há constantemente a transformação dos materiais metálicos de modo que durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins a que se destinam em decorrência da perda de suas qualidades essenciais, tais como, resistência mecânica, elasticidade e ductilidade (GENTIL, 2011).

A corrosão de armaduras é uma patologia de imensa gravidade, que afeta as obras civis em todo o mundo. O dano ao concreto resultante da corrosão da armadura manifesta-se sob a forma de expansão, fissuração e finalmente lascamento do revestimento. Além da perda do revestimento, uma peça de concreto pode sofrer dano estrutural devido à perda de aderência entre o aço e o concreto e diminuição da área da seção transversal da armadura – às vezes a tal grau que o colapso da estrutura se torna inevitável (MEHTA, 2008).

Os altos custos globais envolvem tanto a perda de material deteriorado quanto à correção do problema, o comprometimento da estabilidade estrutural inerente ao

desenvolvimento do processo corrosivo e por fim, a elevada incidência e reincidência do fenômeno são alguns dos aspectos que fazem da corrosão das armaduras uma das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado deste final de século (CASCUDO, 2000).

No Brasil a situação é particularmente séria, tendo em vista suas principais cidades se situarem em regiões litorâneas, submetidas à ação extremamente agressiva da atmosfera marinha rica em cloretos. Por outro lado, cidades como São Paulo, Belo Horizonte e Brasília sofrem ação contundente do clima e de ambientes urbanos e/ou industriais. O que também acontece na região Amazônica e é potencializado pelo clima quente e úmido. A Figura 2.3 mostra as principais manifestações patológicas na região.

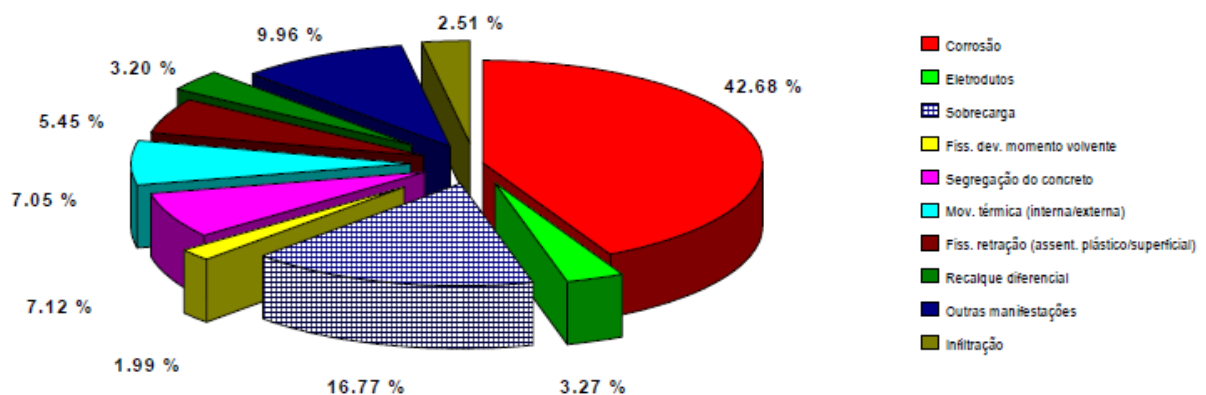


Figura 2.3- Principais manifestações patológicas em obras convencionais na Amazônia (ARANHA, 1994).

Uma questão pertinente a respeito da incidência da corrosão de armaduras indaga o porquê deste fenômeno ter uma ocorrência crescente e importante nesses últimos 10 a 15 anos, sendo relativamente despreocupante há 40 ou mais anos. A resposta pode ter vários argumentos; um deles se atém ao fato de que as construções do passado eram mais robustas e, portanto, as espessuras de cobertura mais elevadas propiciavam à estrutura de concreto um caráter muito mais protetor.

Com o passar do tempo, a evolução dos métodos de cálculo passou a conceber estruturas cada vez mais esbeltas e, na maioria dos casos, significativamente menos duráveis. Associado a isto não se pode ignorar que a agressividade ambiental

aumentou de forma relevante com o crescimento e a industrialização das cidades, favorecendo desta forma o encurtamento da vida útil das estruturas de concreto (CASCUDO, 2000).

Devido à relevância do tema muitos pesquisadores em nível nacional e internacional, tais como, Nepomuceno (1992), Helene (1992), Cascudo (1991), Bauer (1995), Page et al. (1981), Rasheeduzzafar (1990), Arya et al. (1990) e muitos outros, vêm se dedicando ao assunto visando o combate eficaz desta patologia.

### **2.3 Corrosão de Armaduras no Concreto Armado**

Os metais encontram-se na natureza, em geral, formando compostos (óxidos, sulfetos e etc.), com outros elementos. Para usa-los em sua forma elementar é preciso extrair o metal mediante um processo de redução, o que requer aplicar-lhes certa quantidade de energia. O processo inverso pelo qual o metal volta a seu estado natural vai acompanhado de sua redução de energia de GIBBS<sup>3</sup>, isto é, tem lugar através de uma reação espontânea. Este processo, que corresponde a uma oxidação, é conhecido por corrosão e representa a destruição paulatina do metal (ANDRADE, 1992).

A corrosão metálica quando tem lugar em meio aquoso é um fenômeno de caráter essencialmente eletroquímico, ou seja, supõe a existência de uma reação de oxidação e uma de redução e a circulação de íons através do eletrólito. O processo de corrosão é similar a uma pilha, que consiste de um ânodo, onde ocorre a oxidação eletroquímica (metal corrói), de um cátodo, onde ocorre a redução eletroquímica (metal não corrói), e de um eletrólito; que no caso do concreto é a solução existente nos seus poros (*Rosenberg* et al. citado por CASTANHEIRA, 1997).

---

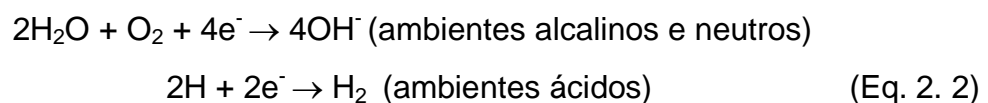
<sup>3</sup> O desencadeamento das reações de redução ou oxidação e sua estabilização dependem do nível de energia associada ao sistema, a energia livre de GIBBS tem relação com a entropia e a entalpia do sistema fornecendo, portanto, a medida de tal energia associada (ANDRADE, 1992).

A corrosão através do metal e do eletrólito entre ânodo e o cátodo pressupõe o funcionamento de um circuito fechado. Se o circuito se interromper em algum de seus pontos, a pilha não pode funcionar e a corrosão se detém.

Basicamente, a reação mais provável de ocorrer na região anódica é:



Dependendo da disponibilidade de oxigênio e do pH das regiões mais próximas, as reações catódicas mais prováveis são:



Segundo *Andrade e Felius* citados por BAUER (1995), sendo a corrosão aquosa um processo eletroquímico, os íons presentes intervêm de forma direta ou indireta no processo, sendo a reação de corrosão função do pH do meio. Como o potencial do processo de corrosão depende deste equilíbrio, pode-se estabelecer uma relação em função do pH, os quais são representados graficamente em diagramas E-pH, conhecidos como diagramas de Pourbaix.

Os diagramas de Pourbaix estabelecem para cada metal as condições de pH e potencial identificando regiões de corrosão, imunidade e passividade, conforme pode ser visto na Figura 2.4.

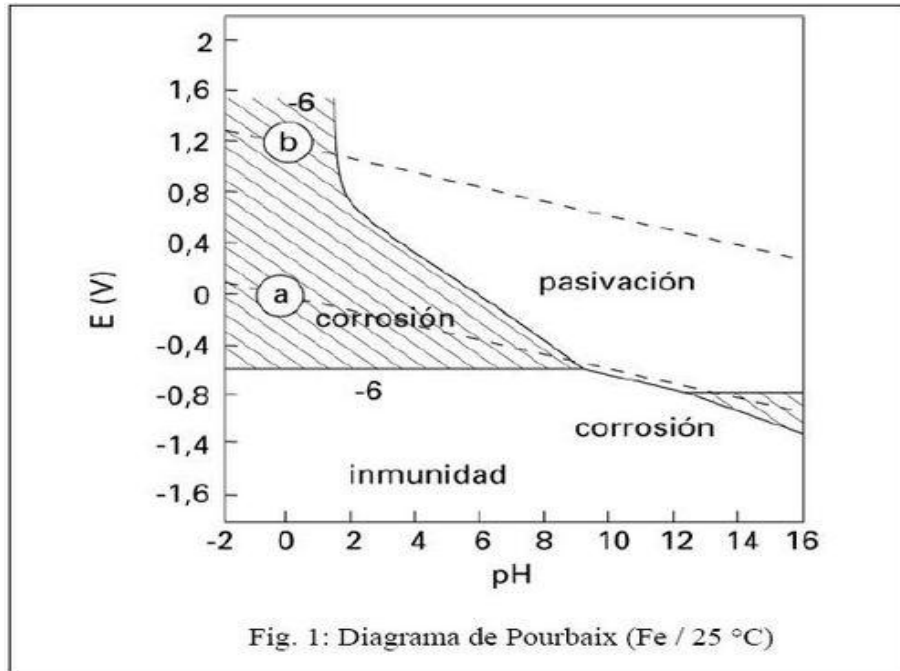


Figura 2.4-Diagrama potencial-pH para o ferro a 25°C (Pourbaix, citado por BAUER, 1995).

O estado de imunidade corresponde à região onde a corrosão é termodinamicamente desfavorável, ou seja, o metal é estável. A região definida como de “passividade” supõe que o metal se recobre de uma capa de óxidos, transparente, imperceptível e que atua como uma barreira impedindo a oxidação (fase estável). Na região de corrosão têm-se as combinações pH/potencial que indicam que os íons de metal são as fases instáveis.

### 2.3.1- Fases do Processo de Corrosão

O estudo e o acompanhamento da evolução da corrosão das armaduras são importantes para a avaliação da vida útil da armadura. São diversas as definições do que se entende por sua útil. Uma delas é aquela durante a qual a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigíveis (CASCUDO, 2000).

Sob este aspecto, a evolução cronológica do processo de corrosão das armaduras foi definida por Tuutti citado por BAUER (1995) em um modelo conceitual simplificado, o qual divide o período de vida útil em duas fases distintas: a de iniciação e a de propagação da corrosão. A Figura 2.5 mostra o modelo de Tuutti. Nela se representa em abcissas o tempo e em ordenadas o grau de deterioração.



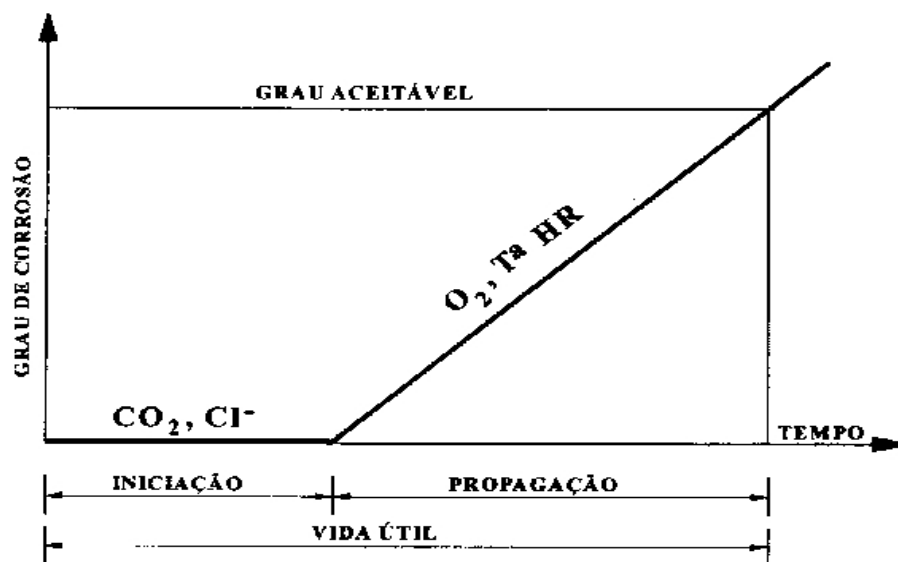


Figura 2.5- Modelo conceitual de vida útil da armadura frente à corrosão (Tuutti apud BAUER, 1995).

A fase de iniciação caracteriza-se por um baixo grau de corrosão; armadura passiva. A duração de tal fase é determinada pela velocidade com que a região de cobrimento é alterada, seja em nível de neutralização (pH) ou de concentração de substâncias agressivas, ou seja, é o tempo que demora o agente agressivo em atravessar o cobrimento, alcançar a armadura e provocar sua despassivação.

A fase de propagação tem a sua duração e velocidade de deterioração determinada por fatores influenciadores e controladores dos mecanismos de corrosão existentes. O período de propagação reduz a seção da armadura, provoca o aparecimento de fissuras no concreto; devido à expansão dos óxidos que se formam sobre a superfície do aço; acelerando o processo de deterioração da estrutura. No caso de ataque por cloretos, o período de propagação não é aceito como parte integrante da vida útil devido às incertezas geradas pela corrosão localizada (CASTANHEIRA, 1997).

As duas principais causas da dissolução da película passivadora formada sobre a superfície da armadura no concreto e a conseqüente iniciação da corrosão são: presença dos íons cloretos, adicionados ao concreto no momento da mistura ou proveniente do meio ambiente e, a diminuição do pH da solução aquosa dos poros

do concreto devido a carbonatação provocada pela reação dos produtos alcalinos do cimento com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera.

### **2.3.2 Corrosão por Efeito de Cloretos no Concreto Armado**

Os cloretos são um dos agentes agressivos mais extensivamente estudado e documentado na literatura como causador da corrosão da armadura do concreto. Em concentração suficiente eles podem romper a película protetora que envolve a armadura do concreto, causando corrosão (Arya et al., 1990). Estes íons podem ser introduzidos na estrutura de duas formas, sendo estas (BAUER, 1995):

Como *contaminantes dos materiais* empregados no momento da preparação do concreto, tais como, impurezas indesejadas nos agregados (brita e areia) e na água de amassamento, ou ainda com o uso de aceleradores de pega e endurecimento que contenham o  $\text{CaCl}$  provindos do *meio externo*, como por exemplo, através da atmosfera salina, água do mar, tanques industriais, sais anticongelantes (empregados nos invernos rigorosos de países frios), os quais penetram pela estrutura poroso do concreto podendo atingir a armadura.

Após atingir a armadura, os cloretos tendem a despассивá-la pela dissolução local e pontual da película passivadora, formada devido à elevada alcalinidade do meio resultante da hidratação do cimento. Os pites de corrosão propagam-se em pontos específicos da superfície do metal diminuindo o pH nestas regiões e aumentando o pH nas áreas catódicas o que diminui a possibilidade de novos ataques nestas regiões. Segundo *Treadaway* citado por BAUER (1995), a propagação dos pites na armadura depende:

Da disponibilidade de cloretos, que por sua vez depende:

Da concentração de cloretos no pite;

Da reciclagem de cloretos;

Da difusão de cloretos para o pite.

Da disponibilidade de íons hidroxilas, a qual é influenciada por:

Extensão de possível neutralização;

Taxa de hidrólise;

Composição do cimento e do concreto;

Utilização de adições ao cimento.

Segundo *Rosenberg* et al. e *González* et al apud CASTANHEIRA (1997), a pesar da estrutura do filme passivo e do mecanismo de despassivação por íons cloretos não serem totalmente compreendidos, acredita-se que os cloretos se incorporam ao filme passivo, substituindo parte do oxigênio e aumentando sua condutividade e sua solubilidade. Logo, o filme perde seu caráter de proteção e em conseqüência da grande diferença de potencial estabelecida, ele não pode ser mantido.

Presente nos concretos, os cloretos podem se apresentar de duas formas:

Cloretos livres: dissolvidos na fase aquosa do concreto na forma de íons na água dos poros (solução intersticial);

Cloretos fixos: quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas formando cloroaluminatos ou adsorvidos nas paredes dos poros através do C-S-H.

Conforme RASHEEDUZAFAR et al. (1990), normalmente os riscos de corrosão no concreto são expressos em termos de cloretos totais, ou seja, cloretos livres + cloretos fixos, em relação à massa do cimento. Porém, os cloretos fixos não são os que representam risco de corrosão e sim, a concentração de cloretos livres dissolvidos na fase aquosa do concreto que provoca a despassivação da armadura devido sua habilidade de destruir a camada passivadora, influenciando no processo de corrosão. Porém, é conveniente a determinação dos cloretos totais, pois parte dos cloretos fixos ou combinados podem vir a ficar disponíveis para reações deletérias devido a fenômenos tais como carbonatação ou elevação de temperatura (ANDRADE, 1992).

PAGE *et al.* citados por BAUER (1995) realizaram uma pesquisa na qual relacionaram os cloretos livres em função dos cloretos totais e encontraram uma relação linear a partir de certo teor de cloretos totais. Os referidos autores observaram que há um valor crítico no qual ocorre a máxima capacidade de fixação de cloretos pelos produtos de hidratação do cimento, onde teores acima deste valor implicam na presença de cloretos livres em solução.

A capacidade de fixação de cloretos está relacionada à fase  $C_3A$  do cimento, quer seja proveniente dos aluminatos do clínquer ou oriundos de adições, pois, na medida em que o  $C_3A$  se combina com os íons cloretos, formando o cloroaluminato insolúvel, diminuem o teor de cloretos livres.

Segundo BAUER (1995), a capacidade de fixação de cloretos, além de influenciar na relação entre cloretos livres e fixos, também ascende sobre a velocidade de ingresso de cloreto. PAGE *et al.* (1981), estudando a difusão de cloretos, encontraram coeficientes de difusão 2,23 vezes superior para o cimento resistente a sulfatos, ou seja, com baixo teor de  $C_3A$ , em relação ao cimento Portland comum além, de coeficientes superiores a 10,9 vezes para o cimento Portland comum em comparação ao cimento adicionado com escória.

Ainda com relação à capacidade de fixação de cloretos, através do uso de adições, BAUER (1995) constatou o efeito benéfico da adição de escória de alto-forno ao cimento. Cabe resaltar, que segundo o autor, a superior capacidade de fixação se restringe a relações água/cimento baixas (0,3 e 0,4), onde a duração da fase de iniciação é maior. O referido autor observou ainda, que neste caso, a capacidade de fixação não parece ser afetada pelos efeitos físicos decorrentes do emprego da escória (refinamento da porosidade).

Outro fator que exerce influência na capacidade de fixação de cloretos é o pH da fase aquosa pelas fases hidratadas. Segundo *Tritthard* e *Al-Gahtani* *et al.* citados por Bauer (1995), o que acontece é uma competição entre os íons cloreto e hidroxilas quanto à possibilidade de adsorção. Conforme os referidos autores, desde que todos

os espaços para a adsorção estejam ocupados, um aumento no teor de cloretos adsorvidos só é conseguido com a remoção de íons previamente fixados (hidroxilas). Para um teor total de cloretos, mais cloretos são adsorvidos desde que se tenha menos íons hidroxilas nos espaços de adsorção.

### **2.3.3 Teores Limites para a Despassivação da Armadura**

A determinação e avaliação do teor de cloretos livres consistem na preocupação do teor necessário a despassivação das armaduras. De acordo com *Hussain et al.* citados por LOPES (1999), embora haja diversos estudos que tentam relacionar o teor crítico do íon cloreto a partir da quantidade média dos cloretos totais no concreto, o que controla o início da corrosão é a relação entre cloretos e íons hidroxilas ( $[Cl^-]/[OH^-]$ ) na solução dos poros do concreto. A concentração crítica máxima de cloretos é um ponto bastante polêmico.

A norma brasileira NBR 6118 (2007), fixa a quantidade máxima de cloretos em 500 mg/l em relação à água de amassamento. A maioria das normas estrangeiras, no entanto, fixam teores de  $Cl^-$  em relação à massa de cimento (CASCUDO, 2000). *Hausmann* citado por CASCUDO (1997) sugere que a despassivação ocorre quando a relação  $[Cl^-]/[OH^-]$  na solução do poro excede 0,6, para pH entre 13,5 e 13,73. *Hussain et al.* citados por LOPES (1999) encontraram o valor crítico da relação  $[Cl^-]/[OH^-]$  variando entre 1,28 e 2 para um pH na solução dos poros entre 13,26 a 13,36.

A determinação de um valor crítico da relação  $[Cl^-]/[OH^-]$  depende de inúmeras variáveis tais como o tipo de cimento (teor de  $C_3A$ , teor de materiais pozolânicos, escória, etc), relação água/cimento, temperatura, umidade relativa do ar, pH da solução dos poros, conteúdo de água, proporção de cloretos solúveis (CASCUDO, 2000).

Como limite geral considera-se que 0,4%, em relação à massa de cimento, ou 0,05 a 0,1%, em relação ao peso de concreto, são quantidades suficientes de cloretos para despassivar a armadura. Ainda assim, segundo ANDRADE (1992), encontrou-se

armaduras corroídas em concretos com teores inferiores a esses limites, assim como, armaduras não corroídas com teores muito superiores em relação aos mesmos limites.

#### 2.4 Mecanismos de Transporte de Cloretos no Concreto

A importância de se compreender os mecanismos de transporte dos cloretos no concreto está vinculada ao fato de que a durabilidade deste material está intimamente relacionada com o ingresso e deslocamento de agentes agressivos em seu interior. Os cloretos ingressam na estrutura porosa do concreto em forma de solução, ou seja, os cloretos normalmente dissolvidos em água penetram no concreto, quer seja por mecanismos próprios de transporte de água (absorção capilar, permeabilidade), ou por outros mecanismos de ingresso, tais como, difusão e migração (BAUER, 1995). A representação de um poro sob pressão está disposta na Figura 2.6.

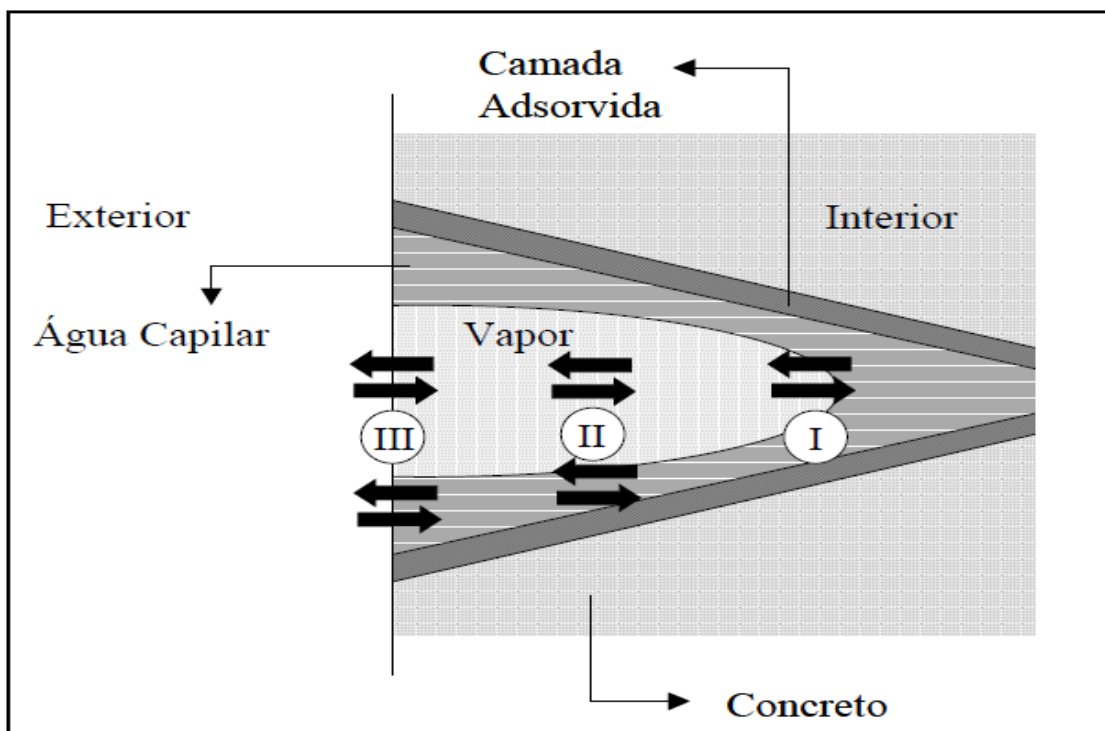


Figura 2.6- Representação de um poro sob processo de transporte de umidade (LARA, 2004)

O transporte não apenas dos cloretos, mas de outras substâncias dissolvidas, de líquidos em geral e de gases no interior do concreto, é decisivamente influenciado

pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Neste sentido, a interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta, e a distribuição dos tamanhos dos poros, constitui-se fatores de suma importância. A porosidade aberta possibilita o transporte das substâncias e caracteriza a permeabilidade da pasta; por sua vez, o tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte (CASCUDO, 2000).

A seguir estão algumas considerações inerentes aos mecanismos de transporte dos cloretos no concreto.

#### 2.4.1- Absorção Capilar

Segundo BAUER (1995), a absorção capilar ocorre quando há penetração de líquidos no concreto devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Os fatores que influenciam esse mecanismo são as características do líquido, tais como, viscosidade, densidade e tensão superficial; e as características do sólido poroso: estrutura do poro (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares), energia superficial e teor de umidade.

BAUER (1995) ressalta ainda a importância da estrutura de poros na determinação da absorção capilar, tanto na altura de água, como no volume de água adsorvida e velocidade de absorção. Quanto menores o diâmetro dos poros, maiores as pressões capilares e maiores a altura de ascensão capilar; inversamente, poros maiores têm alturas menores, mas volumes adsorvidos maiores.

Capacidade de um material succionar uma quantidade de água requerida para que este material passe da condição seca para a condição saturada ou parcialmente saturada. A absorção pode ser:

Absorção Higroscópica é a propriedade que possuem certos materiais de absorver água.

Absorção por Condensação também conhecida como liquefação, é uma das fases em que ocorre a transformação da matéria, do estado gasoso vapor para líquido.

Absorção Capilar é quando o processo de transporte atuante é o da penetração de água sob ação de uma pressão atmosférica normal, porque a ocupação dos vazios ocorre sem o estímulo de um gradiente de pressão aplicado (FONSECA, 2009). A Figura 2.7 mostra o de moléculas adsorvidas ao substrato.

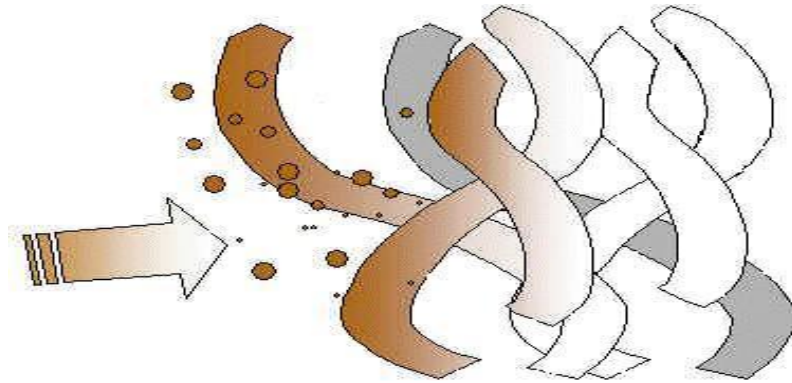


Figura 2.7- Moléculas adsorvidas ( BARIN, 2000)

Na prática, o comportamento é às vezes diferente do esperado em face de condições peculiares de intercomunicabilidade e tortuosidade dos poros. *Helene* citado por BAUER (1995) coloca que concretos de reduzida relação água/cimento apresentam capilares de menor diâmetro, ao mesmo tempo em que os mesmos são muito menos intercomunicáveis, resultando disso menores alturas de sucção e menores volumes absorvidos. A condição de de absorção dos materiais é demonstrado na Figura 2.8.

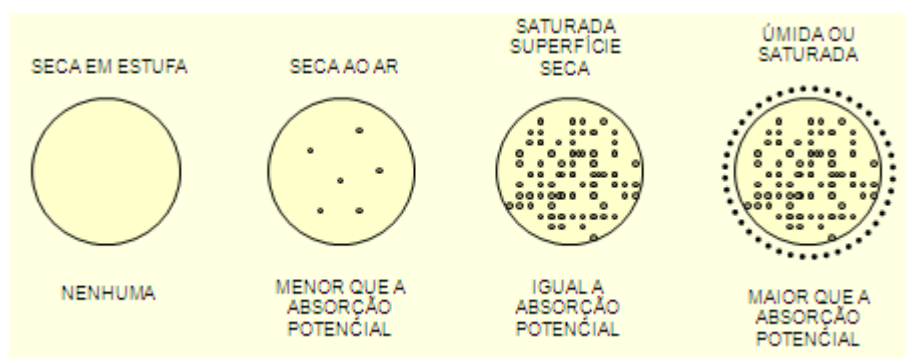


Figura 2.8-Condição de absorção dos materiais (FONSECA, 2009).

Ainda conforme *Helene* citado por BAUER (1995), a modelação da ascensão capilar pode ser feita segundo a “Lei de Jurin”, a saber:



$$H = (2 \cdot \gamma) / (r \cdot \gamma) \quad (\text{Eq.2.3})$$

Onde,

h: altura ou penetração de água no capilar [m];

v: tensão superficial [kg/m];

r: raio do capilar [m]

$\gamma$ : massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>]

A continuidade do processo de ingresso de cloretos, uma vez que se atinja o limite indicado pela Lei de Jurin, baseia-se em outros mecanismos, basicamente difusão e migração.

#### 2.4.2- Difusão

O fenômeno da difusão consiste no movimento de substâncias, devido à diferença de concentração; o fluxo da substância que difunde tende a igualar as concentrações. Estas diferenças nas concentrações de cloretos suscitam o movimento desses íons em busca de equilíbrio. A difusão iônica é o mecanismo de transporte predominante dos cloretos dentro do concreto, caso seja resguardada certa interconexão dos capilares e haja eletrólito (sem o que a difusão iônica não ocorre).

As diferenças nas concentrações podem ser um fator mais significativo sob a ótica da durabilidade das estruturas de concreto, uma vez que a difusão controla a penetração de íons cloreto e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no concreto, agentes agressivos que podem comprometer seriamente as armaduras. (LOPES, 1999)

O coeficiente de difusão (**D**) das substâncias que penetram nos poros do concreto é determinado a partir de modelagens numéricas que seguem as *Leis de Fick* da difusão. A primeira lei contempla a difusão no estado estacionário, ou seja, considera fluxo constante no tempo em toda a seção por onde passa a substância:

$$Q_s = D_{ef} \cdot [(\partial^2 c) / (\partial x^2)] \quad (\text{Eq.2.4})$$

Onde,

Qs: fluxo de íons;

Def: coeficiente efetivo de difusão;

$\partial C/\partial X$ : gradiente de concentração;

C: concentração de íons na solução;

X: profundidade considerada.

A segunda lei retrata a situação mais real, considera o fluxo variável com o tempo; situação não estacionária ou condição transitante; e com a profundidade de penetração:

$$\partial C/\partial t = D_{ef} * [(\partial^2 C)/(\partial^2 X)] \quad (\text{Eq.2.5})$$

A solução da equação 3.2 é expressa pela equação a seguir:

$$(C - C_0 / C_s - C_0) = 1 - [ \text{erf} (x/2\sqrt{D_{ef} * t}) ] \quad (\text{Eq.2.6})$$

Onde,

C: concentração na profundidade considerada;

C<sub>0</sub>: concentração inicial;

C<sub>s</sub>: concentração na superfície;

erf: função do erro de Gauss;

x: profundidade considerada

D<sub>ef</sub>: coeficiente efetivo de difusão;

t: tempo considerado.

Segundo *Helene* citado por LOPES (1999), a determinação do referido coeficiente depende de muitas variáveis, entre elas, porosidade, relação a/c, teor de cimento, composição do cimento, umidade relativa e temperatura.

#### 2.4.2.1 TIPOS DIFUSÃO

*Interdifusão ou difusão de impurezas:* ocorre quando os átomos de um metal difunde em outro. Nesse caso há variação na concentração e é o mais comum;

*Autodifusão:* ocorre em cristais puros, isto é, os átomos que trocam posições são do mesmo tipo . Nesse caso não há variação na concentração.

#### 2.4.2.2 MECANISMOS DE DIFUSÃO

Em redes cristalinas existem dois mecanismos principais:

- Mecanismo substitucional ou por lacunas;
- Mecanismo intersticial.

##### **a) Mecanismo de difusão substitucional ou por lacunas**

Quanto maior a temperatura do metal, maior o número de lacunas presentes e maior a energia térmica disponível, logo, a velocidade de difusão é maior a temperaturas mais elevadas.

Metais com temperaturas de fusão mais elevadas têm tendência a ter maiores energias de ligação entre os átomos.

Em soluções sólidas, a difusão também pode ocorrer pelo mecanismo de difusão por lacunas. A velocidade de difusão é afetada pelas diferenças de tamanho atômico e de energias de ligação entre os átomos.

##### **b) Mecanismos de difusão intersticial**

Em redes cristalinas: ocorre difusão intersticial quando os átomos se movem de um interstício para outro vizinho, sem provocarem deslocamentos permanentes dos átomos da rede cristalina da matriz

Para que o mecanismo de difusão intersticial tenha lugar, é necessário que os átomos que se difundem sejam relativamente pequenos quando comparados com os átomos da matriz.

Átomos pequenos, tais como o hidrogênio, o oxigênio e o carbono, podem difundir-se intersticialmente nas redes cristalinas de alguns metais.

Na difusão intersticial do carbono no ferro, os átomos de carbono, ao entrarem ou saírem dos interstícios, têm de "abrir caminho" entre os átomos de ferro da matriz (SOUZA, 2009).

#### **2.4.2.3 Fatores que favorecem a difusão**

- Baixo empacotamento atômico
- Ligações fracas (Van der Waals)
- Presença de imperfeições

#### **2.4.2.4 Fatores que dificultam a difusão**

- Alto empacotamento atômico
- Ligações fortes (iônica e covalentes)
- Alta qualidade cristalina

Cascudo 1997, disse que a difusibilidade iônica acontece mediante a gradientes de concentração iônica, quer entre o meio externo e o interior do concreto, quer dentro do próprio concreto. Os poros capilares maiores, parcialmente saturados, agem como grandes canais de transporte de CO<sub>2</sub>. Estes canais maiores se comunicam com canais menores cheios de solução e retardam o processo de difusão.

A difusão de CO<sub>2</sub> através da água é quatro vezes menor que a difusão no ar. O CO<sub>2</sub>, os íons cloretos e o oxigênio penetram no concreto através do mecanismo da difusão, o que significa dizer que este processo de transporte é muito importante para esta pesquisa e para o estudo de patologias em estruturas de concreto armado, pois é a união de todos os agentes que resulta na corrosão de armaduras, antecedida pelo processo de carbonatação (NEVILLE, 1997 apud BARIN, 2008).

O transporte de massa, em materiais de construção, ocorre com mais frequência quando expostos à água no estado líquido segundo três condições, a saber (HALL, 1989 apud RICHARDSON, 2007):

- a) Fluxo de massa horizontal, com o transporte de água independente da ação da gravidade;
- b) Fluxo de massa vertical, com o transporte de água total resultante da adição das forças gravitacional e capilar;
- c) Fluxo de massa vertical, com o transporte total resultante da ação das forças gravitacional e capilar, porém, com os efeitos da absorção capilar e da gravidade em sentidos opostos.

O transporte de água unidirecional em uma amostra de material poroso está detalhado na Figura 2.9.

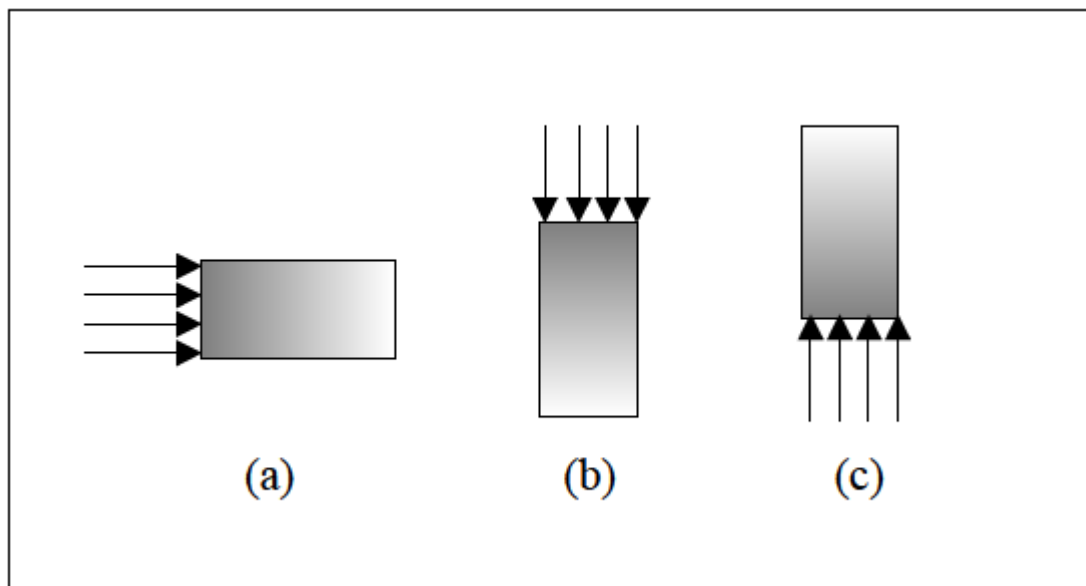


Figura 2.9 – Transporte de água unidirecional em uma amostra de material poroso, conforme as condições (a), (b) e (c) definidas acima (HALL, 1989 apud LARA, 2003).

### 2.2.2.3- Permeabilidade

NEVILLE (1997) comenta que a permeabilidade, em termos genéricos, pode ser definida como a maior ou menor facilidade de um fluido escoar através de um meio poroso.

Com relação ao concreto, o ingresso de cloretos ocorre na forma dissolvida, geralmente em água. A estrutura da pasta de cimento, o agregado e a interface

pasta-agregado determinam a facilidade com que fluidos, líquidos e gasosos, penetram e se deslocam pelo material, sob os mais diferentes gradientes de pressão. Também é válido ressaltar, que a permeabilidade é função principalmente das dimensões, tortuosidade e continuidade dos poros da matriz da pasta de cimento.

A permeabilidade do concreto depende do tamanho, distribuição e continuidade dos poros da pasta, da permeabilidade dos agregados, da zona de transição, do lançamento, adensamento e cura, ou seja, de todos os materiais e procedimentos de preparação do concreto.

Os tipos de poros que podem existir no concreto são poros de gel, capilar (na pasta) e os poros de ar. Esses que em geral são grandes, são obtidos através de defeitos de execução do concreto. O tamanho da maioria dos íons e moléculas de gás, danosos ao concreto, são menores que os poros de gel.

Segundo Silva 2005, os poros capilares e os poros de ar são o mais importantes para a durabilidade. Diz ainda que permeabilidade é mais afetada pelo número e dimensões dos poros grandes, que pelos poros pequenos.

Teoricamente, a inclusão de agregados de baixa permeabilidade numa pasta de cimento tenderia a diminuir a permeabilidade do sistema, principalmente pasta de alta relação a/c, em baixa idade, quando a porosidade capilar é alta porque as partículas de agregados deveriam interceptar os canais de fluxo dentro da matriz. Comparada à pasta de cimento pura, argamassa ou concreto com a mesma relação a/c e mesmo grau de maturidade, deveriam dar, portanto, um coeficiente de permeabilidade mais baixa. Na Tabela 2.3 pode-se verificar a permeabilidade em função do volume de vazios.

Tabela 2.3 – Permeabilidade em função do volume de vazios  
(POWERS, 1958 apud REGATTIERI, 1999).

Idade (dias)	Porosidade (%)	Coefficiente de Permeabilidade (cm/s x 10 <sup>12</sup> )
Estado fresco	67	1.150.000.000
1	63 <sup>(*)</sup>	36.300.000 <sup>(*)</sup>
2	60 <sup>(*)</sup>	2.050.000 <sup>(*)</sup>
3	57 <sup>(*)</sup>	191.000 <sup>(*)</sup>
4	55 <sup>(*)</sup>	23.000
5	53	5.900
7	52	1.380
12	51	195
24	48	46

*Uchikawa* citado por LOPES (1999) comenta que a permeabilidade aumenta exponencialmente com o aumento da relação a/c e cai abruptamente com o progresso da hidratação e com a idade.

Este coeficiente segue a Lei de Darcy para um fluxo laminar, estacionário e não-turbulento através de um meio poroso, e é obtido pela expressão a seguir:

$$Dq/dt = K * (\Delta H * A / L * \mu) \quad (\text{Eq.2.7})$$

Onde,

Dq/dt: velocidade de escoamento da água;

K: coeficiente de permeabilidade do fluido;

$\Delta H$ : gradiente de pressão;

L: espessura do elemento;

$\mu$ : viscosidade do fluido.

#### 2.4.4- Migração iônica

Esse mecanismo de transporte no concreto ocorre quando existe ocorrência de um campo elétrico. O campo elétrico pode se originar dos fenômenos de polarização concernentes aos processos de corrosão de armaduras, e, em maior escala, podem ser oriundos de dispositivos de proteção catódica, ou de correntes erráticas, ou

seja, correntes de fuga (BAUER, 1997). Sendo os íons cloretos com carga elétrica negativa, é de se esperar que a ação de campos elétricos promova uma migração iônica.

Em resumo pode-se afirmar que na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos cloretos presentes no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica. A absorção ocorre numa escala superficial do concreto, geralmente onde ocorre molhagem e secagem do revestimento pela ação das intempéries; mais para o interior do concreto onde a presença do eletrólito é mais constante, tem-se basicamente a difusão.

## **2.5 Fatores que influenciam a penetração de cloretos**

### 2.5.1- Relação água/cimento

A relação a/c é um dos parâmetros mais importantes em todo o contexto da corrosão com expressiva influência sobre a penetração de cloretos. Esta relação determina a qualidade do concreto, definindo as características de compactação ou porosidade da pasta de cimento endurecida. Uma baixa relação água/cimento retardará a difusão de cloretos, dióxido de carbono e oxigênio, além de dificultar a entrada de umidade e agentes agressivos para o interior do concreto.

Notadamente, diminuindo-se a relação água/cimento, tem-se uma redução no volume de poros e na permeabilidade, fatores estes tão intimamente ligados ao processo de corrosão. Outro ponto a ser considerado é com relação a resistência do concreto, já que esta pode prolongar o tempo de aparecimento de fissuras no concreto por tensões induzidas pela corrosão (CASCUDO, 1997).

Estudos realizados por *Mangat* e *Molloy* citados por Lopes (1999) sobre a influência da relação a/c na corrosão induzida por cloretos mostraram que esta é o fator dominante que controla a corrosão, e que a relação  $[Cl^-]/[OH^-]$  tem importância



secundária comparada à relação a/c; ainda segundo os autores, relações a/c menores que 0,45 são suficientes para proteger a armadura.

*Suzuki* et al. citados por Cascudo (1997) afirmam, a partir de experimentos de concretos fissurados, que a relação água/cimento tem influência na corrosão mais significativa do que a própria espessura de cobrimento.

### 2.5.2- Composição química do cimento

A composição química do cimento Portland está ligada à capacidade de fixação de cloretos, já que esta é determinada pelo teor de  $C_3A$  do clínquer. A principal forma de fixar íons cloretos é pela reação com o  $C_3A$  formando o cloroaluminato de cálcio (sal de Friedel), diminuindo o teor de cloretos livre na solução dos poros. No entanto, se o teor de cloretos exceder a um certo limite, a capacidade de fixação torna-se limitada, havendo mais cloretos livres na solução dos poros (LOPES, 1999).

Sendo assim, o efeito benéfico do  $C_3A$  está associado ao teor de cloretos presentes no concreto. Cabe também ressaltar que cimento com alto teor  $C_3A$  provoca elevado calor de hidratação, fato este prejudicial à estrutura além, de torná-la mais suscetível ao ataque por sulfato.

Com relação às adições ao cimento, a sua influência positiva esta relacionada ao refinamento dos poros e o conseqüente aumento na resistividade elétrica do concreto e ainda, apresenta uma capacidade de fixação adicional de cloretos, devido à quantidade de aluminatos que adiciona ao cimento (BAUER, 1995).

### 2.5.3- Carbonatação

Segundo *Mailvaganam* citado por Lopes (1999), a redução do pH no processo de carbonatação afeta a estabilidade dos cloroaluminatos que só é mantida em elevados valores de pH (12,6 – 14). Deste modo, a carbonatação pode aumentar a concentração de cloretos na solução intersticial do concreto, na medida em que todos os cloretos que estavam presos nos produtos de hidratação podem ficar livres e disponíveis para as reações de corrosão e despassivação da armadura. Em

concretos *parcialmente carbonatados*, o teor de cloretos livres pode ser intensificado até 100%, e em concretos *carbonatados* a intensidade de corrosão devido ao ataque por cloretos é aumentada de duas ou três vezes.

#### 2.5.4- Temperatura

A temperatura tem um duplo papel nos processos de deterioração. Por um lado seu incremento promove um aumento da velocidade de corrosão e a mobilidade dos íons, porém, sua diminuição pode dar lugar a condensações, as quais podem produzir incrementos locais no teor de umidade (ANDRADE, 1992).

Sobre a influência deste parâmetro sobre os valores críticos de cloretos, Hussain et al. citados por Lopes (1999) concluíram que o aumento da temperatura reduz a concentração de  $\text{OH}^-$  na solução dos poros e aumenta a concentração de cloretos livres pela decomposição de cloroaluminatos.

#### 2.5.5- Fissuras

As fissuras presentes no concreto têm um papel polêmico quanto à corrosão. Alguns autores como *Carpentier* e *Soretz* citados por CASCUDO (1997) observaram, ensaiando vigas com fissuras de abertura 0,2 a 0,3 mm, que a corrosão é mais intensa quanto maior a abertura dessas fissuras e quanto mais cedo elas aparecem. Porém, *Felius* e *Andrade*, também citados por CASCUDO (1997) ressaltam que enquanto as fissuras não ultrapassarem aberturas em torno de 0,4 mm, não parece que haja uma significativa influência em termos de vida útil da estrutura.

NEPOMUCENO (1992), ao estudar o comportamento de argamassas de reparo frente a carbonatação e à penetração de cloretos em estruturas de concreto afetadas por corrosão de armadura, observou que as juntas formadas entre o material de reparo e o concreto original são a região preferida para a penetração dos cloretos devido à formação de fissuras.

## **Corrosão por Efeito de Carbonatação no Concreto Armado**

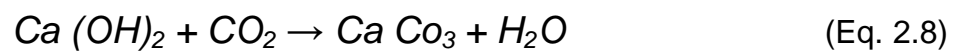
O fenômeno da carbonatação, que é a reação entre o  $\text{CO}_2$  da atmosfera em presença de umidade com os produtos de hidratação do cimento Portland, provoca a redução do pH do concreto a níveis que podem causar a eliminação da película passivadora do aço, podendo ocorrer a instalação do mecanismo de corrosão das armaduras, uma das principais patologias em estruturas de concreto armado, desde que para isto, exista oxigênio, umidade e uma diferença de potencial entre dois pontos distintos da barra de aço.

A deterioração do concreto devido à corrosão de armaduras, a bastante tempo, tem despertado a atenção como uma das principais manifestações patológicas, em função dos prejuízos causados por ela. Estudos mostram que, a corrosão das armaduras do concreto é um dos principais problemas com respeito à durabilidade das estruturas de concreto armado.

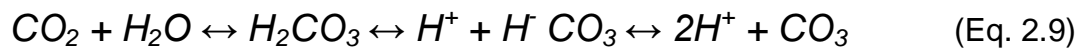
Na região centro-oeste do Brasil, a incidência da corrosão de armadura em estruturas de concreto armado que apresentaram patologias, é da ordem de 30,1%, associada a um ou mais eventos: cobertura deficiente, fissuras, infiltrações, presença contínua de umidade, meio ambiente agressivo e falta ou deficiência de manutenção. Apresentando o 2º maior índice, é uma das manifestações patológicas que causa mais prejuízos às edificações, pois, no processo de desenvolvimento estão, em geral, envolvidas diversas outras manifestações patológicas (NINCE, 1996). Torna-se claro, a preocupação atual sobre a durabilidade das estruturas de concreto, particularmente no caso da corrosão de armaduras (LARA, 2009).

A carbonatação do concreto acontece, geralmente, de forma difusa, avançando paulatinamente para o interior e, ao atingir a armadura, gera sua despassivação. A entrada de  $\text{CO}_2$  ocorre através do mecanismo de transporte da difusão, principalmente, pela diferença de concentração entre o ambiente externo e os poros do concreto.

O dióxido de carbono, ao penetrar pelos capilares, reage com os compostos hidratados do cimento expostos a carbonatação, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos, diminuindo o pH do concreto. A principal reação de carbonatação é resultante da reação entre o hidróxido de cálcio e o gás carbônico, conforme expresso a seguir:



Para que a reação de carbonatação seja produzida naturalmente, é preciso que, o anidrido carbônico seja diluído, esta diluição ocorre devido à água adsorvida na parede dos poros, conforme apresentado na equação abaixo:



Reações semelhantes ocorrem com os outros álcalis do cimento (NaOH, KOH). Esses álcalis, normalmente, encontram-se dissolvidos na fase aquosa na forma de íons, sendo mais solúveis que o hidróxido de cálcio. Desse modo, são os primeiros compostos a serem carbonatados. Os silicatos e aluminatos também podem sofrer carbonatação. A carbonatação pode se ocorrer com a presença de íons cloreto. (TUUTTI, 1982). Pode-se verificar o esquema do processo de carbonatação na Figura 2.10.

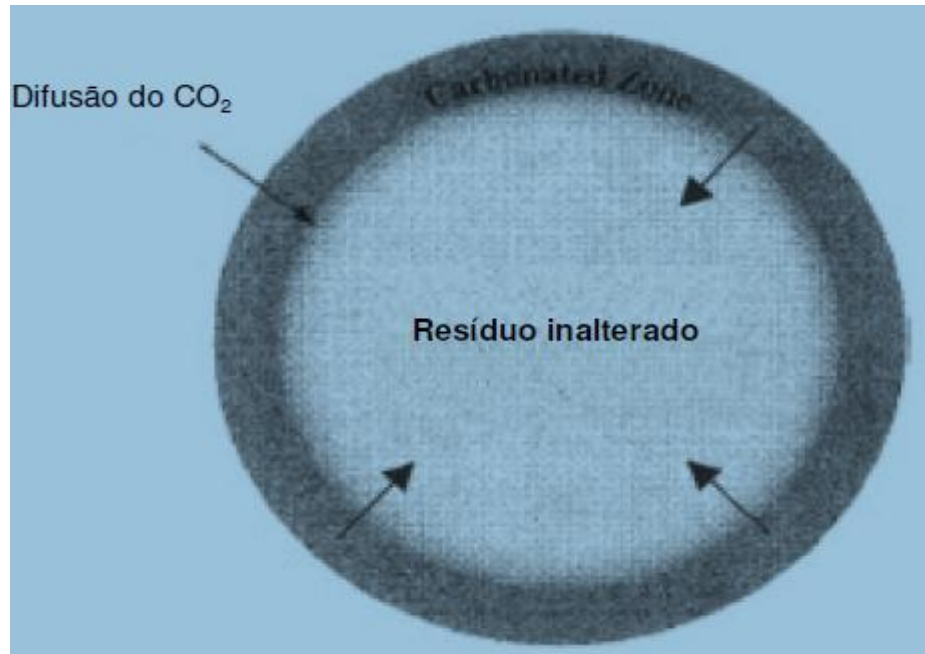


Figura 2.10- Esquema do processo de carbonatação (BARIN, 2011).

## 2.6 Mecanismos da Carbonatação

Na hidratação do cimento ocorrem várias reações químicas nas quais são produzidos materiais carbonatáveis. Os processos físico-químicos da carbonatação envolvem reações gasosas, dissolução e precipitação de sólidos. As reações envolvidas nas diversas etapas deste processo consistem em:

- a) Difusão do  $\text{CO}_2$  da atmosfera na fase gasosa dos poros do material e posterior dissolução na água dos poros;
- b) Dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  sólido na água dos poros e difusão do  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido das regiões de maior alcalinidade;
- c) Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido na água dos poros;
- d) Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o C-S-H e os compostos não hidratados ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ) da pasta de cimento endurecida;

- e) Redução dos volumes dos poros devido à precipitação do produto de carbonatação;
- f) Condensação do vapor de água (gerado na reação de carbonatação) na paredes dos poros do material, em equilíbrio com a temperatura e a condições de umidade relativa do ambiente exposto (KIRCHHEIM, 2003).

Visto a importância do estudo da durabilidade e da utilização crescente desse novo material, observa-se a relevância da realização de pesquisas para a investigação das propriedades e da contribuição com a questão da vida útil do concreto com utilização de cimento branco.

## **2.7 Resistência Mecânica**

As alterações que acontecem na microestrutura da pasta do cimento, influenciadas pelo grau de hidratação, pela relação a/agl e pelo tipo de cimento, são fatores preponderantes para a resistência do concreto. A diminuição da estrutura dos poros torna o conjunto mais compacto e, conseqüentemente, mais resistente. Concretos mais resistentes apresentam menor profundidade de carbonatação, menos possibilidades de penetração de cloretos e outros agentes patológicos, devido sua estrutura mais compacta

Somente a resistência à compressão não fornece informações necessárias quanto à microestrutura da pasta de cimento endurecida, por isso é necessário também que sejam feitos outros testes referentes a durabilidade do concreto.

De acordo com essas características o concreto branco, por sua composição mineralógica, tem ganho de resistência nos primeiros dias, devido principalmente ao grande teor de  $C_3A$  e à sua finura.

Tais alterações podem ser justificadas pela composição dos óxidos mostrados na tabela 2.4.

Tabela 2.4- Principais compostos do cimento portland branco (BARIN, 2008).

<b>Nome do composto</b>	<b>Composição em óxidos</b>	<b>% em massa</b>
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	48,5
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	30,5
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	13,4
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,8

Uma das principais características químicas e físicas do cimento portland branco é a alta resistência principalmente nas idades iniciais. Com o uso deste cimento, o concreto produzido, é um excelente material, não somente devido ao seu alcance de várias tonalidades de cores, que melhoram suas qualidades estéticas, mas também oferece um ganho relevante nas suas características estrutural, devido à sua alta resistência mecânica.

O menor teor de ferro apresentado na composição química do cimento portland branco, pode resultar em um maior volume dos compostos hidratados e conseqüentemente, obtêm-se menor porosidade capilar, resultando em maior resistência e menor permeabilidade na pasta.

Como o clínquer branco, assim como cinza, é uma mistura heterogênea de alguns minerais produzidos em reações exotérmicas, entre óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro. A composição química dos principais minerais do clínquer corresponde principalmente a  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ; no cimento portland comum as quantidades estão entre respectivamente 48,5%, 15 e 30,5%, 13,4% e 0,8%.

No momento em que é adicionada água no cimento, o sulfato de cálcio e os compostos do cálcio formados a alta temperatura tendem a entrar em solução, e a fase líquida satura-se rapidamente.

Como resultado das combinações entre cálcio, sulfato, aluminato e íons de hidroxila, após alguns minutos de hidratação do cimento portland, aparecem os primeiros cristais de etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado), algumas horas após, cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrilares de C-S-H (silicatos de cálcio hidratado) começam a preencher os espaços vazios ocupados anteriormente pela água e as partículas de cimento em dissolução.

Passado alguns dias, de acordo com a proporção alumina-sulfato do cimento portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfato hidratado, que tem a forma hexagonal (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O  $C_3S$  é um silicato facilmente encontrado nos clínqueres de cimento portland e está em maior quantidade no clínquer branco. Contém pequenas quantidades de magnésio, alumínio, ferro, potássio, sódio e enxofre. O arranjo desta este elemento deixa grandes vazios estruturais responsáveis pela alta energia e reatividade da estrutura. Este elemento é o maior responsável pela resistência em todas as idades, principalmente até o fim do primeiro mês de cura. (BAUER, 2000).

O  $C_2S$  adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável por adquirir resistência depois de um ano em diante.

O  $C_3A$  também contribui para a resistência, principalmente no primeiro dia, é o grande responsável, seguido pelo  $C_3S$ , pela liberação do calor de hidratação no início do período de cura. Quando presente na forma cristalina é o responsável pela rapidez da pega, e pode ser controlado com a adição de gesso (BAUER, 2000).



A seguir é detalhado a comportamento dos compostos formados na hidratação do cimento. A Figura 2.11 mostra a aparência do cimento utilizado na pesquisa.



Figura 2.11 – Aparência do cimento portland branco utilizado na pesquisa (autoria própria).

A granulometria dos agregados possui maior influência na massa específica e na resistência nos concretos brancos que nos tradicionais, diversos fatores exercem influência sobre a resistência à compressão do concreto, como por exemplo: tipo e dosagem de cimento; granulometria, diâmetro máximo, forma, textura, resistência e rigidez dos agregados; fator água/cimento; tipo e dosagem dos aditivos químicos e minerais; grau de compactação; condições de cura; procedimentos de ensaios, dentre outras.

## **2.8 Zona de transição do concreto branco**

Nestes concretos, a resistência mecânica da matriz de cimento é utilizada com maior eficiência que nos concretos tradicionais, em decorrência da similaridade entre os valores dos módulos de deformação do agregado e da matriz e da excelente qualidade da zona de transição agregado-matriz.

Desse modo, os concretos, normalmente, não rompem devido à diferença entre as deformações dos agregados e da matriz de cimento, e sim devido ao colapso da argamassa, que normalmente, ocorre na região ao redor do agregado. No colapso destes concretos, a linha de fratura atravessa os agregados, diferentemente do que ocorre com os concretos convencionais, em que a ruptura do material ocorre devido ao colapso da argamassa e a separação entre as fases, resultando uma linha de fratura no agregado.

### **3- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental desta pesquisa foi elaborado com o objetivo de verificar a durabilidade através dos ensaios de absorção, penetração de cloretos e carbonatação do concreto branco com adições pozolânicas, a saber: sílica ativa e metacaulim. De forma completa foi realizada análise mecânicas por meio de ensaio de resistência e módulo de elasticidade.

#### **3.1 Considerações iniciais**

Cabe ressaltar, que o principal diferencial deste trabalho em relação a outros já realizados, como por exemplo, o de Siqueira (2012) onde testou as propriedades elétricas do cimento branco e fez também ensaios para testar a resistência mecânica do mesmo, é o uso do seixo como agregado graúdo, pois em trabalhos anteriormente desenvolvidos com concreto branco usou-se a brita por ser mais comum na região sul e sudeste, região em que os mesmos foram estudados. No entanto, como o seixo é o agregado graúdo mais abundante na região metropolitana de Belém, optou-se por este material, e também pelo fato de que o concreto produzido com seixo pode alcançar resistências próximas aos feitos com brita. Teve-se também que escolher um seixo claro para não mudar as características do cimento branco.

A seguir estão expostas as características do programa experimental, com o intuito de fornecer uma visão detalhada dos experimentos.

### 3.2- Definição do programa experimental

A definição do programa experimental compreende duas variáveis: variáveis de controle e de resposta. Nas variáveis de controle tem-se a relação água/cimento, teor de substituição de adições (sílica ativa e metacaulim), traço, teor de CO<sup>2</sup> e abatimento. Já nas variáveis de resposta analisou-se, no estado fresco, a trabalhabilidade e a massa específica e, no estado endurecido, a resistência mecânica e a durabilidade. A definição da quantidade de corpos-de-prova e dos ensaios está na Tabela e Figura 3.1, respectivamente.

Tabela 3.1- Determinação da quantidade de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio.

Determinações	Concreto Sem Adição						Concreto com Adições									Total		
							Metacaulim (5%)						Sílica ativa(5%)					
	1:5		1:3,5		1:6,5		1:5		1:3,5		1:6,5		1:5	1:3,5			1:6,5	
	Idade em dias						Idade em dias						Idade em dias					
	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28		
RCA	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	36
RTCD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	36
AC		2		2		2		2		2		2		2		2		18
PC		2		2		2		2		2		2		2		2		18
Carbonatação		2		2		2		2		2		2		2		2		18
M.E.V.		2		2		2		2		2		2		2		2		18
Total de CP's																		144

Onde: RCA → Resistência à compressão Axial;

RTCD → Resistência à Tração por Compressão Diametral;

AC → Absorção por Capilaridade;

PC → Penetração de Cloretos;

M.E.V → Microscopia Eletrônica de Varredura.

### 3.2.1 Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa

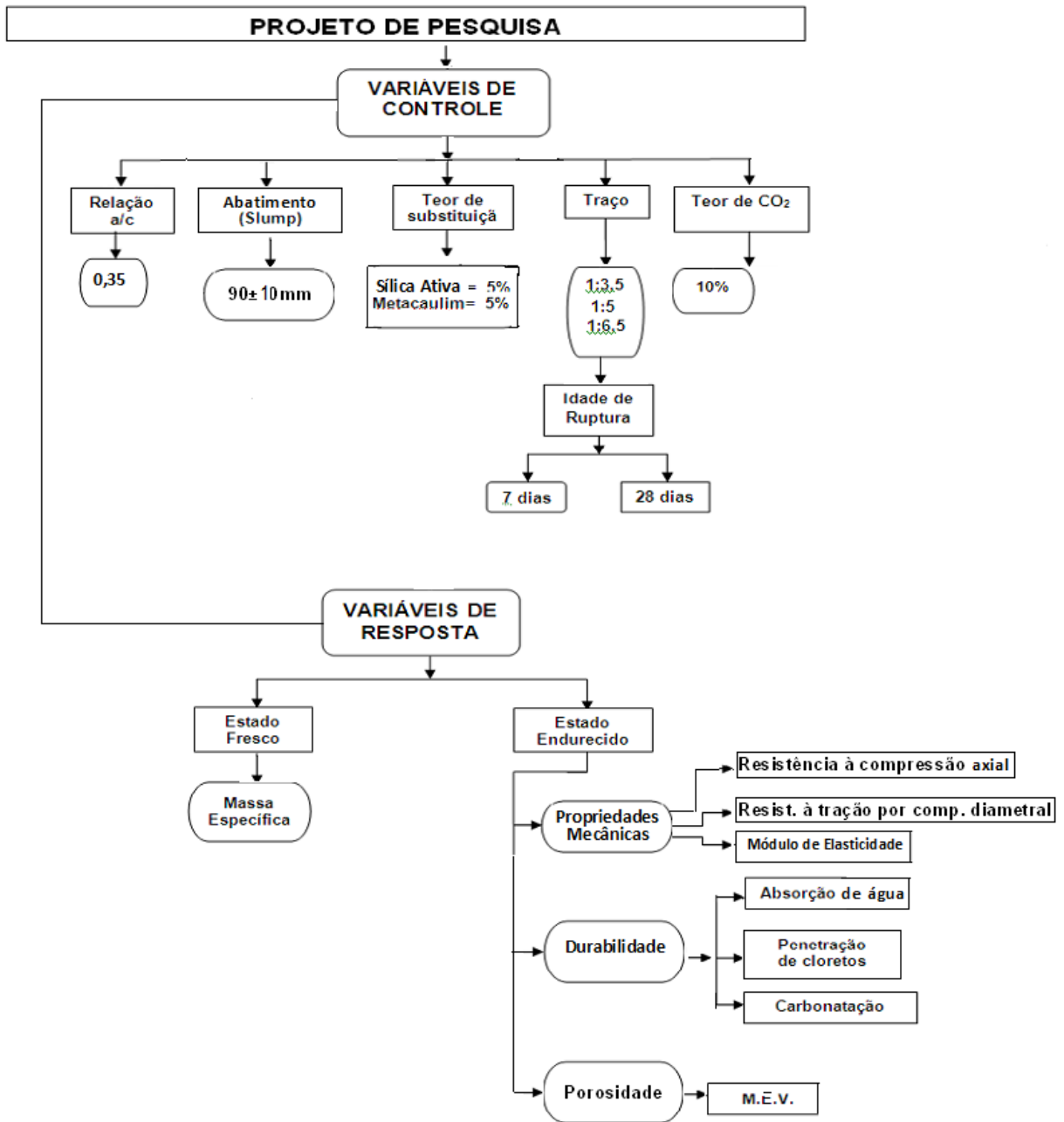


Figura 3.1- Fluxograma das variáveis envolvidas na pesquisa

### 3.2.2- Caracterização dos Materiais

Nesta pesquisa utilizaram-se os seguintes materiais: cimento Portland Branco Estrutural CB-40, seixo rolado, areia natural, metacaulim, sílica ativa e aditivo

superplastificante. Os resultados de caracterização destes são apresentados nas Tabelas a 3.2 a 3.8.

### 3.2.2.1- Cimento

O cimento utilizado na pesquisa, como dito anteriormente, foi o CB-40 estrutural, suas características físicas e químicas constam nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Características físicas e mecânicas do Cimento Portland Branco Estrutural segundo a NBR 1989(ABNT, 1993).

Descrição	Cimento
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,99
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias: 23,76
	7 dias: 29,48
	28 dias: 40,40
Tempo de início de pega (h:min)	2h e 34 mim
Tempo de fim de pega (h:min)	4h e 17 mim
Finura na peneira # 200 (%)	0,29

Tabela 3.3 – Composição Química do Cimento Portland Branco Estrutural Segundo a NBR 1989 (ABNT, 1993).

Parâmetros	Unidade	CPB-40
<b>C<sub>3</sub>S</b>	%	67,85
<b>C<sub>2</sub>S</b>	%	11,02
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	%	0,55
<b>C<sub>3</sub>A</b>	%	11,71
<b>SO<sub>3</sub></b>	%	1,94
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	4,58
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	0,17
<b>CaO (livre)</b>	%	2,52
<b>CaO</b>	%	66,53
<b>Perda ao Fogo (PF)</b>	%	3,53
<b>Resíduo Insolúvel (RI)</b>	%	0,35

### 3.2.2.2- Areia

Utilizou-se como agregado miúdo areia natural, extraída de fonte localizada na cidade de Ourém/Pa. Foram realizados alguns ensaios, visando a caracterização deste material: ensaios de granulometria NBR NM 248(ABNT, 2003), massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2009) e massa unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. – Características físicas da areia utilizada na pesquisa – granulometria, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária.

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>	<b>Método de ensaio</b>
4.8	0	0	0	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
2.4	0	0	0	
1.2	1,0	1	4	
0.6	10	2	13	
0.3	116	23	65	
0.15	287	57	95	
<0.15	12	2	100	
TOTAL	1000	100	-	
<b>Módulo de Finura</b>		1,77 mm		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
<b>Dimensão máxima característica</b>		1,2 mm		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
<b>Massa Específica</b>		2,66 kg/cm <sup>3</sup>		NBR NM 52 (ABNT, 2009)
<b>Massa Unitária</b>		1,46 kg/dm <sup>3</sup>		NBR NM 45 (ABNT, 2006)

### 3.2.2.3- Seixo

Utilizou-se nesta pesquisa como agregado graúdo o seixo. Foram realizados os mesmos ensaios adotados para o agregado miúdo, ou seja: granulometria, massa específica e massa unitária, de acordo com a normalização brasileira pertinente. Para este material (seixo) determinou-se ainda o desgaste superficial do agregado (ensaio de abrasão “Los Angeles” – LA). Os resultados obtidos constam nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5. – Características físicas do seixo utilizado na pesquisa – granulometria, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária.

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>	<b>Método de ensaio</b>
38	0	0	0	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
25	0	0	0	
19	0	0	0	
12,5	0	0	0	
9,5	562	11	11	
4,8	3978	79	90	
2,4	-	-	100	
1,2	-	-	100	
0,6	-	-	100	
0,3	-	-	100	
0,15	-	-	100	
< 0,15	458,41	9,17	100	
<b>TOTAL</b>	<b>5000</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	
<b>Módulo de Finura</b>		6,02 mm		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
<b>Dimensão máxima característica</b>		12,5 mm		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
<b>Massa Específica</b>		2,6 kg/cm <sup>3</sup>		NBR NM 53(ABNT, 2003)
<b>Massa Unitária</b>		1,55 kg/dm <sup>3</sup>		NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Tabela 3.6- Características do ensaio de abrasão Los Angeles para o seixo empregado na pesquisa.

<b>Ensaio de Abrasão Los Angeles</b>		<b>Massa (g)</b>
Massa seca antes do ensaio:		5000
Massa seca após o ensaio:		2510
LA=	<b>49,80%</b>	



### 3.2.2.4 – Adições Minerais

As adições são partículas ultrafinas que atuam de forma a preencher os espaços vazios existentes entre as partículas maiores, aumentando assim a densidade de empacotamento do material (concreto). Nesta pesquisa utilizou-se a sílica ativa e o metacaulim que são adições minerais que depois de calcinadas, oferecem um efeito pozolânico ao concreto quando utilizadas. As Tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente, demonstram as características do metacaulim e da sílica.

Tabela 3.7- Caracterização química e física do metacaulim.

CARACTERÍSTICA	DETERMINAÇÕES	VALORES OBTIDOS
QUÍMICAS	SiO <sub>2</sub>	49,72%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,84%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,09%
	CaO	0,01%
	Na <sub>2</sub> O	0,09%
	MgO	0,25%
	TiO <sub>2</sub>	1,84%
	K <sub>2</sub> O	0,03%
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26%
	Perda ao Fogo	2,82%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	0,88
FÍSICAS	Massa Específica	2,51g/cm <sup>3</sup>
	Diâmetro Médio das Partículas	4,63 µm
	Superfície Específica	18,76m <sup>2</sup> /kg

Tabela 3.8- Caracterização química e física da sílica ativa.

CARACTERÍSTICA	DETERMINAÇÕES	VALORES OBTIDOS
QUÍMICAS	SiO <sub>2</sub>	83%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5%
	CaO	0,8%
	Na <sub>2</sub> O	0,3%
	MgO	3,0%
	K <sub>2</sub> O	2,0%
	C	1,8%
	MnO	0,2%
	Perda ao Fogo	3,6
	Índice de Atividade pozolânica com o cimento	96,5%
FÍSICAS	Massa Específica	2,20g/cm <sup>3</sup>
	Diâmetro Médio das Partículas	10,00 µm
	Superfície Específica	17,20m <sup>2</sup> /kg

### 3.2.2.5 - Aditivo

O aditivo Superplastificante utilizado nos traços dos concretos foi um aditivo à base de polímeros de éter policarboxílico. Este foi adicionado na dosagem de 0,78% (em relação à massa do cimento). Segundo o fabricante, a dosagem ótima deve variar de 0,2 a 1,2% (em relação à massa de cimento). As características do aditivo seguem na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Caracterização do aditivo superplastificante (Dados Fornecidos pelo Fabricante).

Função	Aditivo superplastificante de terceira geração
Base Química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido de Cor Branco Turvo (visual)
pH	5.8
Densidade	1,08 g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	31,8 %

#### 3.1.1.6 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

### 3.3- PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

#### 3.3.1- Dosagem

A determinação dos traços de concreto foi realizada com base no método de dosagem desenvolvido pelo IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), descrito por Helene e Terzian (1993). Neste, foi fixado o teor de argamassa em 49%, em decorrência de resultado desenvolvido em laboratório, conforme descrito no item (3.2.2), a seguir.

O objetivo deste método é obter um diagrama de dosagem baseado no modelo de comportamento dos materiais que estão sendo estudados de modo a permitir um proporcionamento adequado. O diagrama parte da elaboração de no mínimo três (3) proporcionamentos distintos de concretos, conhecidos no meio técnico como traço rico, traço piloto e traço pobre, com as proporções adotadas neste trabalho de 1:3,5 ; 1:5 e 1:6,5 (cimento:agregado, em volume), respectivamente.

Para o controle dos concretos foi fixada a consistência em  $(90\pm 10)$ mm, determinada pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os resultados de resistência à compressão axial, foram obtidos nas idades de 7 e 28 dias, idades usuais no controle tecnológico do concreto. Fixou-se a relação a/c em 0,35, foram feitos os três traços pelo método IPT/EPUSP (rico, médio e pobre) para que se pudesse conhecer o comportamento do concreto branco com as adições mencionadas.

#### 3.3.2- Determinação do Teor de Argamassa Seca ( $\alpha\%$ )

O teor de argamassa, que representa a relação entre a massa de cimento e areia e a massa total da mistura (cimento+areia+agregado graúdo), foi determinada a partir

de um estudo feito anteriormente por Ferreira & Rocha (2010). A referida pesquisa, também desenvolvida nesta Universidade e com o mesmo tipo de cimento e agregados (graúdo e miúdo), teve por finalidade verificar o grau de penetração de íons cloreto em concretos com cimento portland branco.

Nesta, realizou-se um estudo de dosagem de modo a avaliar o teor de argamassa ideal para compor o traço de referência (piloto) e, a partir deste, os demais traços (rico e pobre). A partir desta avaliação chegou-se ao teor ideal de argamassa de 49%. A Tabela 3.10 apresenta os diferentes teores de argamassa testados pelos autores supracitados.

Tabela 3.10- Determinação do teor de argamassa seca do traço de referência.

<b>DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ARGAMASSA SECA PARA O TRAÇO PILOTO (1:5; cimento:agregado, em volume)</b>										
Teor (%)	Traço Unitário 1:a:s			Cimento (kg)		Areia (kg)		Água (kg)		Fator a/c
				Total	Acrésc.	Total	Acrésc.	Total	Acrésc.	
43	1	1,58	3,42	8,77	0,32	13,86	1,59	5,26	0,00	0,60
45	1	1,70	3,30	9,09	0,34	15,45	1,72	5,26	0,00	0,58
47	1	1,82	3,18	9,43	0,37	17,17	1,85	5,26	0,00	0,56
49	1	1,94	3,06	9,80	0,40	19,02	2,00	5,26	0,00	0,54
51	1	2,06	2,94	10,20	0,43	21,02	2,17	5,26	0,00	0,52
53	1	2,18	2,82	10,64	0,47	23,19	2,36	5,26	0,00	0,49
55	1	2,30	2,70	11,11	0,52	25,56	2,58	5,26	0,00	0,47
57	1	2,42	2,58	11,63		28,14		5,26		0,45
Abatimento = 90 ± 10mm										

Com base na pesquisa anterior, e por serem os materiais (cimento e areia) os mesmos utilizados por Ferreira e Rocha (2010), partiu-se neste estudo já do teor de 49%. Constatando-se que, realmente, os agregados, em especial o graúdo, apresentavam-se satisfatoriamente envolvidos pela argamassa. Cabe salientar, que a relação água/cimento, que anteriormente era de 0,54, não foi a utilizada nos traços dos concretos, pois, com o emprego do aditivo superplastificante, esta foi alterada para 0,35. A explicação do teor de aditivo utilizado encontra-se detalhada a seguir.

### 3.3.3- Determinação do Teor de aditivo

A definição do teor de aditivo nesta pesquisa se deve ao fato de no planejamento experimental se ter feito a opção pela não alteração da relação água/cimento (a/c). Desta forma, se fixou a consistência dos concretos em  $(90\pm 20)$ mm e, a partir desta determinou-se qual o teor de aditivo possibilitaria este intento.

Já com o teor de argamassa ideal determinado, bem como, a escolha do aditivo a ser utilizado, devido sua fácil disponibilidade (Superplastificante), partiu-se para a execução das dosagens.

Segundo o fabricante, como este aditivo deve ser utilizado de 0,2% a 1,2% (em relação à massa de cimento). Com base nesta informação, resolveu-se dosar os 3 traços (rico, piloto e pobre) a partir de 0,5%, em relação à massa de cimento, com acréscimo de 0,2% a partir deste primeiro teor, ou seja, fez-se a dosagem para 0,5%, 0,70% e 0,9%.

Com os dois primeiros teores (0,5% e 0,7%) notou-se que os concretos tinham abatimento abaixo do pré-determinado ( $90\pm 20$  mm). No entanto, ao adicionar 0,9% de aditivo, este já ultrapassou o referido limite (muito plástico). Logo, o teor estava entre 0,7% a 0,9% (em relação à massa do cimento).

A partir deste intervalo, fez-se a variação para 0,80%. Com esta proporção, os concretos ficaram somente um pouco acima do estabelecido. Fez-se então a tentativa para 0,78%. Com este teor de aditivo, todos os traços dos concretos ficaram com o limite de consistência dentro do estabelecido no planejamento da pesquisa ( $90\pm 20$  mm). Porém, como era de se esperar, a relação água/cimento, que anteriormente a utilização do aditivo, era de 0,54, passou a ser de 0,35. Com base nas definições estabelecidas partiu-se para a dosagem dos concretos (1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5) e de suas avaliações:

- Referência (cimento: areia: seixo:a/c) + aditivo;
- Concreto 5% sílica ativa (cimento: areia: seixo:a/c) + aditivo+adição
- Concreto 5% metacaulim (cimento: areia: seixo:a/c) + aditivo+adição

### 3.4- Avaliações no Concreto no Estado Plástico

- Consistência (slump test) – NM 67:96 (NBR 7223/1992)
- Massa específica - NBR-9833/2008

Após a execução dos concretos foram realizados os ensaios de consistência e massa específica destes, segundo prescrições normativas. Cabe lembrar, que a consistência (abatimento) dos concretos foi previamente fixado, para todos os traços, em  $(90 \pm 10)$  mm, conforme mostrado na Figura 3.2, quando da realização do estudo de dosagem.



Figura 3.2 – Determinação de abatimento de tronco de cone (slump test).



3.3- Aparência dos corpos de prova de CPB utilizados nos ensaios.

### 3.5- Ensaio de Propriedades Mecânicas

#### 3.5.1- Resistência à Compressão Axial

Este ensaio é descrito por meio da norma NBR 5739 (ABNT, 1994). A resistência à compressão axial do concreto consiste na aplicação controlada de uma carga vertical centrada da face do corpo-de-prova cilíndrico de dimensões (10 x 20) cm, sendo este corpo de prova disposto entre os pratos de compressão da máquina de ensaio. Para cada idade pré-estabelecida (7 e 28 dias), foram ensaiados 3 corpos-de-prova, para que ao final dos ensaios fosse possível calcular a média dos resultados e posterior análise. A Figura 3.4 mostra a realização desta determinação.



Figura 3.4 – Ensaio de compressão axial: Ruptura do corpo-de-prova.

#### 3.5.2- Resistência à Tração por compressão diametral

Este ensaio segue as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994).

Primeiramente coloca-se o corpo de prova, de modo que o mesmo fique em repouso ao longo de uma geratriz, sobre o prato da máquina de compressão. Em seguida, entre os pratos e o corpo de prova, coloca-se duas tiras de fibra de madeira, de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova e seção transversal com as dimensões  $d=10$  cm e  $h=20$  cm, conforme indicadas na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Ensaio de tração por compressão diametral – Ruptura por fendilhamento. Módulo Estático de Elasticidade à Compressão do Concreto.

### 3.5.3- Módulo de Elasticidade

Este ensaio é prescrito pela NBR 8522 (ABNT, 1984). Seu objetivo é a determinação dos módulos de deformação longitudinal, tangente e secante e, diagramas tensão *versus* deformação dos concretos sob carregamento estático, à compressão axial simples, na idade de 28 dias. Ressalta-se, que nesta pesquisa apenas a deformação longitudinal foi verificada. A Figura 3.6 ilustra a realização deste ensaio.



Figura 3.6 – Determinação do Módulo de Elasticidade dos concretos, na idade de 28 dias.



### 3.6- Avaliações de Durabilidade dos Concretos

#### 3.6.1- Absorção de Água

Este ensaio é avaliado segundo as prescrições da NBR- 9779 (ABNT, 1995) e tem a finalidade de verificar a capacidade de absorção de água do concreto. Ao constatar que a capacidade de absorver água de uma determinada amostra é elevada, pode-se verificar que o número de vazios presentes no mesmo é relativamente maior.

A realização deste consiste em secar a amostra em estufa à temperatura de 110°C por 24 horas, em seguida deixa-se em ambiente seco para esfriar até atingir a temperatura ambiente. Após ser verificado a massa dos corpos de prova secos, os mesmos são colocados em recipiente, onde ficam com um terço de sua altura submersos durante o período de quatro horas, como mostra Figura 3.7.



Figura 3.7.- Realização do ensaio de absorção de absorção de água dos concretos.

#### 3.6.2-Ensaio acelerado de penetração de cloretos

Este ensaio é descrito pela norma norte americana C 1202 (ASTM, 2005) e tem o objetivo medir a corrente que passa em uma amostra de concreto de 51 mm de altura. A corrente é registrada de 30 em 30 minutos, sob uma tensão de 60V, durante um período de 6 horas (SIQUEIRA, 2008). A Figura 3.8 demonstra a preparação para a realização deste ensaio.

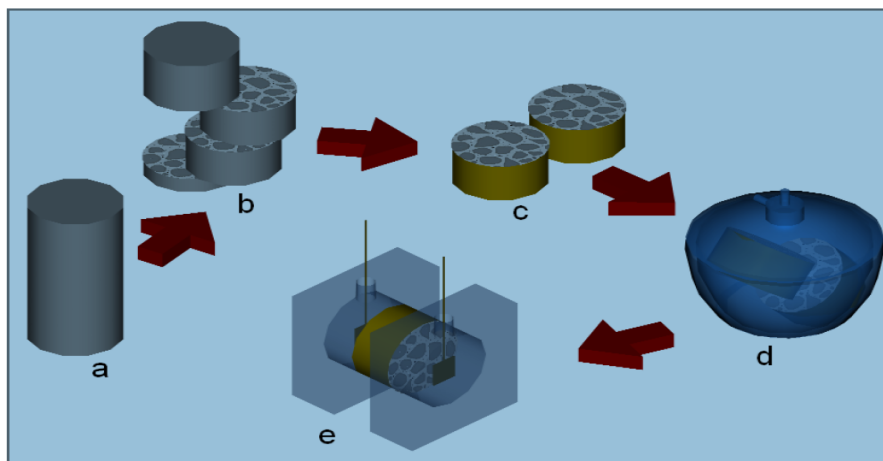


Figura 3.8- Preparação dos corpos de prova para o ensaio de penetração de cloretos (SIQUEIRA, 2008).

As faces do cilindro são expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3% em água destilada e a outra à solução de hidróxido de sódio a 0,3 N também em água destilada, onde são submersos eletrodos conectados em uma fonte de corrente contínua, formando uma pilha eletroquímica que permite verificar a diferença de potencial no concreto. As amostras são preparadas seguindo as seguintes etapas: Aos 25 dias o corpo de prova é retirado da câmara úmida para ser impermeabilizado. Esta operação consiste em aplicar na lateral da amostra resina epóxi, tendo cuidado para não contaminar a superfície onde se dará a penetração de cloretos;

Aos 26 dias os CP's são colocados ob a ação de vácuo por 3 horas. Com a bomba de vácuo ainda ligada, coloca-se água destilada até ficarem submersos e permanecem lá por mais uma hora. Após este período a bomba é desligada e os CP's ficam submersos por mais 18 horas.

Aos 27 dias as amostras são colocadas nas células com borracha de silicone e aos 28 dias inicia-se o ensaio propriamente dito de penetração de cloretos, conforme Figura 3.9 (KURLAKOWSKI e DAL MOLIN, 2002).

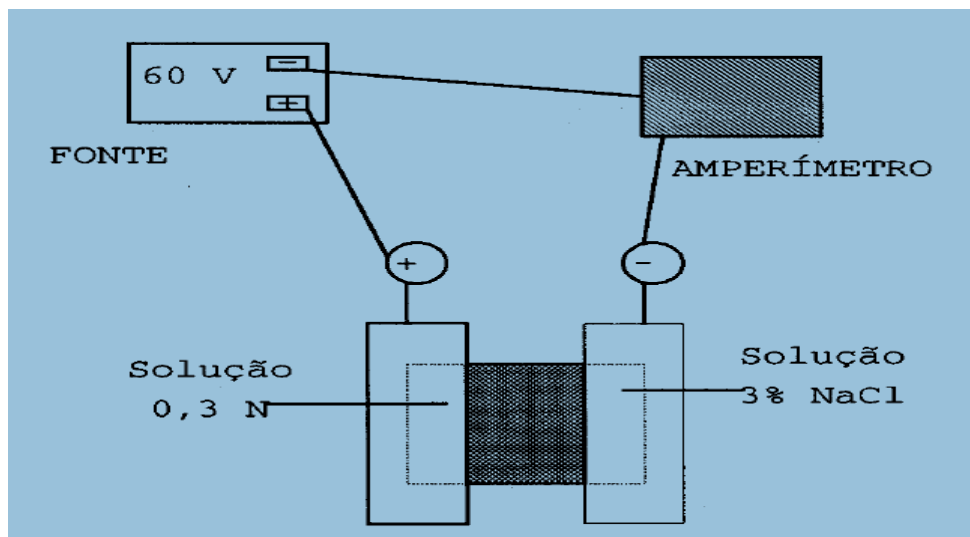


Figura 3.9- Método acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202/05)

Ao fim do ensaio, após as 6 horas, calcula-se a carga total passante, verificando a classificação do concreto, quanto ao risco de penetração de íons cloreto, de acordo com a Tabela 3.11 disposta na ASTM 1202.

Tabela 3.11- Classificação de concretos quanto à penetração de cloretos de acordo com a carga passante (ASTM C 1202/05).

<b>Carga passante</b>	<b>Risco de penetração de íons cloreto</b>
> 4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
< 100	Desprezível

A carga é calculada pela equação 3.1.

$$Q = 900 (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + \dots + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \quad (3.1)$$

Onde: Q = é a carga total passante (em Coulomb)

$I_t$  = é a corrente medida nos tempos t (t em minutos) (Ampéres)

t = é o tempo (em minutos)



Figura 3.10- Imagem das etapas do ensaio acelerado de penetração de cloretos.

### 3.7.3- Ensaio acelerado de Carbonatação

Este ensaio é importante para simular e avaliar a carbonatação do concreto em idade avançada. Os corpos de prova serão acondicionados em uma câmara de carbonatação. A alimentação desta será feita por meio de um fluxo vindo de um cilindro de  $\text{CO}_2$ , controlado por meio de um rotâmetro (controlador de vazão) conectado a câmara. Para a execução deste ensaio será adotada a concentração de  $10 \pm 2\%$  de  $\text{CO}_2$ . Este valor foi estipulado por já ter sido aplicado em outras pesquisas como, por exemplo, Isaia (1995); Kobayashi e Uno (1989); Vagheti (1999) e Lara (2009). Além deste será feita à medição da carbonatação por meio de indicador químico (fenoftaleína).

O controle da entrada do gás na câmara foi feito em litros por minuto com auxílio do rotâmetro feito sob especificações que supriram as necessidades de controle de vazão. Após tempo cronometrado para atingir determinada concentração, as

válvulas eram fechadas e o processo repetido toda vez que a câmara era a aberta para retirada dos corpos de prova para ensaio.



3.11- Imagem da câmara de carbonatação utilizada nos ensaios.

### **3.7- Caracterização da Microestrutura Porosa do Concreto Branco**

#### **3.7.1- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O microscópio eletrônico de varredura é um tipo de equipamento capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Os modelos avaliados apresentam uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a sua estrutura superficial.

O princípio de funcionamento do MEV consiste em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado em sincronismo com um varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, deste modo, uma correspondência ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da

amostra, que depende do detector utilizado, da natureza da informação e do tipo de sinal registrado.

Para a análise dos concretos produzidos utilizou-se a MEV, associado à espectrografia por dispersão de energia (EDS).

De acordo com Rossignolo (2003), a espectrografia de Raios- X por dispersão de energia (EDS), associada a sistemas de análises de Raios-X permite realizar a análise química elementar em um ponto ou uma área da amostra em termos qualitativos, semiquantitativos e quantitativos.

Os métodos de análise quantitativa e semiquantitativa se encontram, de modo geral, disponíveis nos sistemas EDS e são usualmente utilizados, pelo fato de permitirem, de forma rápida, a identificação e a determinação da composição dos elementos presentes na amostra.

Este ensaio, possivelmente, será realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (LABMEV/ UFPa). O equipamento consta de um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO-1430, com as seguintes condições de análise para as imagens de elétrons retroespalhados:

- a- corrente de feixe de elétrons = 90  $\mu\text{m}$ ;
- b- voltagem de aceleração constante = 20 kv;
- c- distância de trabalho = 15 mm; e
- d- tempo de contagem para análise dos elementos = 30 seg.

## 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados no programa experimental desta dissertação. A discussão fundamentou-se nos resultados obtidos, pelo confronto destes com a bibliografia referente ao tema e pela análise de variância (ANOVA), para a definição do nível de significância das variáveis de controle.

### 4.1- Propriedades do concreto no estado fresco

#### 4.1.1 Índice de consistência e massa específica

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram os resultados de índice de consistência e massa específica. Cabe lembrar que nesta pesquisa o índice de Consistência foi fixado em  $(90 \pm 10)$ mm.

Tabela 4.1- Valores de Índice de consistência e Massa específica encontrados nos concretos ensaiados para o traço de 1:5.

Tipos de concreto	$\alpha$	a/c	Índice de consistência (mm)	Consumo de cimento	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )
CR	49%	0,35	80	393	2,97
CSA			90		2,99
CMT			90		2,98
LEGENDA: CR = Concreto Referência      CMT = Concreto com Metacaulim CSA= Concreto com Sílica Ativa $\alpha$ = Teor de argamassa					

Os concretos apresentaram coesão e consistência dentro do esperado, permitindo assim, a moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios. Verificou-se ainda que em nenhum dos concretos houvesse o fenômeno da exsudação e segregação dos agregados.

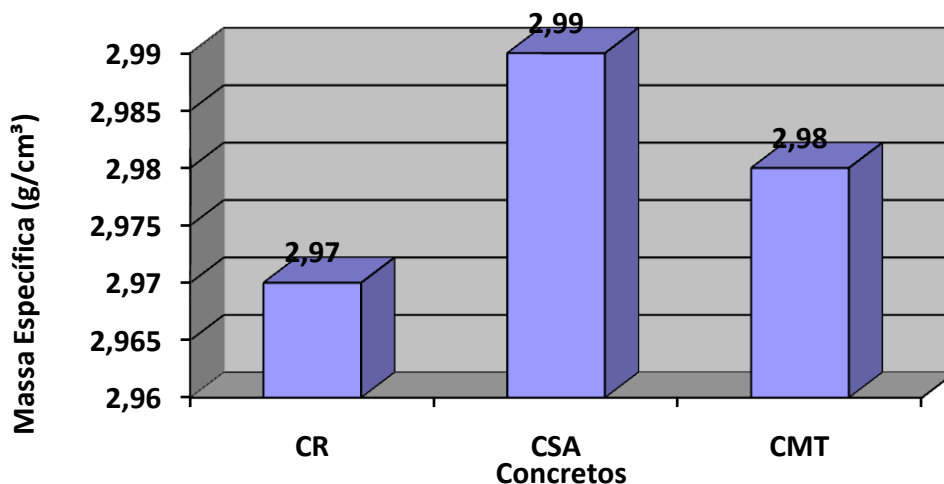


Figura 4.1- Valores de Massa específica dos concretos produzidos na idade de 28 dias.

O valor encontrado para a massa específica do concreto branco analisado foi de 2,97 g/cm<sup>3</sup> para o concreto referência (sem adição) no traço de 1:5, visto que os valores referentes aos concretos com adição foram bastante próximos.

Siqueira (2008) também encontrou este valor de 2,97 g/cm<sup>3</sup> e concluiu que o teor de argamassa ideal para o seu concreto referência é de 52%, pois quando ele substituiu o cimento por um material de menor massa específica (escória de alto forno), acontece um aumento de volume na pasta.

O concreto produzido com sílica ativa (CSA) apresentou um aumento dos valores de massa específica de 0,02g/cm<sup>3</sup> em relação ao concreto referência (CR). Já o concreto com adição de metacaulim (CMT) apresentou um aumento de 0,01g/cm<sup>3</sup> em relação ao concreto de referência.

De acordo com Neville e Brooks (2013), a determinação do concreto nas primeiras idades pode ser uma grande vantagem, pois, se as proporções efetivas corresponderem às especificadas, a necessidade de ensaio no concreto no estado endurecido será menor. Isso acarreta ao concreto características satisfatórias, pois como todos os fatores preponderantes para obter-se um bom concreto, como teor de argamassa, abatimento, entre outros, forem seguidos como o especificado, pode-se



garantir um empacotamento que garanta o envolvimento de todos os elementos do concreto.

## 4.2- Propriedades do concreto no estado endurecido

### 4.2.1-Ensaio Mecânicos

Entre todas as características apresentadas pelo concreto, a resistência mecânica é fundamental. Mesmo que o concreto seja um material durável e apresente as características estéticas esperadas, não haverá fundamento em utilizá-lo como material de construção se o mesmo não for capaz de suportar cargas a ele submetidas. As tabelas e figuras a seguir mostram os resultados obtidos com relação às propriedades mecânicas dos concretos avaliados.

#### 4.2.1.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A Tabela 4.2. e Figura 4.2 apresentam os valores médios obtidos no ensaio de resistência à compressão axial para os traços avaliados e nas idades de 7 e 28 dias.

Tabela 4.2- Valores médios encontrados para resistência à compressão axial para os concretos ensaiados nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>						
<b>Traços</b>	<b>CR</b>		<b>CMT</b>		<b>CSA</b>	
	Idades (dias)		Idades (dias)		Idades (dias)	
	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<b>1:5</b>	44,10	59,60	60,10	67,90	36,10	50,65
<b>1:3,5</b>	56,20	72,90	69,61	73,67	60,00	67,00
<b>1:6,5</b>	32,20	33,20	47,57	65,11	27,10	37,00
<b>LEGENDA:</b> CR = Concreto Referência      CMT = Concreto com Metacaulim CSA= Concreto com Sílica Ativa $\alpha$ = Teor de argamassa						

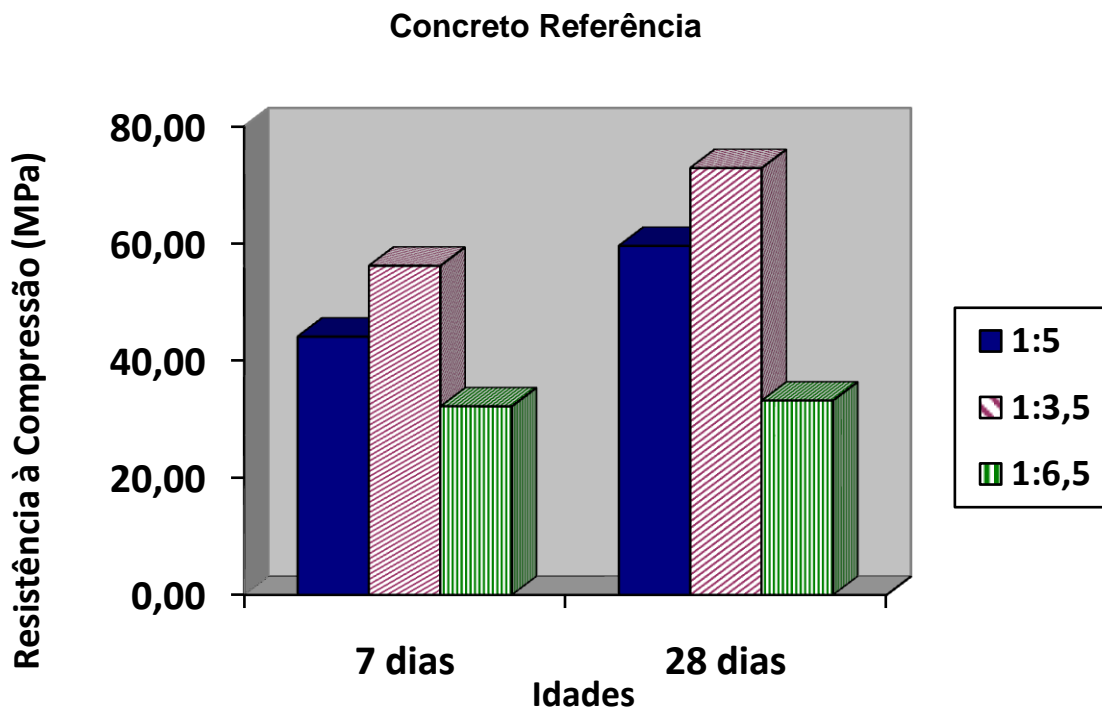


Figura 4.2- Valores de resistência à compressão axial dos concretos, nas idades de 7 e 28 dias.

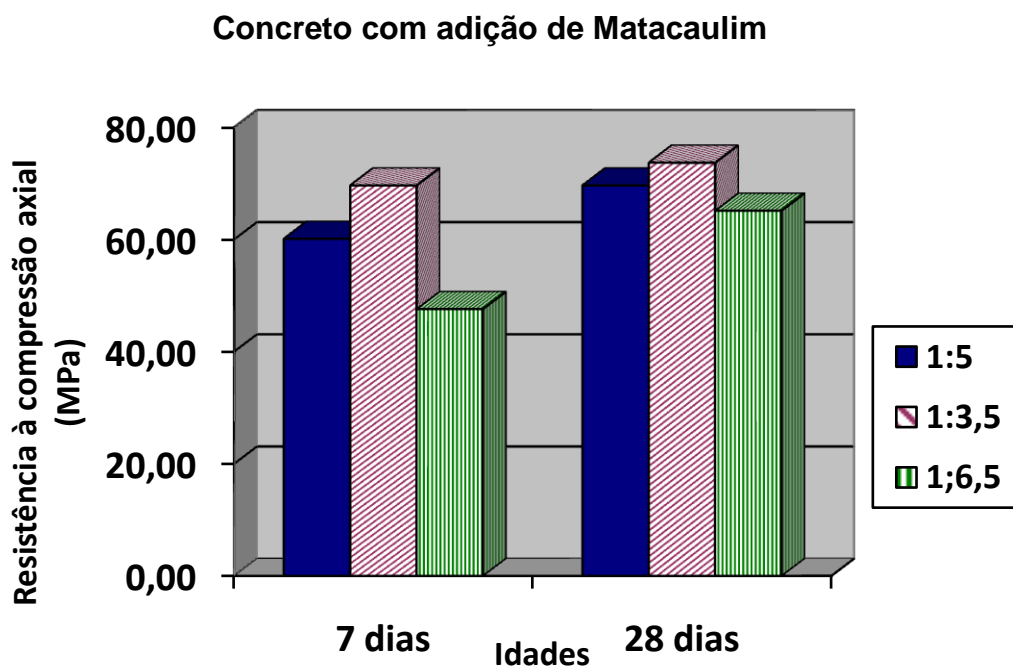


Figura 4.3- Valores de resistência à compressão dos concretos, nas idades de 7 e 28 dias.

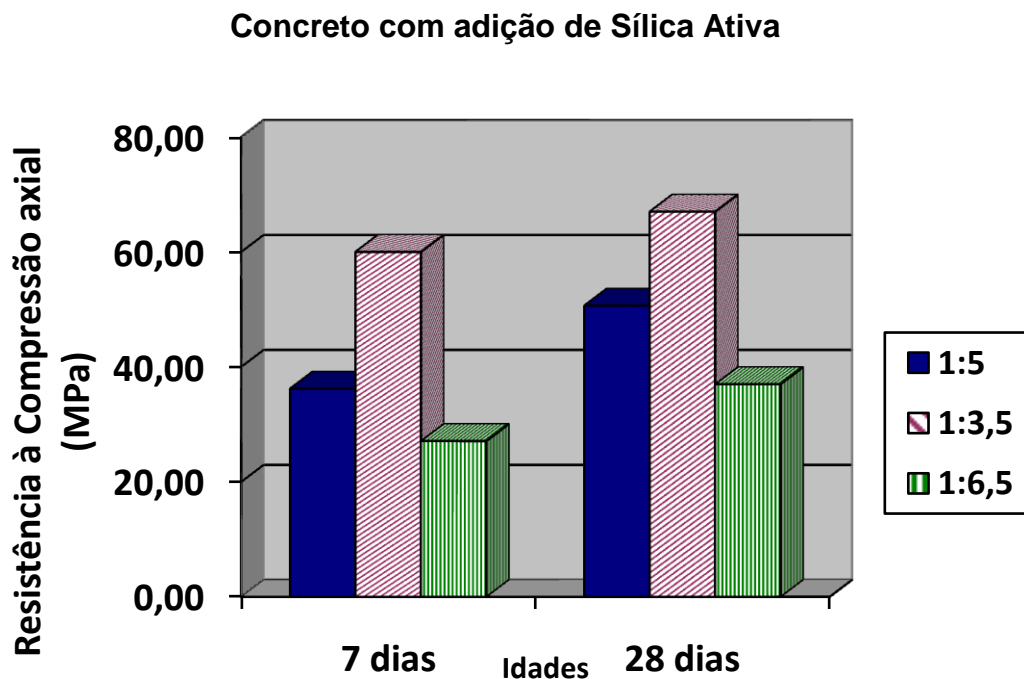


Figura 4.4- Resistência à compressão de concretos com sílica

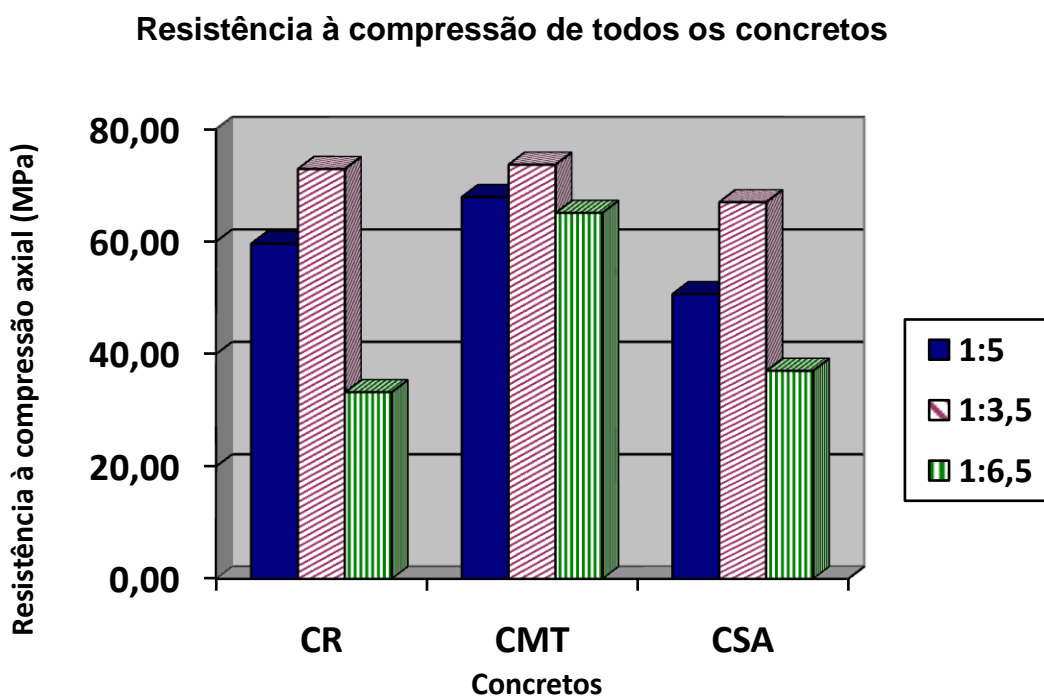


Figura 4.5- Gráfico resumindo os resultados de resistência à compressão axial (com 28 dias, pois mantiveram o mesmo comportamento dos 7 dias).

Entre os concretos estudados, verificou-se que o que apresentou melhores resultados em relação à resistência foi o com adição de metacaulim. Esta adição pozolânica foi a que teve melhor comportamento nos concretos tanto em relação à resistência, quanto a durabilidade. Já a sílica ativa, por ser mais fina, foi a que demandou mais água na sua produção, por isso pode-se justificar a menor resistência em comparação com o metacaulim, sabendo-se que quanto maior a quantidade de água, menor será a resistência.

Nas Figuras 4.2 a 4.5, em relação ao concreto referência (sem adição), percebe-se que a resistência dos concretos cresce de acordo com a diminuição da proporção agregado/aglomerante e com a idade conforme o esperado (para todas as idades).

Observou-se ainda que o concreto em questão alcançou grande parte da resistência nos primeiros 7 dias de idade, depois o aumento da resistência não é tão significativo.

De acordo com Lara (2003), em seu trabalho intitulado: “Análise da relação entre propriedade de transporte de água e os mecanismos de corrosão de armaduras”, realizou alguns estudos sobre o comportamento mecânico do concreto branco e demonstrou que este tipo de concreto não é diferente tanto daqueles produzidos com cimento portland convencional, porém, suas pesquisas foram realizadas com materiais locais, adequando o resultado para o tipo de cimento e agregados da região.

Sendo que a produção de concretos à base de cimento branco, é uma tecnologia muito recente e que cada fabricante possui cimentos distintos, torna-se importante conhecer o comportamento de concretos feitos com os cimentos portland brancos nacionais e verificar seu comportamento quando misturados com agregados que estão disponíveis no local.

Passuelo (2004), também analisou resistência e concluiu que o crescimento da resistência com a idade é similar ao de concretos de alta resistência inicial, atingindo ~ 80% da resistência final aos 7 dias. Um comportamento também

esperado pela pesquisadora, pois os cimentos portland brancos, por seus componentes químicos e sua finura, são bastante reativos.

Observou-se que a resistência e a massa específica são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor da massa específica dos agregados, maior resistência estes terão, e conseqüentemente essas características são transmitidas aos concretos produzidos, fato justificado principalmente pelo efeito pozolânico causado pelas adições que atuam na microestrutura dos poros proporcionando a obstrução dos vazios capilares devido à finura dos grãos, densificando a matriz da pasta de cimento e fortalecendo a zona de transição

Desta forma, o efeito pozolânico proporciona o aumento da resistência à compressão pela densificação da matriz da pasta de cimento e diminuição da zona de transição.

No traço 1:5, com a adição de metacaulim, houve um aumento considerável em relação ao concreto sem adição, tanto no de 7 dias quanto no de 28 dias. No traço rico foi onde obteve-se a maior resistência de todos os concretos, pois alcançou-se acima de 73 MPa.

O efeito provocado pela adição de 5% de sílica ativa nas misturas dos concretos produzidos, conforme esperado a adição foi benéfica, gerando um acréscimo médio de 6% nos resultados finais de resistência mecânica no traço 1:3,5 na idade de 7 dias.

Contudo este efeito foi mais intenso nas misturas com traço na proporção de 1:3,5. A maior eficiência da sílica ativa nas misturas, pode ser justificada por uma provável reação entre a sílica ativa e o carbonato de cálcio existente no calcário, formando C-S-H que se depositam no entorno do agregado graúdo, melhorando a zona de transição (DEL BOSQUE, 2013).

Verificou-se que em todas as proporções, com e sem adição, o concreto de traço 1:6,5 equipara-se à resistência dos concretos mais usuais na região metropolitana de Belém, pois os valores médios destas resistências é em torno de 25 a 30 MPa e

mesmo com o traço pobre chegou-se a valores maiores que os destes concretos mais comuns (resistências usuais sem a necessidade do uso de adições pozolânicas)

#### Influência do Traço, adição e idade na Resistência à compressão

A fim de avaliar as variáveis presentes nos concretos CR, CMT E CSA foi feita uma análise de variância para que se pudesse observar quais os níveis de significância em relação às adições pozolânicas. Na Tabela 4.3 constam os resultados da ANOVA para as variáveis traço, adição e idade.

Tabela 4.3- Análise de variância da resistência à compressão axial.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significância
<b>Traço</b>	4119,6	2	2059,8	92,355	0,00000	S
<b>Adição</b>	2161,4	2	1080,7	48,456	0,00000	S
<b>Idade</b>	923,1	1	923,1	41,391	0,00000	S
<b>Erro</b>	669,1	30	22,3			

SQ=soma quadrática  
Fcalc= fator calculado

GDL=grau de liberdade

MQ= média quadrática

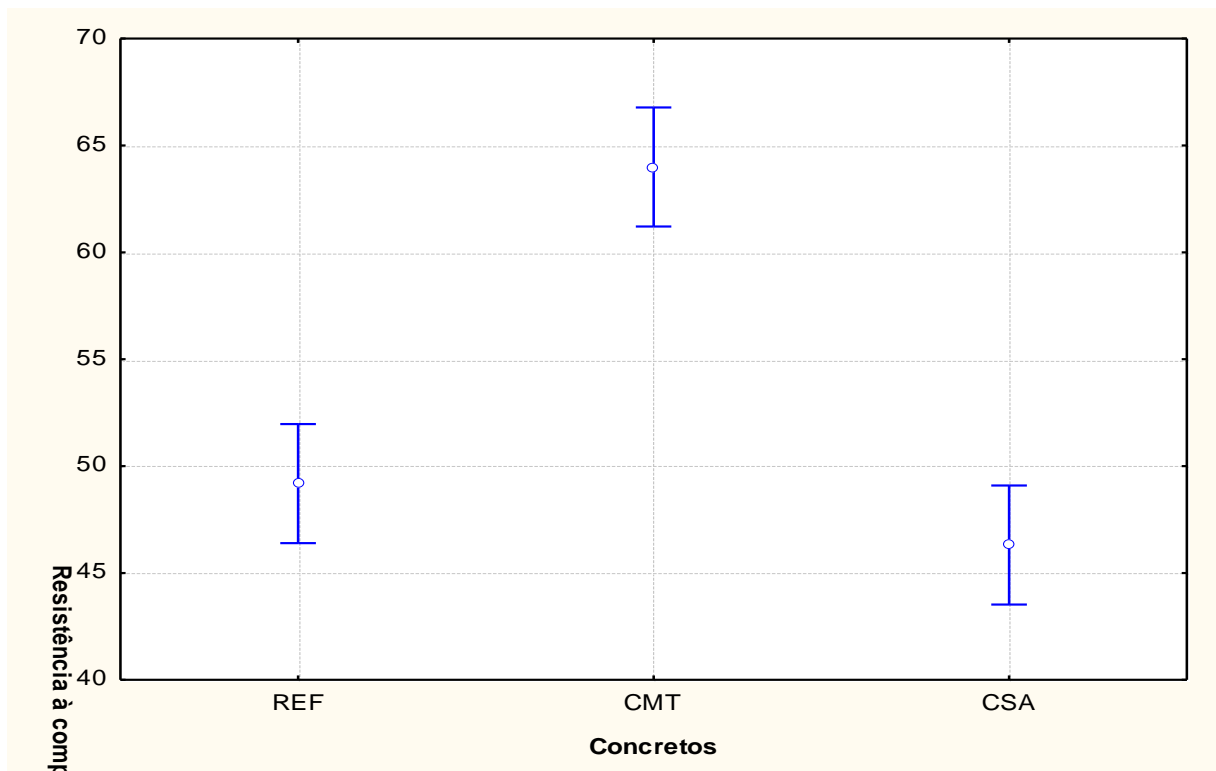


Figura 4.6- Efeito da variável “adição” na resistência à compressão axial.

Por meio da análise de variância da resistência à compressão é possível observar que CR e CMT bem como CMT e CSA possuem comportamento estatisticamente diferentes entre si, enquanto que CR e CSA são considerados estatisticamente iguais.

A variável adição se mostrou significativa para a resistência à compressão, ou seja, como o esperado, o uso das adições pozolânicas de metacaulim e sílica ativa tiveram influência ocasionar o aumento da resistência à compressão nos concretos estudados.

Panzer *et al* (2010) analisou que o cimento branco com adições, quando comparado individualmente com as suas matérias-primas originais, promove um aumento da resistência mecânica à compressão, redução da massa específica e, também uma mudança significativa do comportamento mecânico. As mudanças nas propriedades mecânicas estão associadas à hidratação da fase cimentícia, fato comprovado através de sua análise.

#### 4.4.1.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos em laboratório para os 18 corpos-de-prova ensaiados aos 07 e 28 dias são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.4- Valores médios encontrados para resistência à tração por compressão diametral.

<b>COMPRESSÃO À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)</b>						
<b>Traços</b>	<b>CR</b>		<b>CMT</b>		<b>CSA</b>	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
<b>1:5</b>	8,45	10,28	13,98	15,30	10,03	12,43
<b>1:3,5</b>	9,34	11,53	14,04	17,30	11,26	13,12
<b>1:6,5</b>	6,87	8,98	8,74	13,49	5,67	8,87

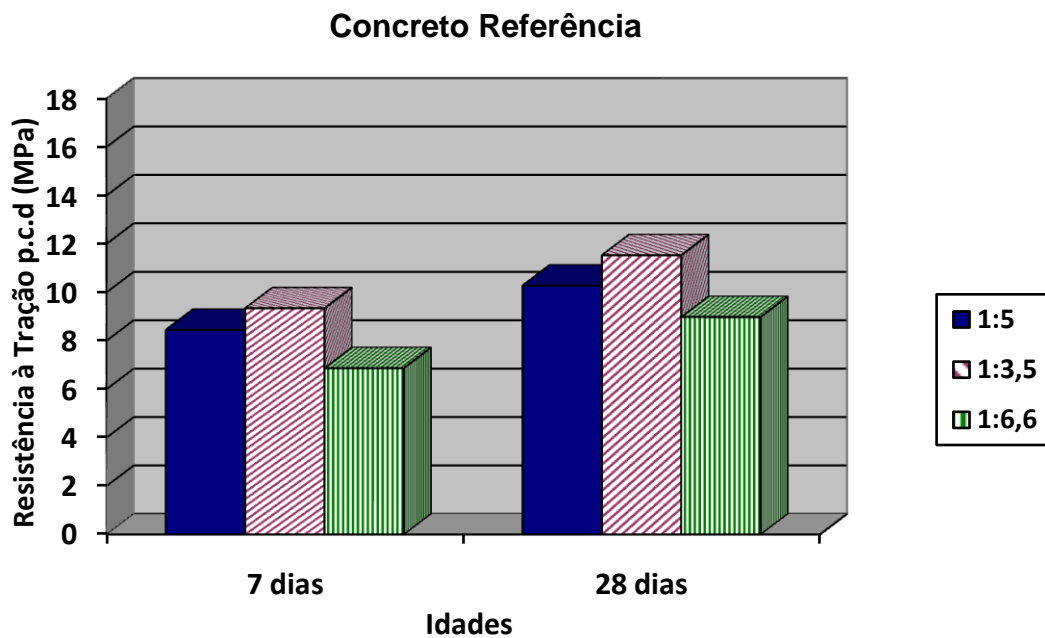


Figura 4.7- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos CR.

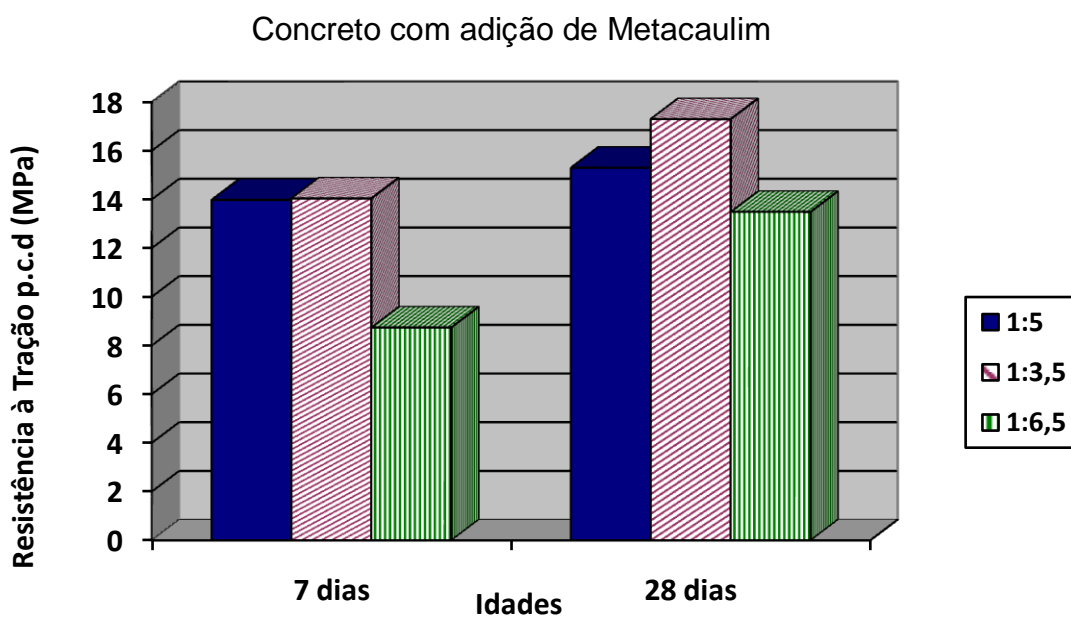


Figura 4.8- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos CMT.



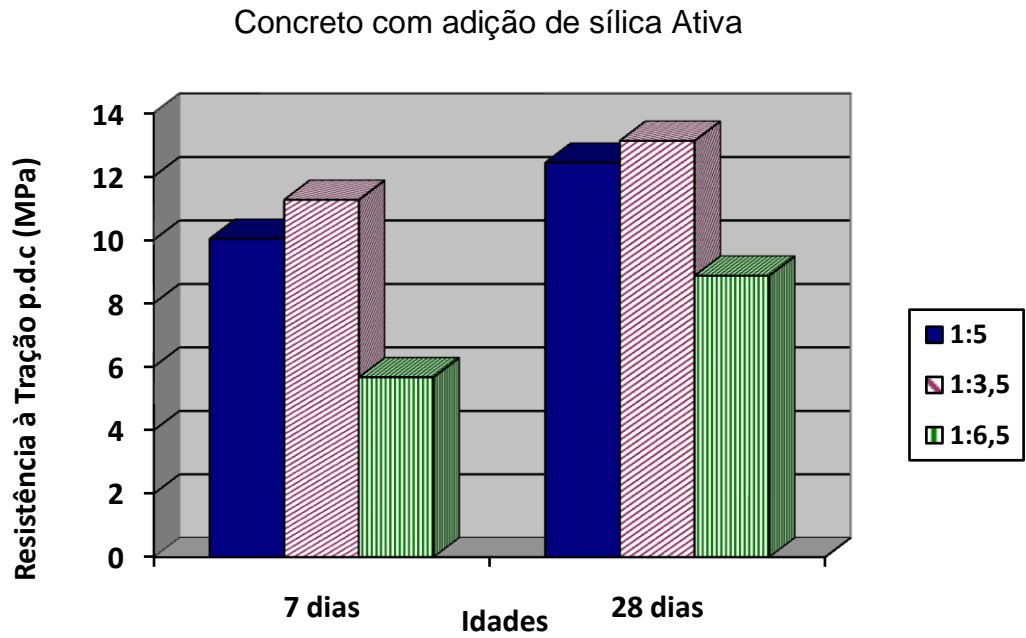


Figura 4.9- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos CSA.

onde p.c.d = por compressão diametral

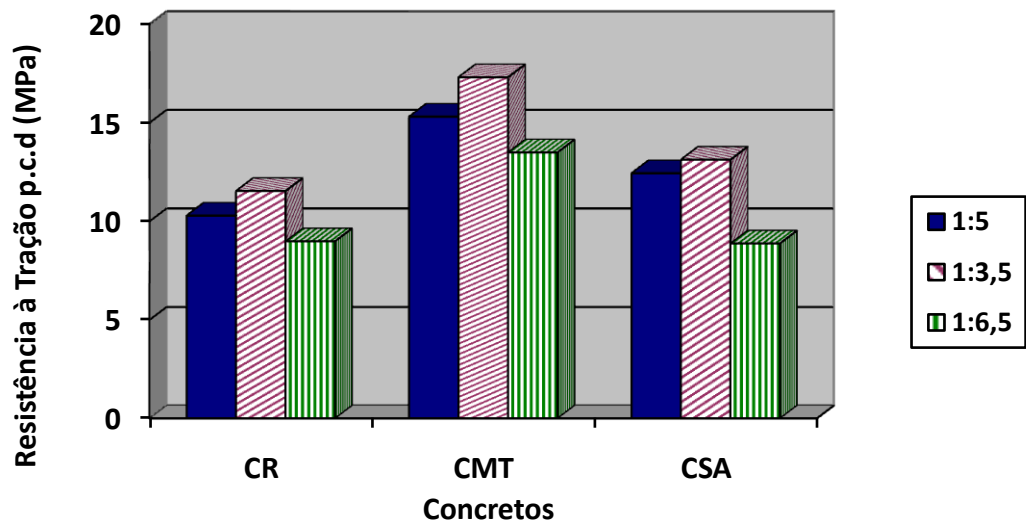


Figura 4.10 - Gráfico sumarizando os resultados de resistência à tração por compressão diametral (com 28 dias, pois mantiveram o mesmo comportamento dos 7 dias).

Tabela 4.5- Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	103,40	2	51,702	86,335	0,000000	S
Adição	138,546	2	69,271	115,673	0,000000	S
Idade	58,370	1	58,370	97,468	0,000000	S
Erro	17,966	30	0,599			

SQ=soma quadrática      GDL=grau de liberdade      MQ= média quadrática  
 Fcalc= fator calculado

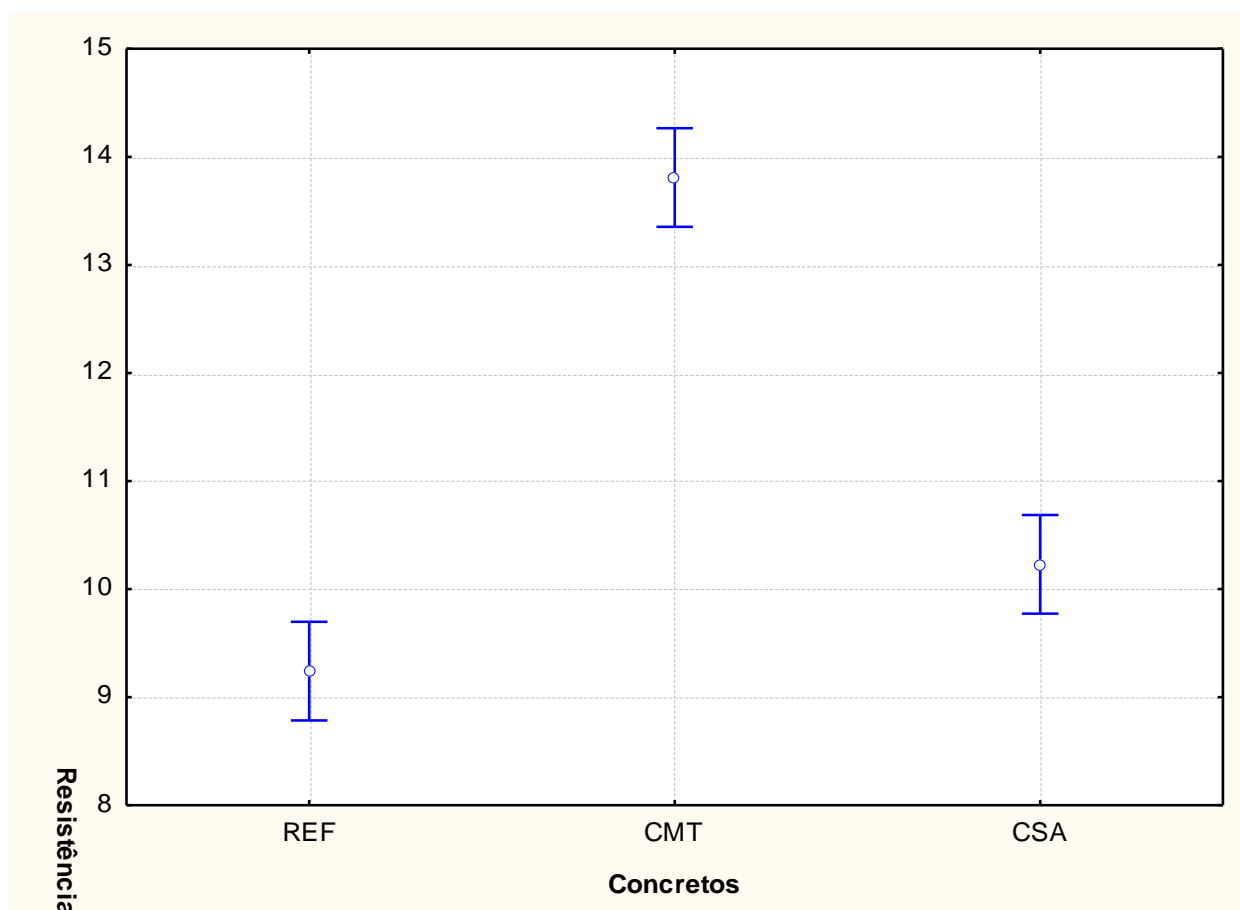


Figura 4.11- Efeito da variável “adição” na resistência à tração por compressão diametral.

Ao serem comparados os três grupos de concretos percebe-se que estatisticamente eles são diferentes entre si e as variáveis traço, adição e idade são significativas para esta propriedade do concreto.

O concreto referência (sem adição), apresentou valores de resistência à tração por compressão diametral inferiores aos produzidos com as adições pozolânicas.

Os concretos produzidos com 5% metacaulim (CMT) apresentaram aos 07 dias, valores de resistência à tração por compressão diametral superiores aos de referência (CR), com um acréscimo de 40% MPa. Já o concreto produzido com adição de sílica ativa (CSA), para essa mesma idade, apresentou um aumento de 16% MPa em relação ao concreto de referência. Para a idade de 28 dias, o crescimento dos valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos CMT, em relação aos de referência, foi de mais de 400 % e 340%, para os concretos CSA, respectivamente.

Souza (2009) verificou que as contribuições obtidas com o uso do metacaulim na resistência à tração, foram inferiores às obtidas na resistência à compressão. A diferença de contribuição tem como causa principal a pouca influência do efeito filler do metacaulim nesta propriedade. Esta situação ainda é reforçada pela maior contribuição evidenciada no ensaio de compressão diametral, em relação ao de flexão, visto que se tem no segundo uma menor área sujeita à tração. Este comportamento confronta com o relatado por Mehta e Monteiro (1994), que afirmam que o efeito filler, proporcionalmente, é maior na resistência à compressão que na resistência à tração.

Chaipanich e Torkittikul (2011), concluíram que a resistência à tração é diretamente proporcional a idade do concreto e ao teor de substituição onde estes são inversamente proporcionais a relação  $a/c$ , que foi observado também nesta pesquisa, o que é justificado pelo fato de que os valores de resistência à tração aumentam conforme aumenta-se a idade do rompimento, e neste caso também pelo uso das adições minerais.

Viu-se ainda, que o teor de substituição das adições pozolânicas e resistência à tração por compressão diametral são grandezas inversamente proporcionais, ou seja, na medida em que se aumenta o percentual de substituição, ocorre uma diminuição dos valores de resistência.

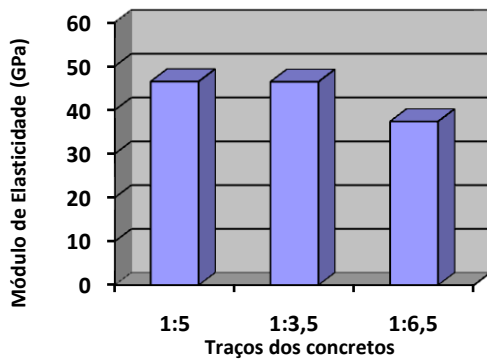
### 4.2.1.3 Módulo de Elasticidade

Ainda que a resistência mecânica seja o parâmetro principal do concreto, é importante levar em consideração o comportamento tensão-deformação deste material, pois os fatores que afetam a resistência da pasta de cimento também afetam a capacidade de deformação do concreto. A tabela 4.4 mostra os valores encontrados para o módulo de elasticidade dos concretos ensaiados.

Tabela 4.6- Valores encontrados para o módulo de elasticidade aos 28 dias.

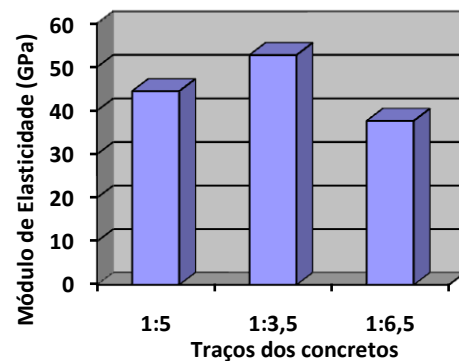
<b>Módulo de Elasticidade</b>			
<b>Traços</b>	<b>CR</b>	<b>CMT</b>	<b>CSA</b>
<b>1:5</b>	46,49	44,46	34,50
<b>1:3,5</b>	46,42	52,75	32,31
<b>1:6,5</b>	37,37	37,65	37,23

Concreto Referência (CR)



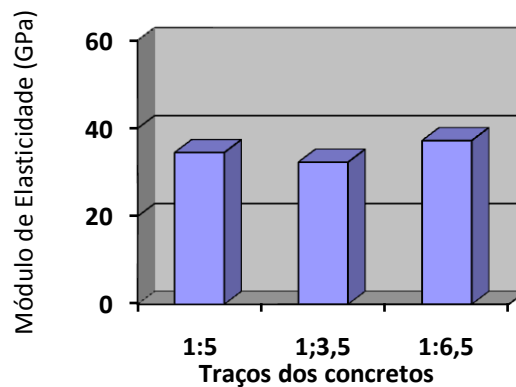
(a)

Concreto com Metacaulim (CMT)



(b)

Concreto com Sílica Ativa (CSA)



(c)

Figura 4.12 – Valores para o Módulo de Elasticidade. ( a) Concreto referência; (b) Concreto com Metacaulim;(c) concreto com Sílica Ativa.

Módulo de Elasticidade dos concretos aos 28 dias

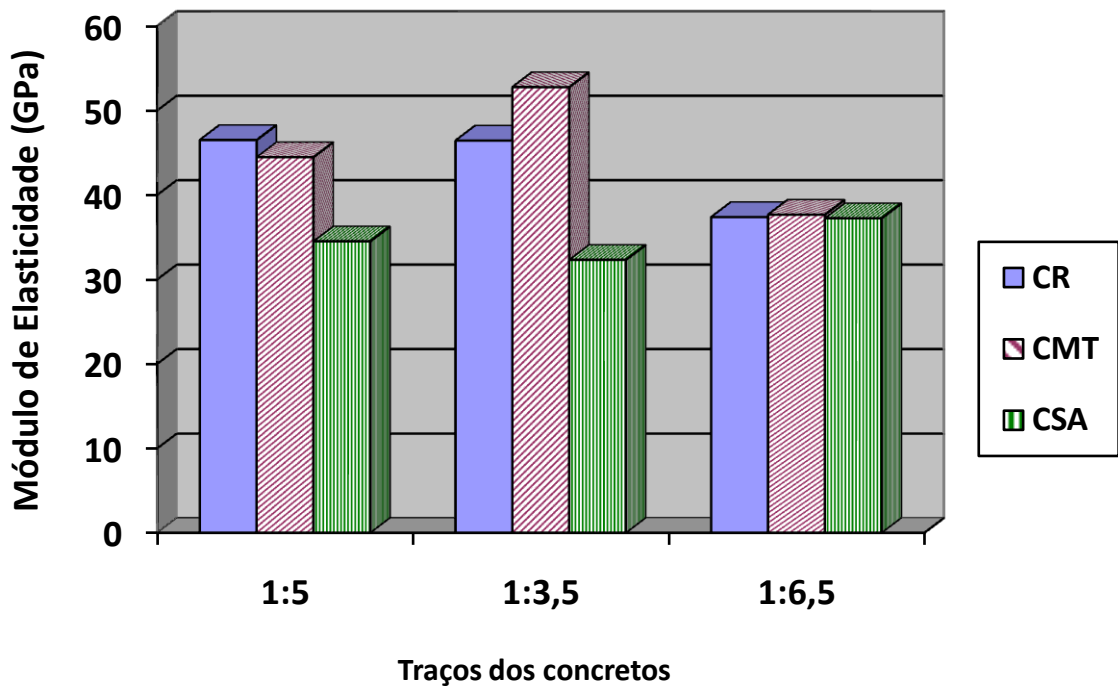


Figura 4.13- Comparação dos módulos de elasticidade dos concretos CR, CMT e CSA.

Tabela 4.7- Análise de variância do módulo de elasticidade.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	128,98	2	64,49	3,581	0,057705	NS
Adição	368,75	2	184,38	10,238	0,02137	S
Erro	234,12	13	18,01			

SQ=soma quadrática      GDL=grau de liberdade      MQ= média quadrática  
 Fcalc= fator calculado

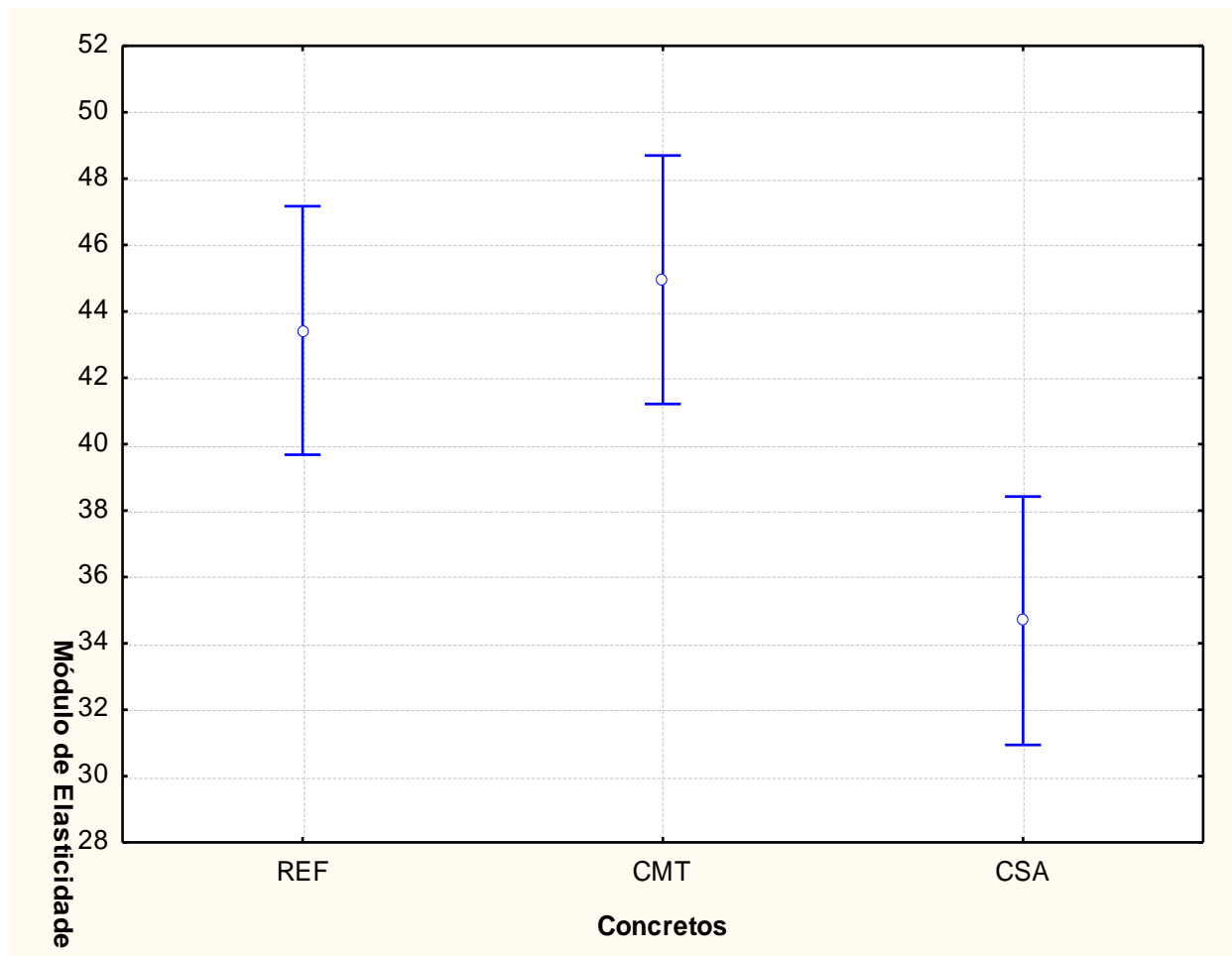


Figura 4.14- Influência da variável “adição” no módulo de elasticidade.

A análise mostra que há interferência estatística entre os concretos referência (CR), CMT e CSA não havendo diferença estatística relevante nos módulos de elasticidade dos concretos de REF e CMT.

Como mostra os resultados apresentados, os valores de módulo de deformação tangente, obtidos para o concreto CMT, foram 12% superiores aos apresentados pelo concreto de referência.

Em média, o valor do módulo de deformação para os concretos produzidos com metacaulim apresentou um aumento de 13,6% aos, em relação ao concreto de referência no traço de 1:3,5. Já o concreto com traço pobre, apresentou resultados próximos para os três grupos de concretos CR, CMT e CSA.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), em materiais compósitos, como o concreto, a distribuição das frações volumétricas, a massa específica e o módulo de deformação dos principais constituintes e da característica da zona de transição, determinam o comportamento de deformação. Sendo a massa específica inversamente proporcional a porosidade, fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição, também afetam a capacidade de deformação do concreto. Como a porosidade da matriz e da zona de transição é fundamental para a capacidade de deformação dos concretos, a relação água/aglomerante passa a se constituir em um parâmetro de controle importante.

Como a relação água/aglomerante da pesquisa é igual a 0,35, que é uma relação baixa, contribuiu para a diminuição de vazios na pasta resultando em uma zona de transição mais forte e com menos porosidade.

#### **4.2.1.4 Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade**

O módulo de elasticidade e a resistência axial estão relacionados e à medida que se aumenta a relação agregado/aglomerante, esses parâmetros também aumentam, dando uma maior densificação ao concreto diminuindo o risco de fissuras e trincas posteriores.

Dellinghausen *et al* (2012) Também verificou que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão, tem-se também uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Esta relação tende a se tornar uma ferramenta de grande importância para a execução de projetos estruturais, principalmente quando do uso de concretos com emprego de novos materiais, como o metacaulim.

Para Lubeck *et al* (2012) O módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade do agregado utilizado nesse concreto e que o crescimento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão axial.

## 4.2.2- Ensaios de durabilidade

### 4.2.2.1 Absorção por capilaridade

A análise da absorção é importante uma vez que caracteriza o fenômeno da absorção e fluxo de água pela porosidade, e avalia a tendência de maior ou menor absorção em um dado tempo. Esta propriedade traduz um conjunto de fenômenos que ocorre em função da quantidade de poros existentes no concreto. Os valores de absorção por capilaridade estão apresentados na Tabela 4.8 e as figuras da página seguinte.

Tabela 4.8- Valores de absorção por capilaridade encontrados aos 28 dias.

ABSORÇÃO (g/cm <sup>2</sup> *100)			
Traços	Concretos		
	CR	CMT	CSA
1:5	3,8	3,4	3,2
1:3,5	2,7	2,5	2,5
1:6,5	4,6	3,7	3,8

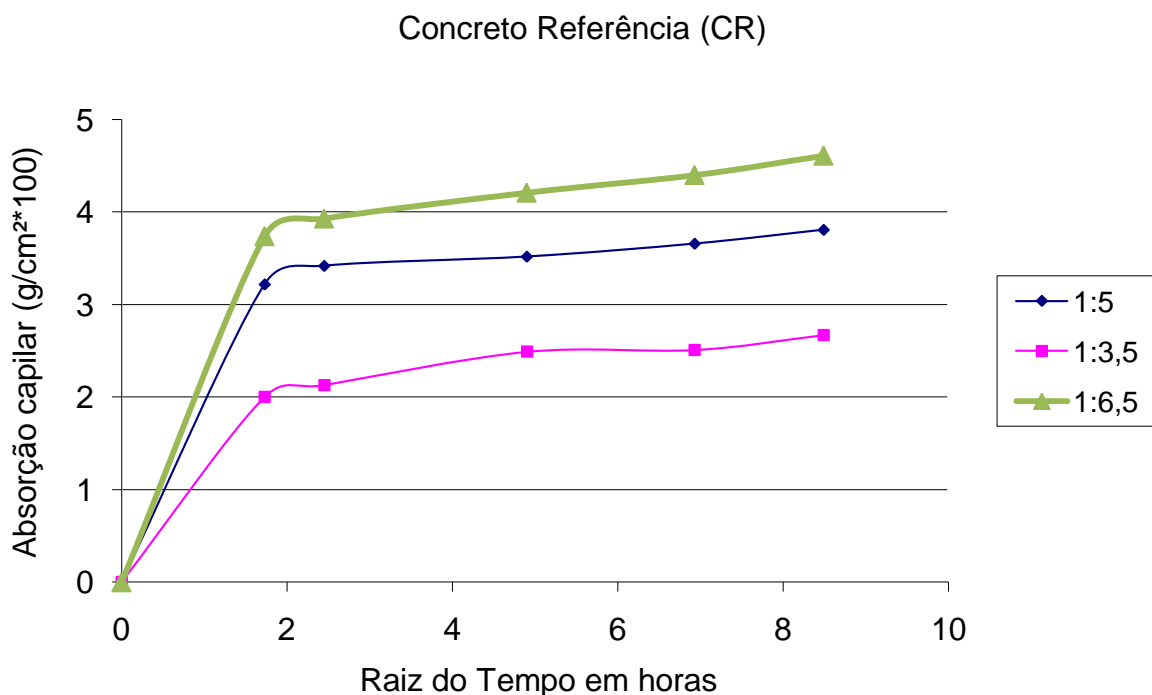


Figura 4.15 – Absorção capilar do concreto referência aos 28 dias ao longo de 72 horas.



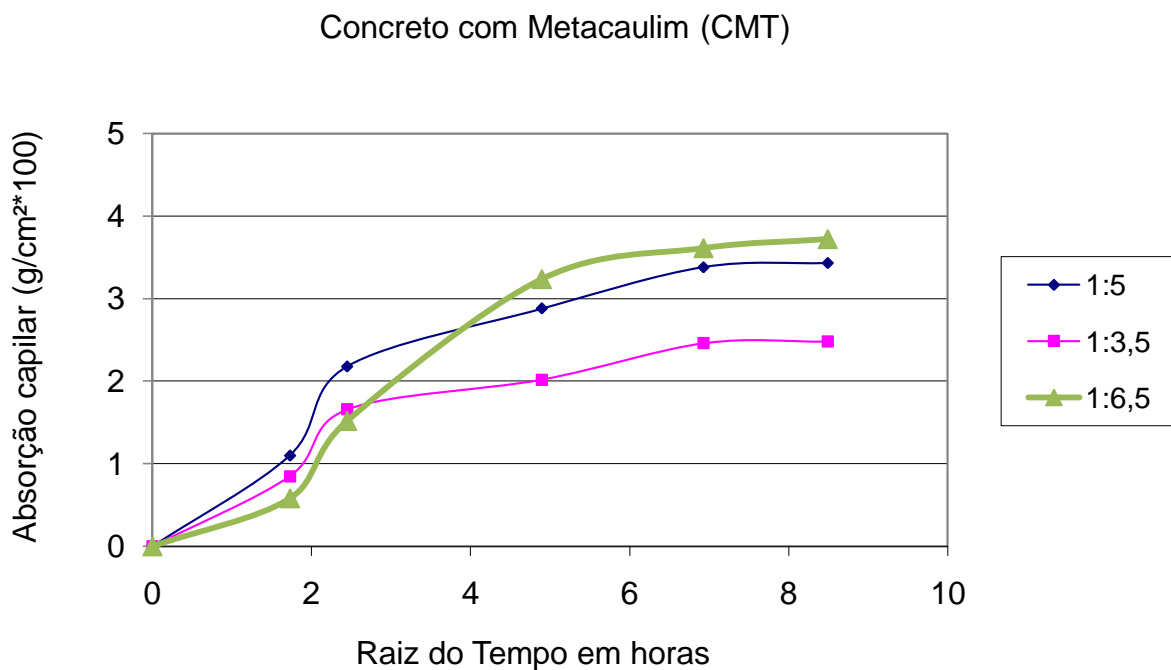


Figura 4.16 – Absorção capilar do concreto com Metacaulim aos 28 dias ao longo de 72 horas.

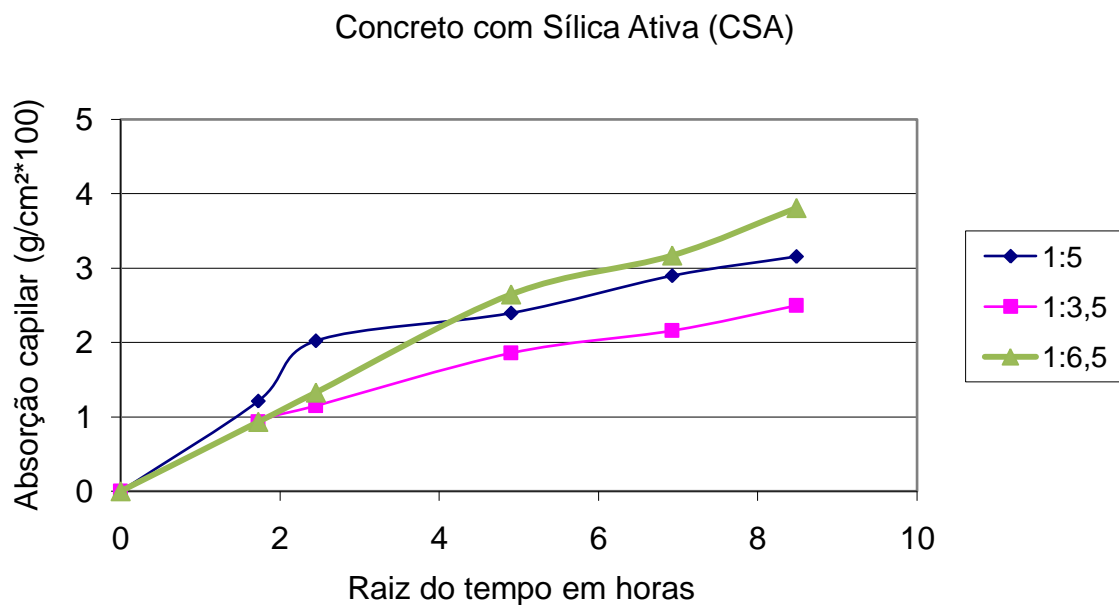


Figura 4.17 – Absorção capilar do concreto com sílica Ativa aos 28 dias ao longo de 72 horas.

Tabela 4.9- Análise de variância da absorção capilar.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	6,5644	2	3,2822	129,736	0,000000	S
Adição	1,0711	2	0,5356	21,169	0,000081	S
Erro	3,3289	13	0,0253			

SQ=soma quadrática      GDL=grau de liberdade      MQ= média quadrática  
 Fcalc= fator calculado

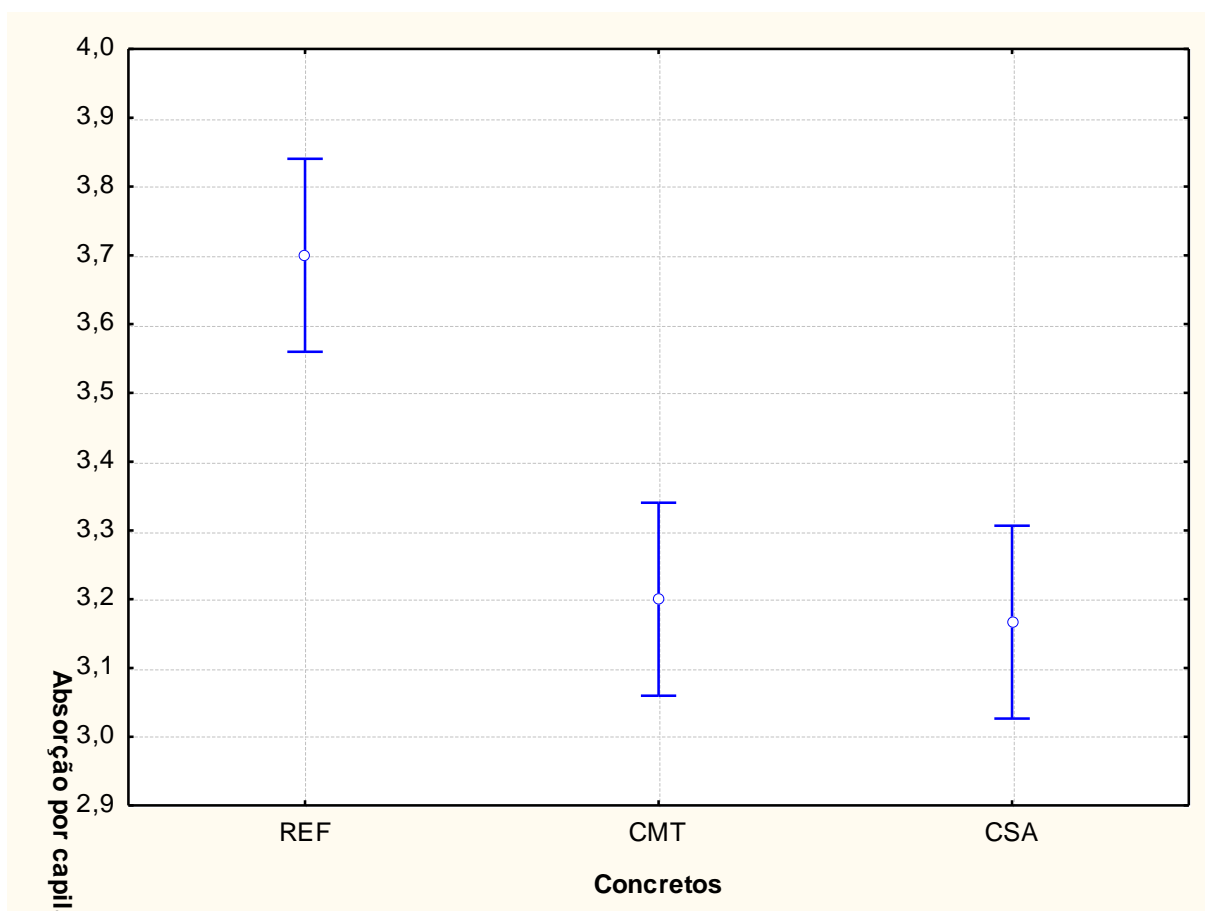


Figura 4.18- Influência da variável “adição” na absorção capilar.

Observa-se que o concreto com adição de metacaulim, figura 4.13, apresentou valor médio de absorção de água aos 28 dias. Verificou-se que o decréscimo do percentual de absorção de água, do concreto CSA no traço de 1:5 em relação ao de referência foi de 17%. Essa diferente absorção do concreto referência em relação aos concretos com adições (CMT e CSA) foi verificada também por meio da análise de variância como observado na figura 4.17.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.5, verifica-se que na medida em que se aumenta a quantidade de adição no concreto, ocorre uma diminuição nos percentuais de absorção de água. Tal decréscimo pode ser atribuído ao efeito pozolânico da adição provocando mudança na microestrutura, pois de acordo com Neville e Brooks (2013), sua granulometria está distribuída em tamanhos de partículas inferiores a  $1\mu\text{m}$ , com diâmetro médio de  $0,1\mu\text{m}$  e como o diâmetro médio do cimento é 100 vezes maior, a sílica completa a granulometria dos materiais utilizados na produção do concreto e tornando este material muito mais compacto. Observa-se que no concreto referência, o traço que teve maior absorção de água foi o 1:6,5, pois como é o traço pobre, sua interação entre os elementos permite que haja algum vazio, mesmo que mínimo, por onde a água possa percorrer.

Os grupos de concretos estudados, com os três traços de proporção agregado/aglomerante com adição de sílica ativa, obteve a menor absorção de água, pois esta adição pozolânica contribui para a diminuição da quantidade de vazios capilares, diminuindo a possibilidade da água percolar no concreto.

Barin (2011) apud Frizzo *et al.* (2002), comparando misturas com diferentes tipos e teores de adição com uma mistura de referência, constatou menor absorção capilar naquelas com adição, independente do teor e da relação a/agl.

Ashteyat *et al* (2011), em seu estudo sobre absorção constatou que tempo de secagem do seu concreto reduziu de forma significativa, e que quanto maior a quantidade de adição como substituto parcial do cimento, menor será a absorção, pois a adição preencheu os possíveis vazios criados pela hidratação do concreto.

Coleman (2013), também concluiu que o aumento no teor da adição resultou numa diminuição da absorção capilar, com exceção da mistura composta com 50% de adição.

Reis (2013), Em seus resultados de absorção, assim como nos concretos convencionais, os concretos com agregados reciclados cerâmicos, notou que quando há o aumento do fator água cimento tendeu a aumentar a absorção do

concreto produzido. Como já eram esperados, sempre os maiores valores de absorção ocorreram para o maior fator água/cimento utilizado na mistura.

#### 4.2.2.2 Penetração acelerada de íons cloretos

A resistência do concreto à penetração de cloretos que, pode ser associada a carga passante e os valores aferidos no ensaio de penetração de cloreto, bem como classificação do concreto, quanto ao risco de penetração de cloreto, estão descritos na tabela 4.10.

Tabela 4.10- Ensaio de penetração acelerada de íons cloretos nos concretos CR, CMT e CSA.

<b>PENETRAÇÃO DE CLORETOS (Q)</b>						
<b>Traços</b>	<b>CR</b>		<b>CMT</b>		<b>CSA</b>	
	Q (Coulomb)	Risco	Q (Coulomb)	Risco	Q (Coulomb)	Risco
<b>1:5</b>	3915	M	819	M B	239	M B
<b>1:3,5</b>	3357	M	0	D	228	M B
<b>1:6,5</b>	4365	A	1458	B	297	M B
M= moderado    B=baixo    D=desprezível A=alto        MB= Muito baixo						

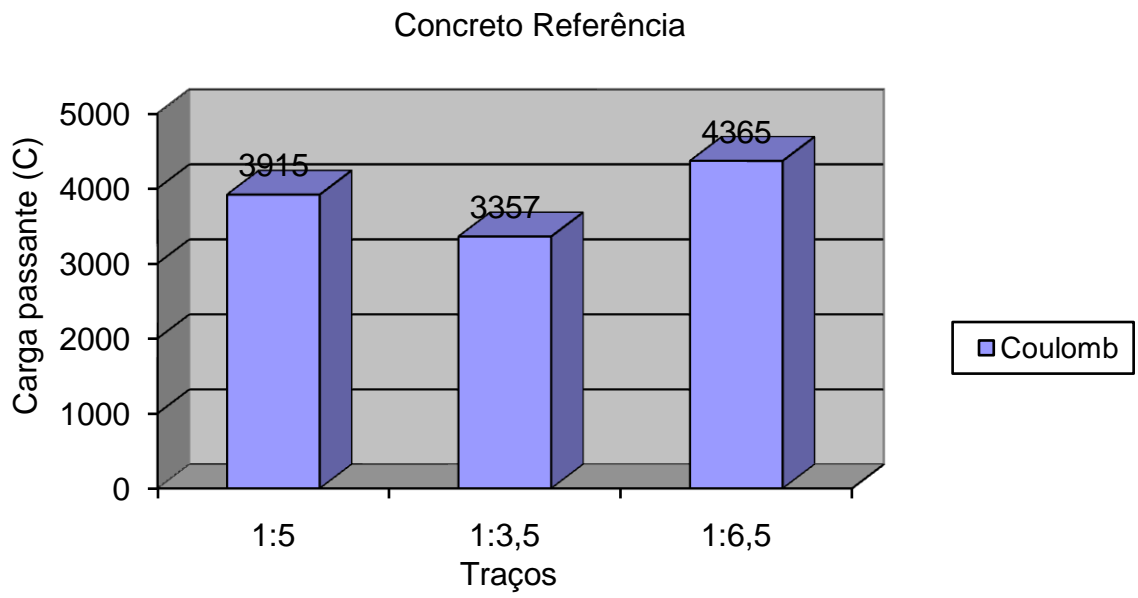


Figura 4.19 - Valores de penetração acelerada de íons cloretos nos concretos referência.

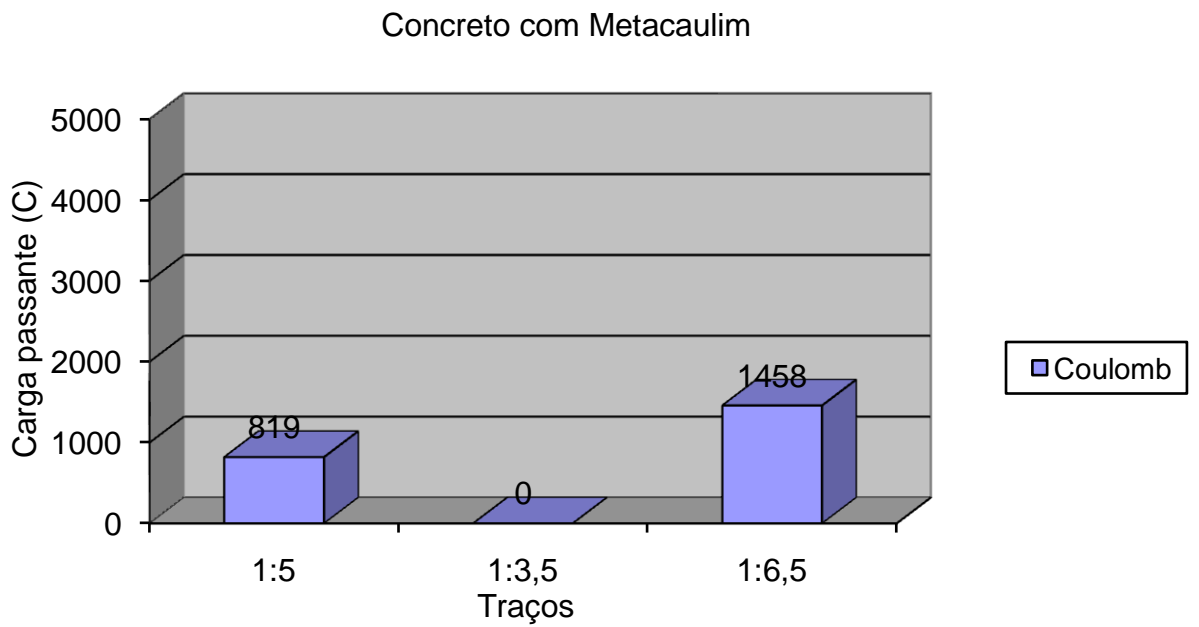


Figura 4.20- Valores de penetração acelerada de íons cloretos nos concretos com metacaulim.

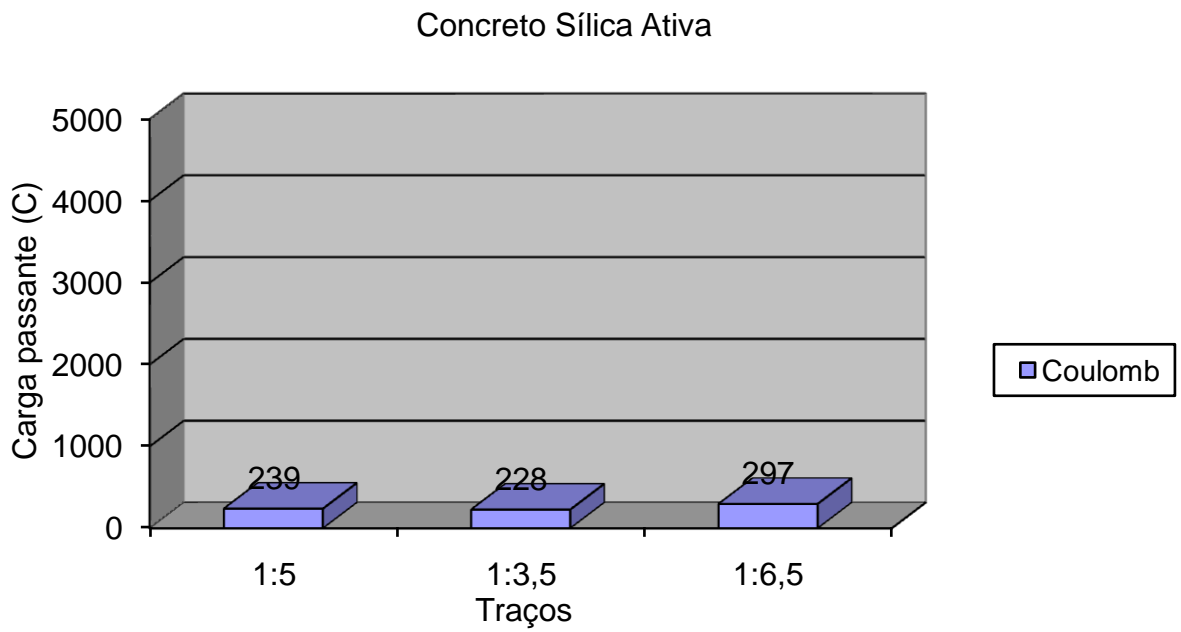


Figura 4.21- valores de penetração acelerada de íons cloretos nos concretos com sílica.

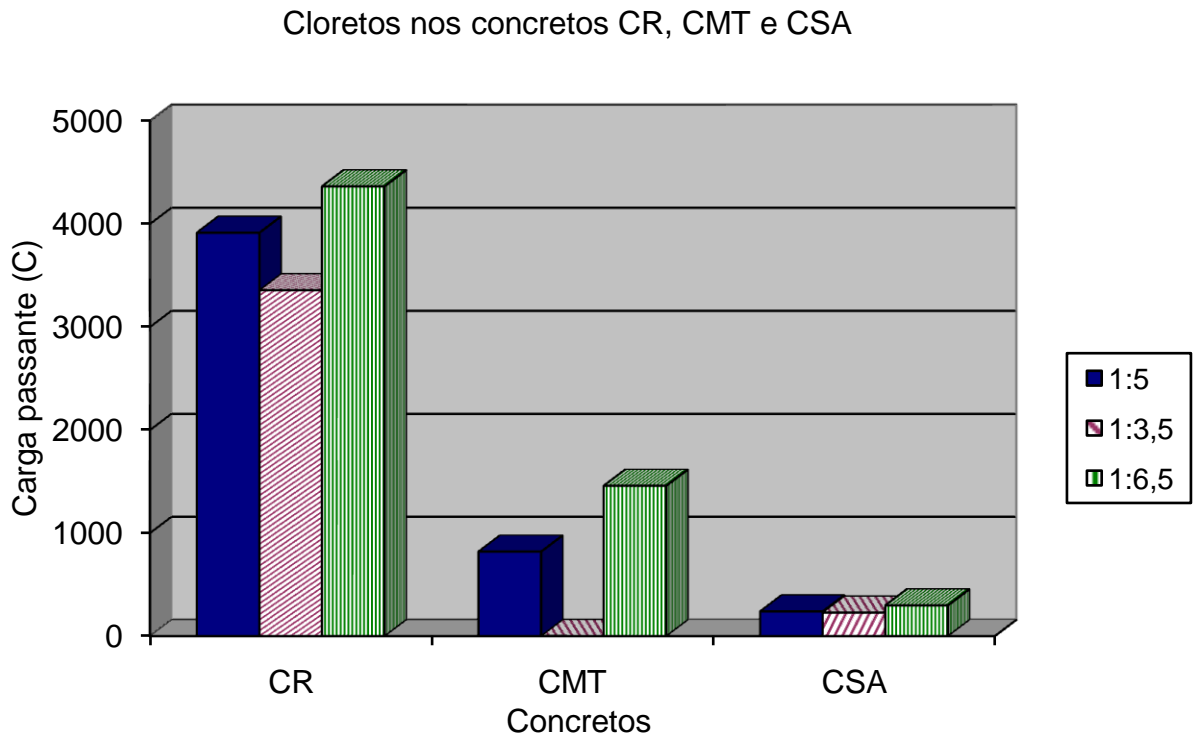


Figura 4.22- Gráfico resumindo os resultados de penetração acelerada de íons cloretos para todos os concretos estudados.

Para uma melhor visualização dos resultados, na tabela 4.11 encontram-se os valores proporcionais das misturas com adições de metacaulim em relação às misturas referência.

Tabela 4.11- Análise de variância da penetração de íons cloretos.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
<b>Traço</b>	2148528	2	1074264	13,7796	0,000614	S
<b>Adição</b>	46249088	2	23124544	296,6192	0,000000	S
<b>Erro</b>	1013485	13	77960			

SQ=soma quadrática      GDL=grau de liberdade      MQ= média quadrática  
Fcalc= fator calculado

A partir da análise de variância da tabela 4.11, nota-se que as variáveis “traço” e “adição” apresentam influência significativa na penetração de íons cloreto nos concretos ensaiados. A influência dos efeitos das adições consta no gráfico 4.23.

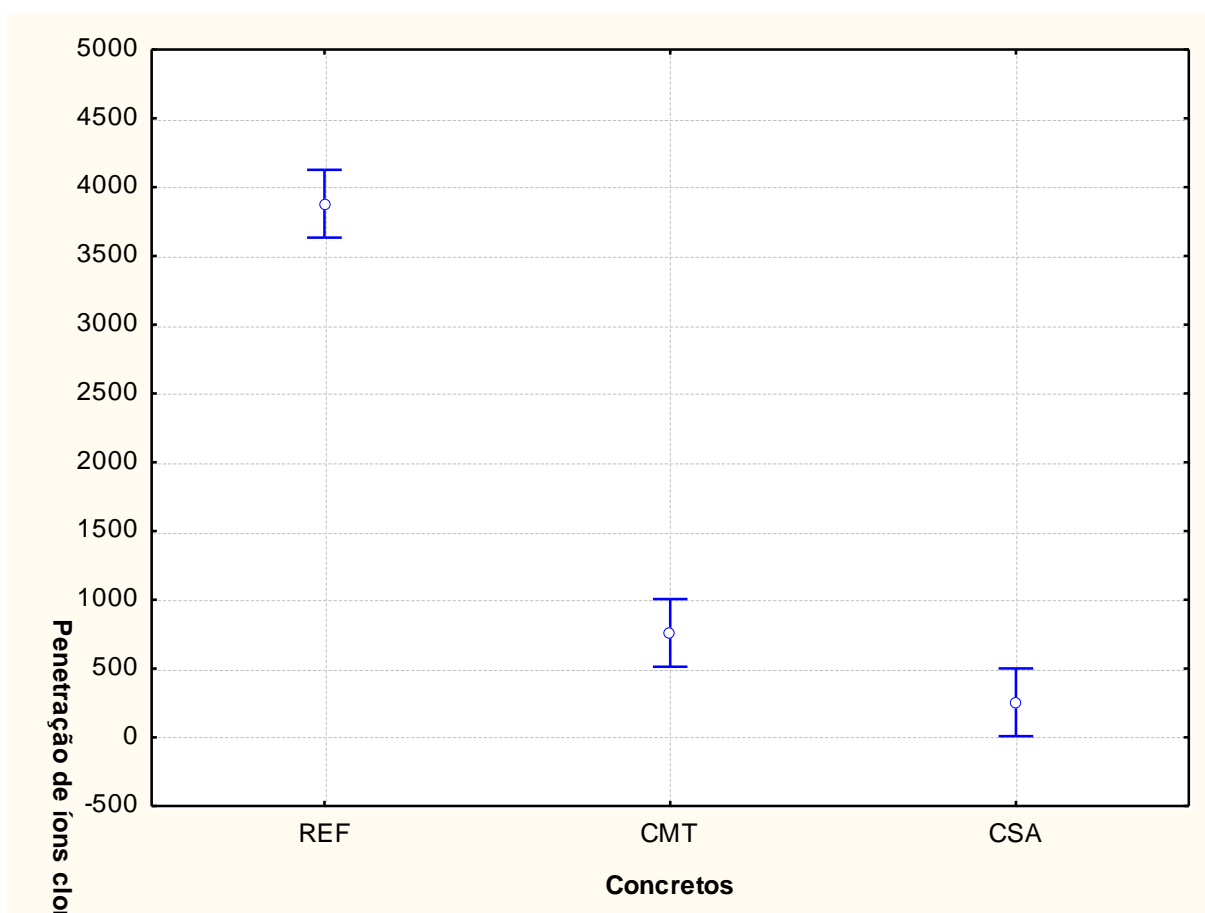


Figura 4.23- Influência da variável “adição” na penetração de íons cloretos.

De posse dos resultados das amostras ensaiadas, adotou-se a média estatística como valor representativo. O concreto referência apresentou uma tendência pequena de diminuição da carga passante entre as proporções estudadas variando de 11% a 14%. A partir da análise de variância leva-se a concluir que esta variável é significativa a um nível de confiança de 99% pois o valor de “p” foi menor que 0,01.

A amostra com adição de metacaulim no traço 1:3,5, não registrou passagem de corrente, sendo este material praticamente impermeável.

Como o filer calcário está presente em grande quantidade no cimento branco, reage com  $C_3A$  e com o  $C_4AF$  formando monocarboaluminatos de cálcio, estes diminuem o fluxo de penetração de cloretos na solução, restando uma menor quantidade de  $C_3A$  e  $C_4AF$  para fixar os cloretos livres e já há uma redução do material cimentício no cimento pela substituição do clínquer pelo filer calcário (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Dellinghausen *et al* (2012), comparando concretos de cimento portland branco com o cinza, investigou a influência da penetração de íons cloreto e permeabilidade ao oxigênio do concreto. Os resultados mostraram que a substituição parcial de cimento pela adição, teve penetração cloreto de 37% e 47 %, as quais foram menores do que os de misturas de compostos semelhantes do cimento Portland cinza.

Reis (2013), notou que todos os concretos que continham agregado reciclado, independentemente da taxa de saturação, elevam bastante o risco de penetração de íons cloretos, considerado alto em comparação com os concretos referência que predominantemente situaram-se na faixa de risco moderado.

#### **4.2.2.3 Carbonatação**

Como forma de estimar a durabilidade de concretos com cimento portland branco foi realizado o ensaio de carbonatação. Estes ensaios foram realizados na câmara de carbonatação com concentração de  $10\pm 2\%$  de  $CO_2$  elaborada no laboratório de engenharia civil da UFPA. Para composição da solução, foi seguida a proposta do



RILEM (2001), na qual se utilizaram 70% de álcool PA, 30% de água destilada para 1% de fenolftaleína em pó.

Após retirada a amostra, aplicou-se solução de fenolftaleína sobre a face interna da seção a fim de identificar as regiões carbonatadas. Os valores encontrados pelo ensaio de medição de profundidade de carbonatação nos concretos estudados estão expostos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12- Profundidade de carbonatação nos concretos CR, CMT e CSA.

<b>CARBONATAÇÃO (mm)</b>									
<b>dias</b>	<b>CR</b>			<b>CMT</b>			<b>CSA</b>		
	<b>1:5</b>	<b>1:3,5</b>	<b>1:6,5</b>	<b>1:5</b>	<b>1:3,5</b>	<b>1:6,5</b>	<b>1:5</b>	<b>1:3,5</b>	<b>1:6,5</b>
AC	4	2	4	2	2	3	2	1	4
7 dias	4	3	5	3	3	4	3	1	4
14 dias	4	4	6	3	3	5	3	1	5
28 dias	5	4	8	5	4	6	3	1	5
35 dias	6	5	10	6	4	7	4	1	6
42 dias	6	5	10	6	4	7	4	1	6

AC= Antes de entrar na câmara de carbonatação.

### Concreto Referência

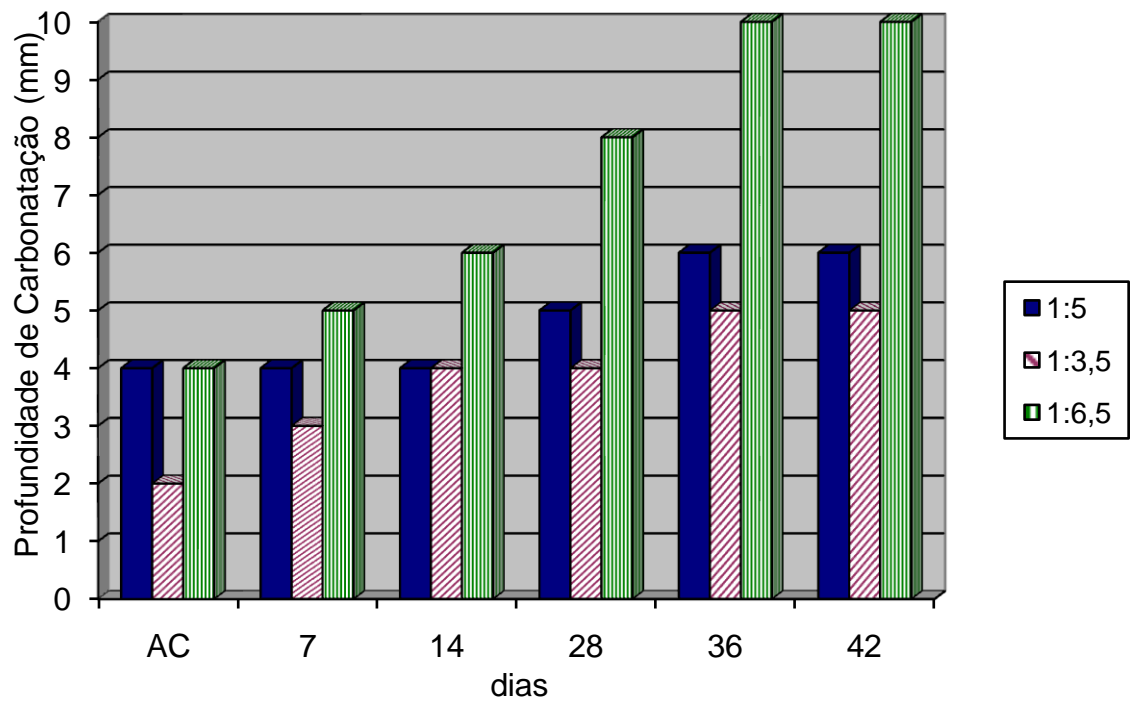


Figura 4.24- Carbonatação do concreto referência ao longo de 42 dias.

### Concreto com Metacaulim

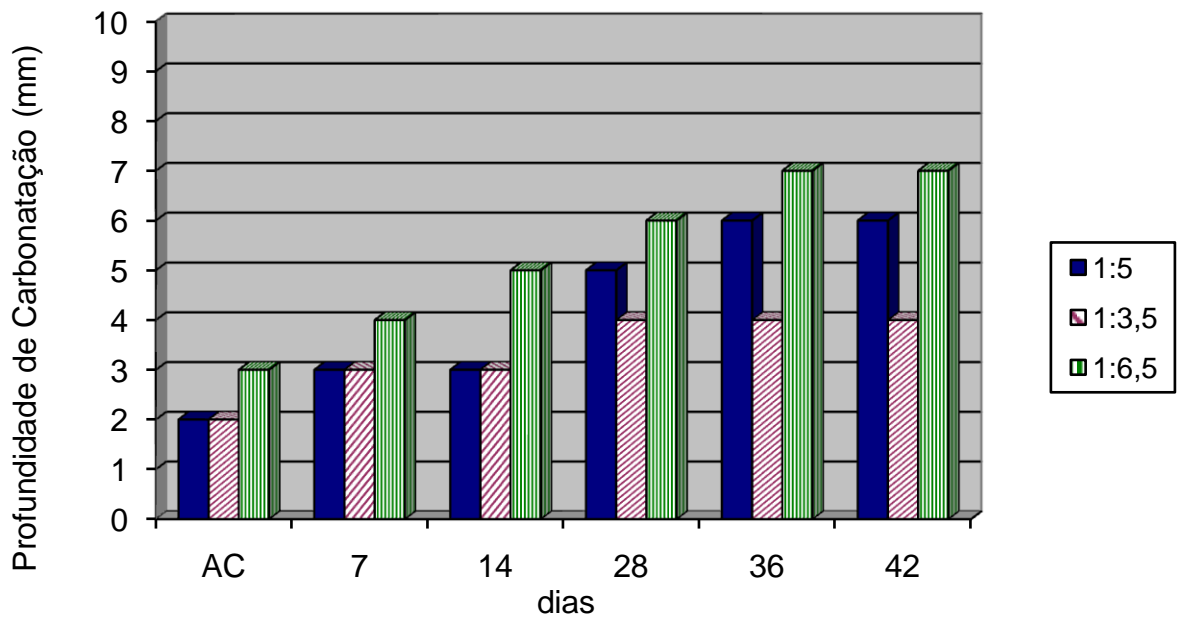


Figura 4.25- Carbonatação do concreto com metacaulim ao longo de 42 dias.

### Concreto com Silica Ativa

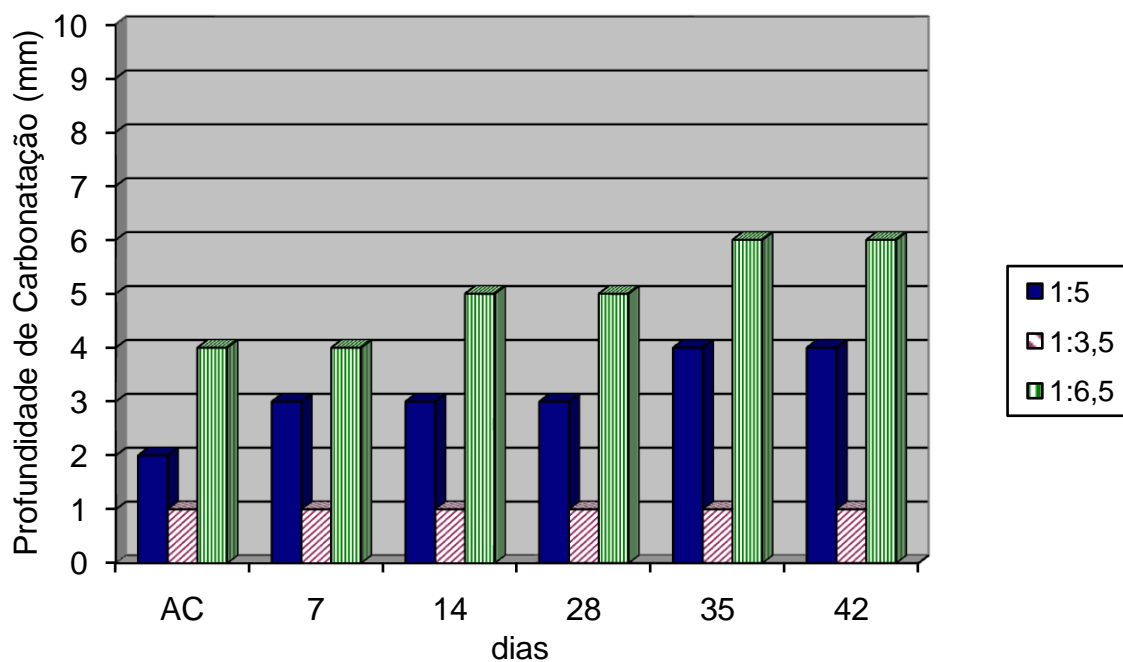


Figura 4.26- Carbonatação do concreto com sílica.

As medidas de profundidade de carbonatação foram feitas antes de entrar na câmara, com 7, 14, 28, 35 e 42 dias do início de ensaio de carbonatação acelerada. A profundidade de carbonatação foi medida com paquímetro eletrônico nas fatias de concreto recém cortadas do corpo de prova. Conforme o esperado, viu-se que o processo de carbonatação foi maior nas amostras com menor relação agregado/aglomerante (traço pobre), como mostra a Figura 4.27.



Figura 4.27- Aparência dos corpos-de-prova após o ensaio de carbonatação acelerada, (a) antes de entrar na câmara, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias, (e) 35 dias e (f) 42 dias respectivamente.

Tabela 4.13- Análise de variância da carbonatação dos concretos.

Efeito	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	89,185	2	44,593	68,441	0,00	S
Adição	175,404	2	87,704	134,608	0,00	S
Idade	117,074	5	23,415	35,937	0,00	S
Erro	63,852	98	0,652			

SQ=soma quadrática      GDL=grau de liberdade      MQ= média quadrática  
Fcalc= fator calculado

Durante o tempo de permanência na câmara de gás carbônico, em média os maiores acréscimos na profundidade de carbonatação ocorreram nos períodos de 0 à 7, 7 à 14 e 14 a 28 dias como mostra a figura 4.26 e 4.27. Esta observação também foi feita por Pauletti (2009) que em seu estudo sobre a carbonatação observou que as profundidades carbonatadas eram maiores nas primeiras idades,

assim pode-se afirmar que os concretos produzidos com adições pozolânicas também obedecem ao mesmo comportamento.

### Profundidade de Carbonatação em relação à adição

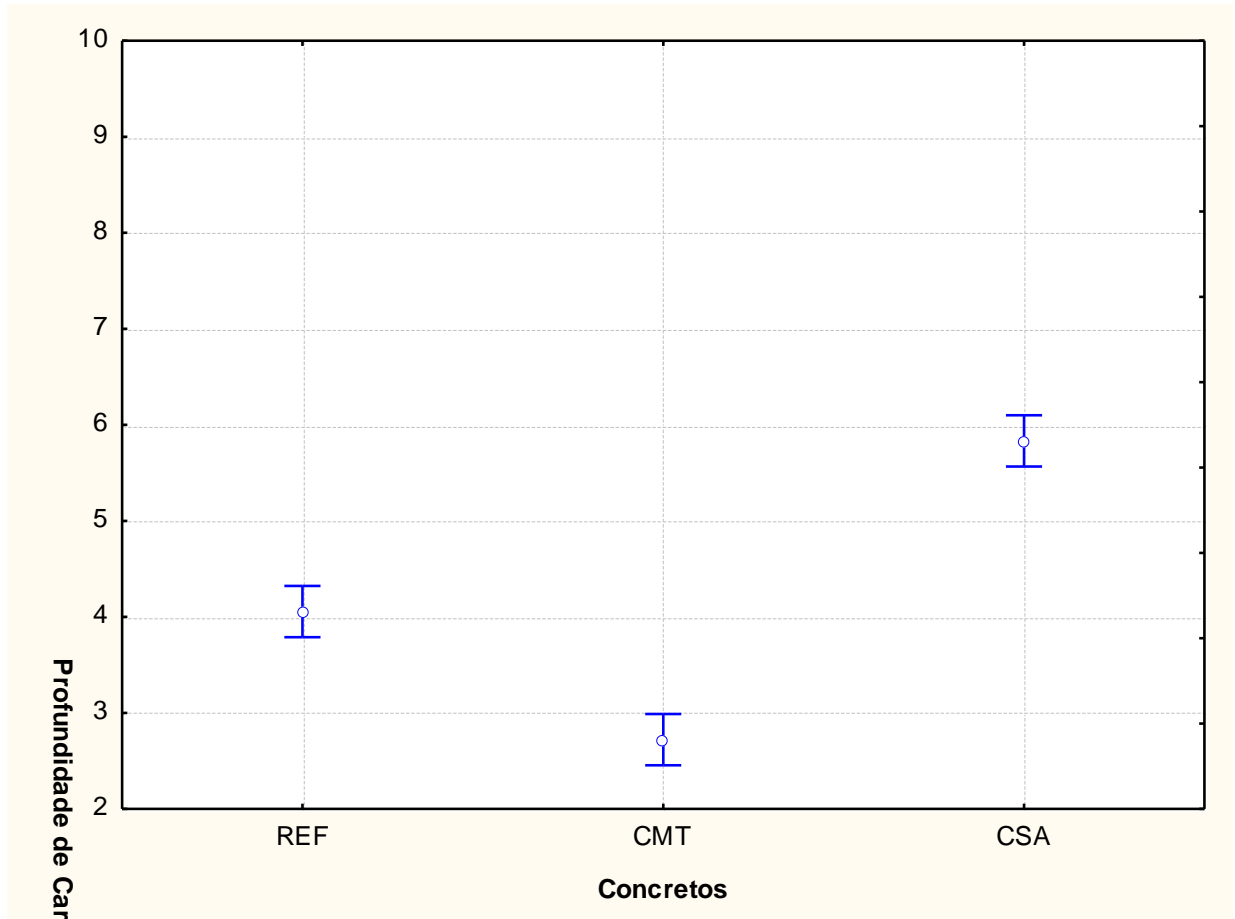


Figura 4.28- Influência da variável “adição” na carbonatação.

Quanto à variável “adição”, analisando a Figura 4.28 e os resultados obtidos, nota-se um comportamento da carbonatação diferente para todas as proporções (CR, CMT e CSA), sendo mais intensa no concreto com adição de sílica ativa.

### Profundidade de Carbonatação em relação à idade

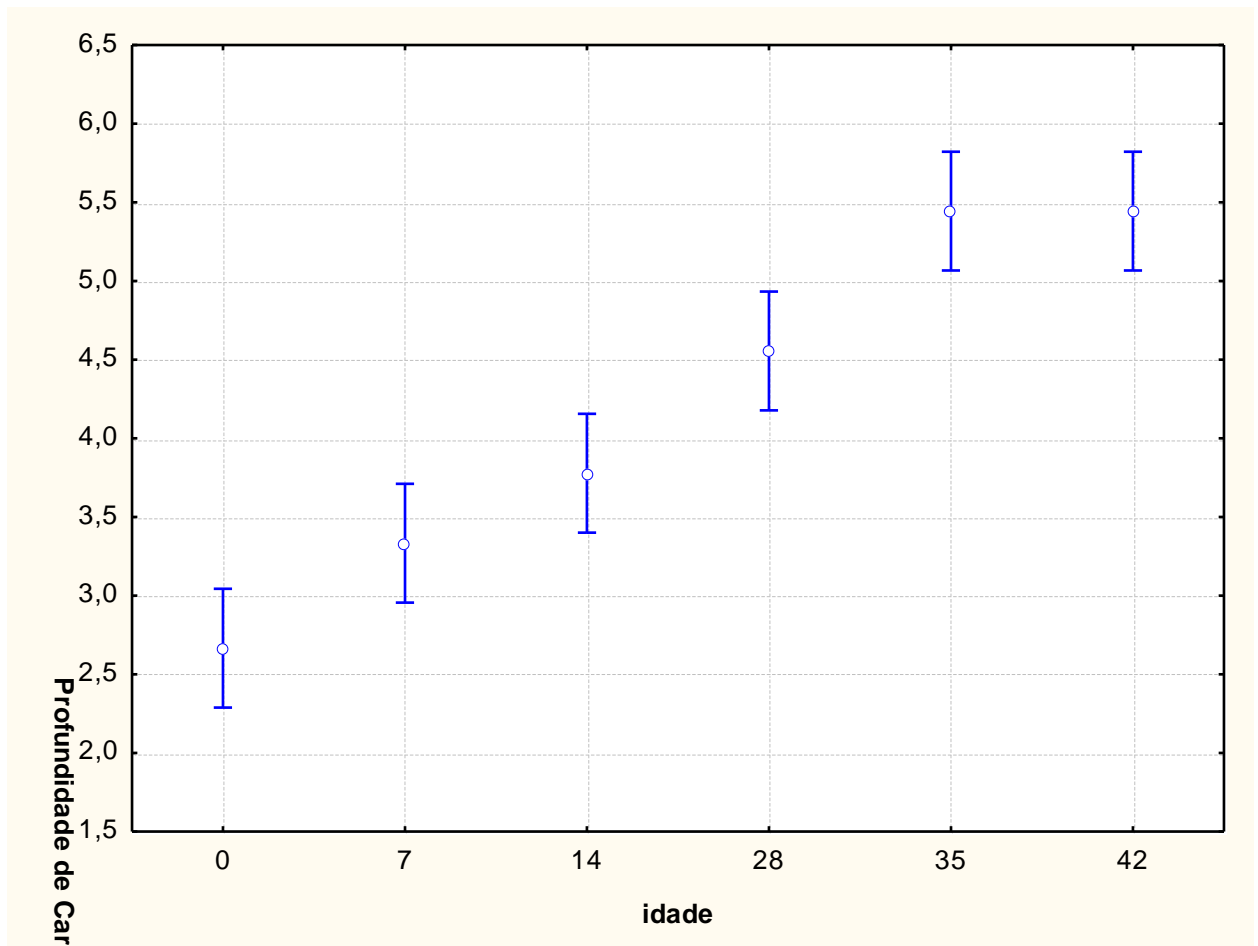


Figura 4.29 - Influência da variável “idade” na carbonatação.

Já em relação à variável “idade”, de acordo com a Figura 4.29, se comportou de maneira crescente até 35 dias, a partir desta data teve um comportamento constante de penetração de carbonatação.

No concreto referência percebe-se que o traço 1:6,5 (pobre), foi o que obteve a maior carbonatação entre todas as amostras. Analisando os resultados, observa-se que todos os concretos já tinham sofrido o processo de carbonatação antes de entrar na câmara, pois a idade e o ambiente em que estavam expostos eram propícios a esse acontecimento.

Comparando todos os concretos com adições ou não e, com diferentes traços, todos apresentaram desempenho satisfatório quanto à carbonatação, principalmente, o de

traço 1:3,5 com adição de sílica ativa que não teve alteração no valor de carbonatação durante o ensaio, isso se deve ao fato de que esta adição preenche os possíveis poros que ocorre no cimento durante sua hidratação. As medidas de carbonatação foram feitas em semanas, pois em algumas pesquisas que este trabalho baseou-se como de Reis (2013) e a contagem do tempo também foi dessa forma. Aos 21 dias (3ª semana) não foi necessário colher os dados, pois não houve alteração significativa nos valores de carbonatação, por isso decidiu-se dar um intervalo de uma semana para que o processo ocorresse.

Após 35 dias (5ª semana), percebeu-se que o concreto com adição de metacaulim mantinha a mesma numeração de leitura no paquímetro, e como não houve mais mudanças nos valores e aos 42 dias (6ª semana), decidiu-se finalizar o ensaio.

Pauletti (2009), em seu estudo sobre a carbonatação observou que as profundidades carbonatadas eram maiores nas primeiras idades, entre 7 e 28 dias.

Fato também observado por Reis (2013), também notou que maior era a relação água/cimento adotada, maior foi o coeficiente ou a profundidade de carbonatação para todos os tipos de mistura.

### **4.2.3- ANÁLISE MICRO ESTRUTURAL**

#### **4.2.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Por meio das micrografias apresentadas nas Figuras a seguir, identificam-se as três fazes da microestrutura do concreto: agregado, matriz de cimento e zona de transição.

A área mais clara das micrografias é identificada como a matriz de cimento, a região mais escura, o agregado, e entre estas duas está situada a zona de transição.

O concreto de referência (CR) apresenta-se menos compacto e com mais poros perceptíveis, principalmente os com maiores proporções agregado/aglomerante. Já nas micrografias dos concretos CMT e CSA, é possível observar nas Figuras 4.30, 4.33 e 4.36, uma menor quantidade de poros na região ocupada pela pasta.

## Concreto Referência

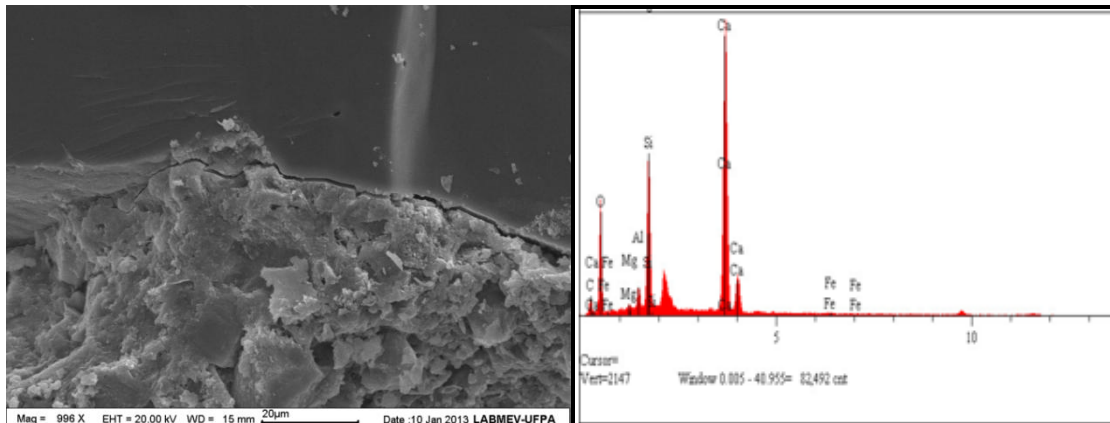


Figura 4.30- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CR 1:5 (Autoria própria, 2013).

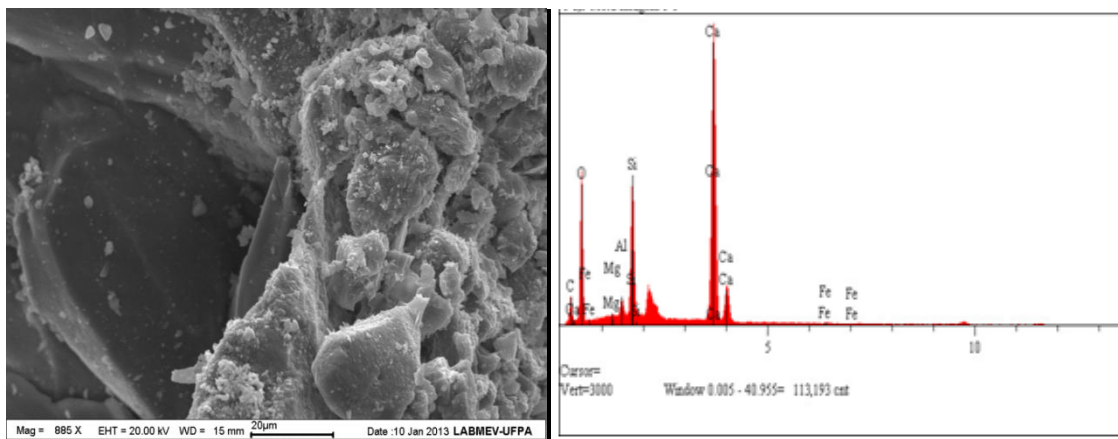


Figura 4.31- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CR 1:3,5 (Autoria própria, 2013).

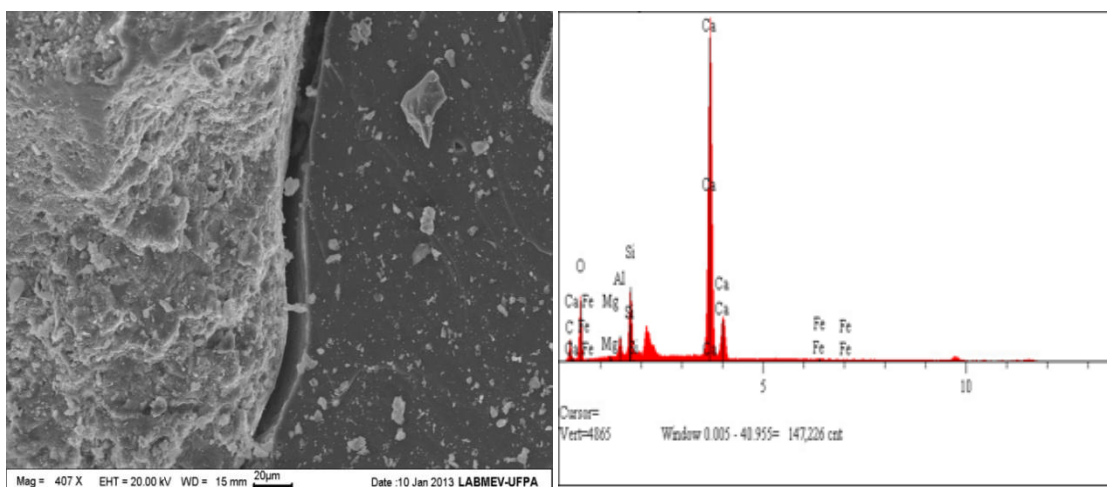
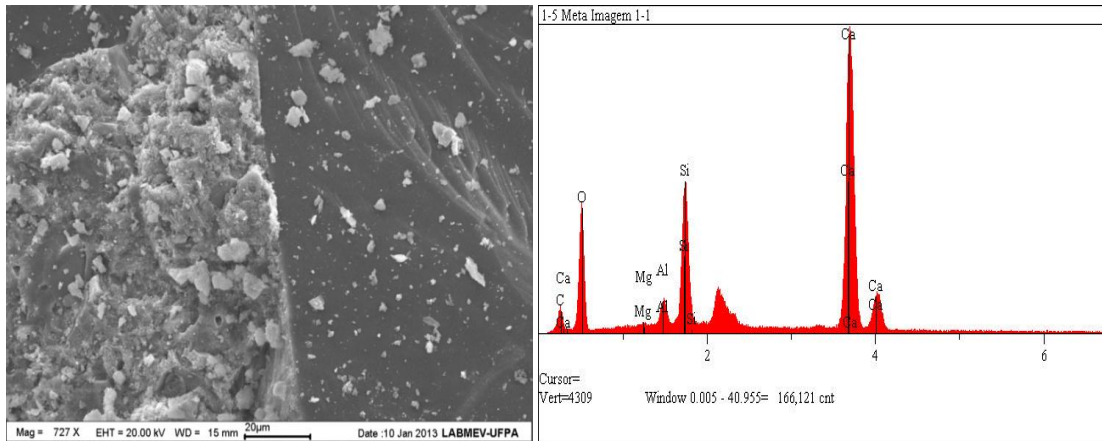


Figura 4.32- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CR 1:6,5 (Autoria própria, 2013).



## Concreto com Metacaulim



Figura

Figura 4.33- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CMT 1:5 (Autoria própria, 2013).

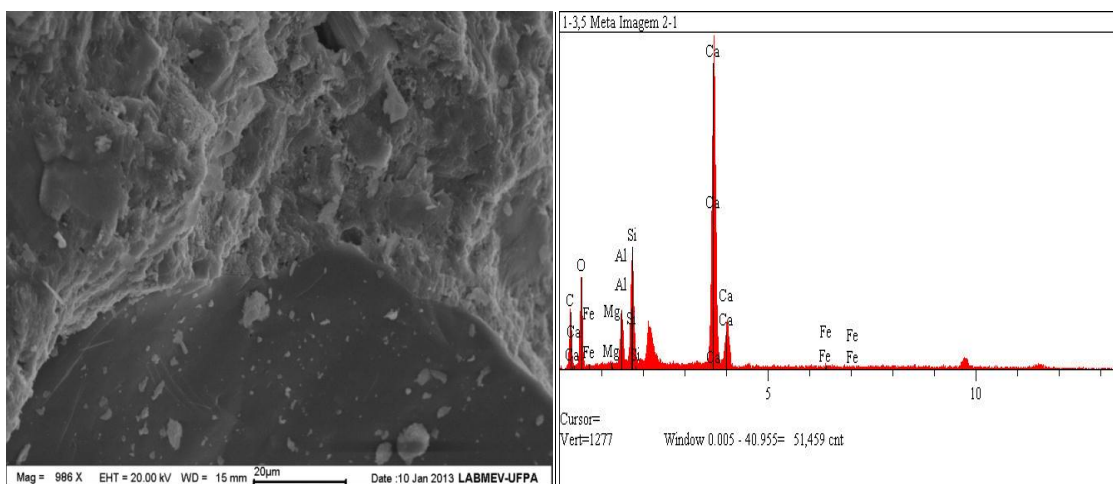


Figura 4.34- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CMT 1:3,5 (Autoria própria, 2013).

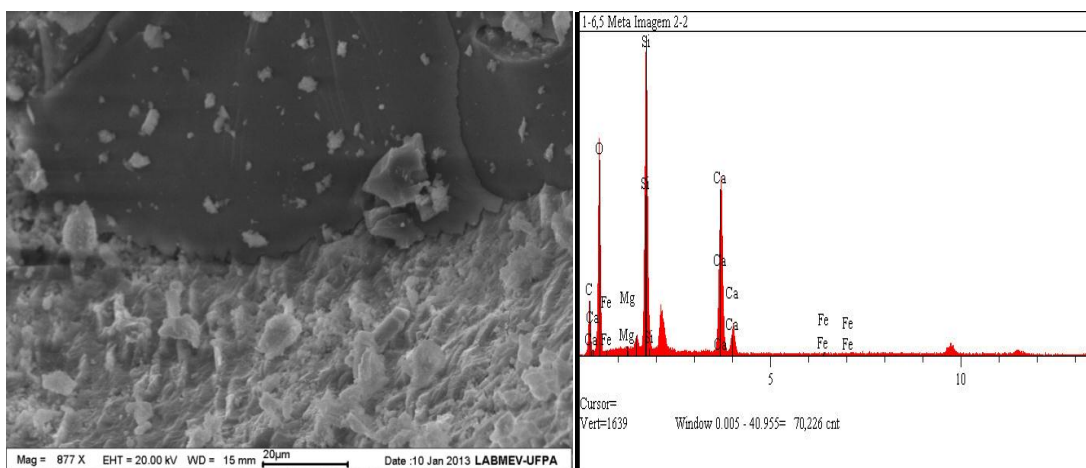


Figura 4.35- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CMT 1:6,5 (Autoria própria, 2013).

## Concreto com Sílica ativa

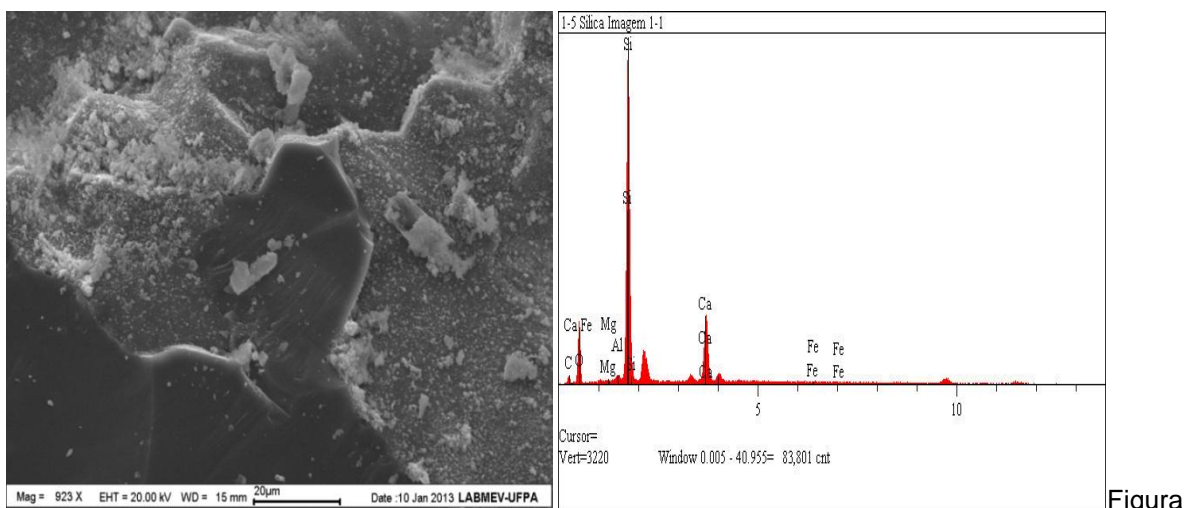


Figura 4.36- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CSA 1:5 (Autoria própria, 2013).

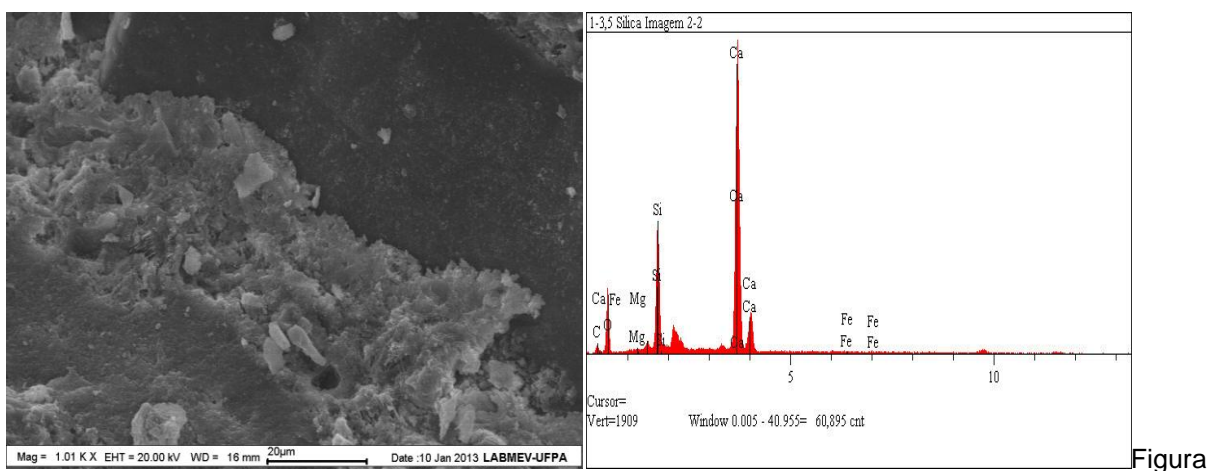


Figura 4.37- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CSA 1:3,5 (Autoria própria, 2013).

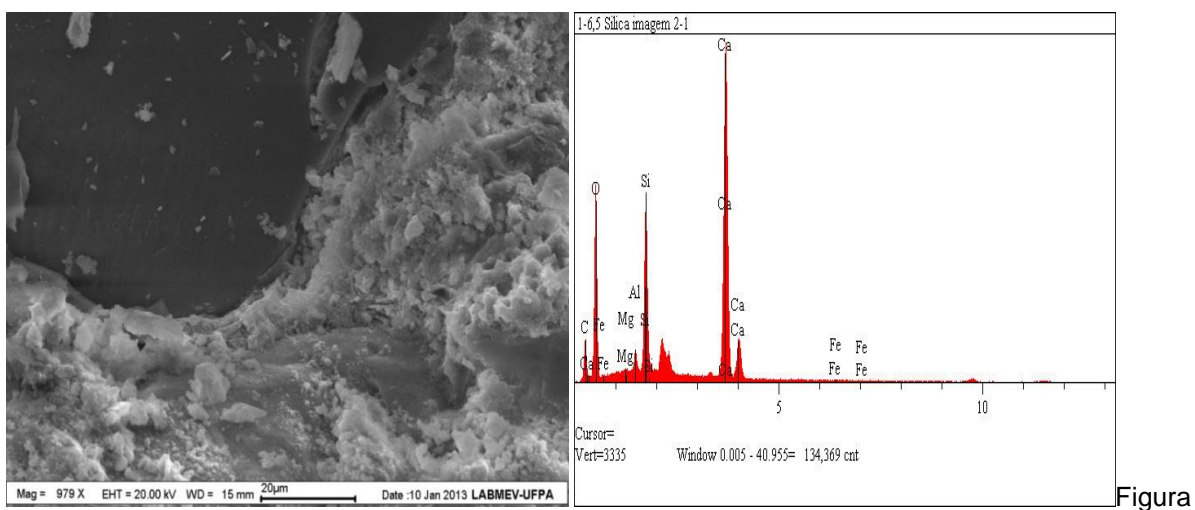


Figura 4.38- Micrografia (MEV) e espectro do concreto CSA 1:6,5 (Autoria própria, 2013).

Na Figura 4.30 é possível observar a presença do seixo rolado, observa-se também as estruturas presentes na pasta formadas durante a hidratação do cimento branco.

Já na Figura 4.32 (CR) observa-se a presença de microfissuras na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Tal fato pode ter se dado em decorrência do grande volume de vazios presentes nessa região.

Percebe-se na Figura 4.34 (CMT) que a zona de transição entre o agregado e a pasta é bastante compacta, sem a presença de vazios devido o uso do metacaulim.

Viu-se que no espectro da figura 4.36 e 4.37 (CSA), há maior presença de silício devido a presença de sílica ativa, pois a adição pozolânica é composta predominantemente por este elemento, por esse motivo percebemos uma maior densificação da matriz deste concreto.

Richardson (2007), observou que o uso de adições pozolânicas nos concretos proporcionou a diminuição dos poros capilares e um maior preenchimento na zona de transição em relação ao concreto referência.

Rosário (2012), em sua análise de MEV verificou que o concreto de referência apresentou-se mais compacto e com uma quantidade menor de poros, já nos concretos com adição, que para a produção utilizou-se o agregado produzido a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita, foi possível observar uma grande quantidade de poros, devido ao tipo do seu agregado ser classificado como agregado leve.

Girão (2010), analisou concretos com 28 dias de idade verificou que a densidade do CSH aumentou com a idade.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve por objetivo principal o estudo do comportamento dos concretos de cimento portland branco frente aos fenômenos de carbonatação, absorção, resistência e cloretos, para isso, foram utilizados três tipos de traços 1:5, 1:3,5 e 1:6,5 fixando-se a relação a/c de 0,35. Os concretos produzidos encontram aplicação no setor da construção civil, na medida em que apresentaram resultados bastante satisfatórios, principalmente no que se refere à resistência, principalmente porque é um concreto estrutural.

De acordo com os objetivos pré-definidos, o programa experimental adotado mostrou-se adequado para a análise das características e propriedades dos concretos produzidos com este material. Analisando-se os resultados obtidos no programa experimental, e com base na revisão bibliográfica e a partir dos ensaios realizados podem-se enumerar as seguintes conclusões:

#### **5.1.1 No estado fresco**

Para as propriedades dos concretos no estado fresco, os três (CR, CMT e CSA), apresentaram trabalhabilidade, coesão e consistência adequada, permitindo assim o manuseio e moldagem dos corpos-de-prova.

Ainda em relação ao concreto no estado fresco, em nenhum dos grupos de concreto foi observado o fenômeno de segregação dos agregados e exsudação.

#### **5.1.2- No estado endurecido**

a) Resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e absorção

Os valores de resistência à compressão, tração por compressão diametral dos concretos foram satisfatórios, pois o cimento branco utilizado na pesquisa foi o estrutural.

Observa-se que para os concretos produzidos, os valores de resistência à compressão nas duas idades de ensaio, foram bastante elevadas, ou seja, a resistência medida aos 07 obteve uma grande elevação aos 28 dias.

A influência da relação a/c na resistência à compressão implicou no alto valor chegando até a 73,67 MPa, essa alta resistência pode ser atribuída também pelo uso de aditivos superplastificantes que oferece maior plasticidade ao concreto, reduzindo a quantidade de água e conseqüentemente aumentando a resistência.

Os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos, foram satisfatórios, principalmente nos concretos com as adições pozolânicas, que na maioria das amostras ultrapassou 10% em relação ao valor de compressão.

Os valores do módulo de deformação dos concretos produzidos com adição de metacaulim foram significativamente superiores aos obtidos para o concreto de referência. Vale ressaltar que tais valores aumentam à medida que colocamos as adições no concreto.

Em relação à absorção de água por imersão, os concretos produzidos com metacaulim e sílica ativa, apresentaram percentuais inferiores ao concreto de referências.

Durante os ensaios de absorção, dos três tipos de traço aferidos, pôde-se observar que o traço pobre de CMT apresentou maior absorção de água que os demais. Desta forma é possível constatar que o mesmo apresenta volume de vazios maior que os demais. Explica-se pelo fato, de haver neste traço quantidade menor de material fino (Cimento Portland Branco e Metacaulim), não preenchendo, dessa forma, os vazios entre os interstícios criados pelo arranjo entre os agregados. Dessa forma, 0,037 g/cm<sup>2</sup> de água penetraram no concreto ensaiado deste tipo de traço Ao passo que, no traço rico, o quantitativo foi relativamente menor, apenas 0,025 g/cm<sup>2</sup>.

## b) Penetração de cloretos

A profundidade de penetração de cloretos durante o ensaio mostrou forte correlação linear com a carga passante. Isso significa que mesmo outros íons estando presente no concreto, a carga passante são fortemente correlacionados com ao que ocorre aos cloretos no interior do concreto durante o ensaio.

Como o filer calcário está presente em grande quantidade no cimento branco, reage com  $C_3A$  e com o  $C_4AF$  formando monocarboaluminatos de cálcio, estes diminuem o fluxo de penetração de cloretos na solução, restando uma menor quantidade de  $C_3A$  e  $C_4AF$  para fixar os cloretos livres e já há uma redução do material cimentício no cimento pela substituição do clínquer pelo filer calcário.

## C) Carbonatação

Para todos os concretos analisados os valores obtidos foram pequenos, chegando a ser nulo no concreto de traço 1:3,5 do concreto CMT. O pior desempenho frente ao fenômeno de carbonatação, foi para o concreto referência (CR) no traço de 1:6,5. Quando a carbonatação é comparada aos compostos químicos do cimento, o único composto que aparenta ter relação direta em função de suas quantidades e proporções entre os traços, é o  $C_3S$ , que segue a mesma tendência da carbonatação.

Quando a resistência aumenta, os valores para profundidade de carbonatação diminuem, porém a resistência não é parâmetro adequado para analisar a durabilidade de concretos frente à carbonatação. Para um mesmo patamar de resistência à compressão, concretos com diferentes constituições químicas apresentam valores de carbonatação significativamente diferentes quando submetidos às mesmas condições de exposição. Isso demonstra que a porosidade total que rege a resistência à compressão não é o único fator que interfere na carbonatação do concreto sendo a estrutura dos poros e a química do cimento igualmente importante no processo.

#### d) Estudos microestruturais

Por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada ao EDS (espectro), foi possível identificar as três fases da microestrutura do concreto: agregado, matriz de cimento e zona de transição.

O concreto de referência apresentou-se menos compacto e com uma quantidade maior de poros, já nos concretos CMT e CSA que para a produção utilizou-se adições de metacaulim e sílica ativa respectivamente, foi possível observar uma mínima quantidade de poros, na região ocupada pelas adições.

O concreto concreto referência (CR), apresentou fissuras na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

## **5.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS**

No decorrer deste trabalho, identificaram-se diversos aspectos relevantes a este assunto, nos quais se viu uma possibilidade de aprofundar o conhecimento ou adquirir um maior esclarecimento sobre o tema dessa dissertação. A seguir apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros:

- a) Ensaio de imersão pode ser utilizado para estudar a penetração de cloretos em concretos que incorporam materiais indutivos, como na utilização da cal hidratada (reposição de reserva alcalina);
- b) Realizar ensaio de carbonatação acelerada, variando-se apenas a concentração de CO<sub>2</sub> na câmara;
- c) Comparar o ensaio acelerado de carbonatação do concreto com o não acelerado;
- d) Verificação de aspectos como biodeterioração e resistência à penetração de sulfatos;
- e) Verificação de aspectos relacionados a estética e impacto dos resíduos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1202-05:

**Standard test method for electrical indication of concrete Ability to resist chloride ion penetration.** Philadelphia, 2005.

\_\_\_\_\_. ASTM C 192-13a. **Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.** Philadelphia, 2007.

\_\_\_\_\_. ASTM C 91-99; **Standard Specification for Masonry Cement.** Philadelphia, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Perguntas mais freqüentes.** Dispo nível em: <<http://www.abcp.org.br/faq.htm#resp6>> Acesso em 27 dez. 2013.

\_\_\_\_\_. NM 52; **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7222 **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NM 45 **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária:** 45. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NM 52: **Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7217. **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987c.

\_\_\_\_\_. NBR 7219. **Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos.** Rio de Janeiro. 1987d.

\_\_\_\_\_. NBR 9776. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. NM 248 **Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. NBR 11578. **Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.



\_\_\_\_\_. NBR 11579. **Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 11581. **Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 9676. **Cimento Portland – Determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro. 1983.

\_\_\_\_\_. NBR 9676. **Cimento Portland – Determinação da área específica**. Rio de Janeiro. 1987.

\_\_\_\_\_. NBR 5739 **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de Concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NM 67 **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. NBR 5738 **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos- de-prova**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 9833: **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: **Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. NBR 12142: **Concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. **Cement and Concrete Research**, 1999, v.29, p.1249-1259.

ARANHA, P.M. **Principais manifestações patológicas em obras convencionais na Amazônia**. Belém-PA, 1994.

ASHTEYAT, A.M. et al. **Properties of portland cement mortar incorporating white cement bypass dust**. Canadian Journal of Civil Engineering, December 2011, Vol.38(12), pp.1355-1362

- BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico.** (Dissertação de mestrado UFSM) Santa Maria-RS, 2004.
- BARIN, D.S. et al. Resistência à compressão e propriedades elétricas de concreto com cimento Portland branco e escória de alto forno. *Cimento e Concreto Composites*, 2012, Vol.34(3), pp.392-399.
- BASHEER, P. A. M.; NOLAN, É. A.; MCCARTER, W, J.; LONG, A. E. Effectiveness of in situ moisture preconditioning methods for concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, may, 2000, p. 131-138.
- BAUER, E. “Análise da adequabilidade do emprego de diferentes areias para argamassa de revestimento”. **Relatório Técnico.** Laboratório de Ensaio de Materiais, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- BAUER, E; CARASEK, H. “Argamassas de revestimento”, **1º Curso de tecnologia das construções**, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, outubro, 1997.
- BAUER, E; CARASEK, H. “Argamassas de revestimento”, **2º Curso de tecnologia das construções**, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, agosto, 1998.
- BAUER, E. NEPOMUCENO, A . A., POZZAN, E. Caracterização da estrutura de poros em microestruturas carbonatadas, e sua relação com alguns mecanismos de transportes. In: Workdur – Workshop sobre Durabilidade das Construções. São Jose dos Campos, São Paulo, 29 e 30 de novembro de 2001. **Anais.** p.301-311.
- BAUER, E.; PAES, I. N. L Avaliação da movimentação e fixação de água em argamassas mistas para substratos porosos, nos momentos iniciais pós-aplicação. In: X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído - ENTAC, São Paulo, Brasil, 2004. **Anais.** CD-ROM.
- BENTZ, D. P.; GARBOCZI, E. J. Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity. **Materials and Structures**, N° 25, p. 523-533, 1992.
- CARASEK, H. **Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo, 1996. 285p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armada no comportamento frente à corrosão.** São Paulo, 2000. 310p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- CHAIPANICH, A e TORKITTIKUL. PP. **Microstructure: Surface and cross – Sectional studies of hydroxyapatite formation on the surface of white Portland cement paste in vitro.** Applied Surface Science, 1 August 2011, Vol.257(20), pp.8385-8390.
- COLEMAN, N.J. **Early hydration of white Portland cement in the presence of bismuth oxide.** Advances in Applied Ceramics, May 2013, Vol.112 (4), pp.207-212.
- DEL BOSQUE, IFS et AL. **Combined effect of amorphous nanosilica and temperature on white Portland cement hydration,** MT Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, Vol.52(34), pp.11866-11874.
- DELLINGHAUSEN, L.M. et al. **Total shrinkage , oxygen permeability, and Chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag.** Construction and Building Materials, December 2012, Vol.37, pp.652-659.
- FERREIRA, T.N.S. e ROCHA. A.L. **Avaliação da durabilidade , perante o ataque de cloretos, em concretos com cimento branco.** Belém-PA, 2010.
- GENTIL, V. **Corrosão – Ltc,** Rio de Janeiro, 2011.
- GIRÃO, A.V. et AL. **Composition, morphology and nanostructure of C-S-H in 70%white Portland cement-30% fly ash blends hydrated at 55 °c.**
- HALL, C. Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory. **Materials and Structures,** 1994, N° 27, p. 291-306.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. 231p. Tese para obtenção do título de Professor Livre Docente (Departamento de Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN P. R. **Manual de Controle e Dosagem do Concreto,** São Paulo, PINI, 1993.
- ISAIA, G.C. et al. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** v1 e v2. São Paulo: IBRACON, 2005.
- ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. **Durabilidade de Concreto de Elevado Desempenho com Pozolanas.** In: seminário qualidade e durabilidade das estruturas de concreto, Porto Alegre, 1993. Porto Alegre: UFRGS/CPGEC/NORIE, 1993.
- KIRCHHEIM, Ana Paula (2003). **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Avaliação da carbonatação e absorção capilar.**(Dissertação de mestrado) . Porto Alegre, 2003.

- KURLAKOWSKI, M.P. e DAL MOLIN, D.C.C. **Estudo da penetração de cloretos Em argamassa de alto desempenho para reparo estrutural.** Porto Alegre- RS, 2004.
- LARA, P.L.O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras.** (Dissertação de Mestrado), Brasília-DF, 2003.
- LIMA, J.F. **As características do concreto branco e suas principais manifestações patológicas.** Belém- PA, 2011.
- LÜBECK, A, et al. **Compressive and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag.** Cement & Concrete Composites, 2012, Vol.34(3), pp.392-399.
- MADEIRO, T. T. **Influência do tratamento de base na resistência de aderência à tração direta e na permeabilidade de revestimentos em argamassa – estudo de caso.** (Dissertação de Mestrado), Belém-PA, 2012.
- McCARTER, W, J.; CHRISP, T. M.; BUTLER, A.; BASHEER, P. A. M. Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete. **Construction and Building Materials**, october, 2001, p. 115-124.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição. São Paulo: IBRACON, 2008.
- NEPOMUCENO, A.A. **Mecanismos de transporte de fluídos no concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Ed. G.C.Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005.
- NERO, J.M.G. e NUNES, A. **Betão Branco - Fundamentos para a Prescrição e Utilização do Betão Branco,** Laboratório de Betões da SECIL S/A. 2000.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 2ª Ed., São Paulo, PINI, 1997.
- NEVILLE, A.M. e BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** Ed.Bookman, 2013.
- PANZERA, T.H. et al. **Mecanical properties of composite materials based on Portland cement and epoxy resin.** Canadian Journal de Engenharia Civil, 2011, Vol.38(12), pp.1355-1362
- PASSUELO, A **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco** (Dissertação de mestrado UFRGS). Porto Alegre, 2004.
- PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.

- REIS, F.J.L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** (Dissertação de Mestrado). Belém-PA, 2013.
- REGATTIERI, C.E.X. & HELENE, P.R.L. **Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto.** (Boletim técnico) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- RICHARDSON, I.G. et al. **Composition and structure of C-S-H in white Portland cement- 20% metakaolin pastes hydrated at 25 degrees C.** Cement And Concrete Research, 2007, Vol.37(2), pp.109-117.
- RIZZON, A.C. e ANDRADE.J.J.O. **Determinação do coeficiente de difusão de c cloretos e da vida útil de concretos de cimento branco** (Anais do 48º c congresso brasileiro de concreto) IBRACON- Rio de Janeiro, 2006.
- ROSÁRIO, K.A. **Concreto leve com utilização de agregado graúdo produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** (Dissertação de Mestrado). Belém –PA, 2012.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para Pré:** Fabricados Esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2003. Tese. (Doutorado em Interunidade: Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SCHNEIDER.J.A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químicos submetidos a diferentes períodos de cura.** Santa Maria-RS, 2005.
- SIQUEIRA.H.C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno ativados quimicamente.**(Dissertação de mestrado UFSM) Santa Maria-RS, 2008.
- SUSSEKIND, J.C. **Curso de análise estrutural.** Rio de Janeiro, 1989.
- VEIGA K.K. e GASTALDINI, A.L.G. **Sulfate attack on a white Portland cement with actvated slag.** Construction and Building Materials, September 2012, Vol.34, pp.494-503

## ANEXOS

ANEXO 1- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à compressão axial do concreto referência nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CR</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A1	A2	A1	A2
<b>1:5</b>	43,20	45,00	58,90	60,30
<b>1:3,5</b>	54,30	58,10	71,90	73,90
<b>1:6,5</b>	31,20	33,20	34,60	31,80
LEGENDA: CR = Concreto Referência A1 e A2= Amostras 1 e 2.				

ANEXO 2- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à compressão axial do concreto com Metacaulim nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CMT</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A2	A1	A2	A1
<b>1:5</b>	60,30	59,00	61,20	66,60
<b>1:3,5</b>	73,90	67,30	71,92	73,95
<b>1:6,5</b>	31,80	46,32	48,82	67,33
LEGENDA: CMT = Concreto com Metacaulim A1 e A2= Amostras 1 e 2.				

ANEXO 3- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à compressão axial do concreto com Sílica ativa nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CSA</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A1	A2	A1	A2
<b>1:5</b>	35,83	36,37	49,25	52,05
<b>1:3,5</b>	60,10	59,9	67,00	67,00
<b>1:6,5</b>	26,10	28,10	37,10	36,90

LEGENDA: CR = Concreto com Sílica Ativa  
A1 e A2= Amostras 1 e 2.

ANEXO 4- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto referência nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO P.C.D. (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CR</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A1	A2	A1	A2
<b>1:5</b>	8,08	8,82	9,44	11,12
<b>1:3,5</b>	9,81	8,87	11,15	11,91
<b>1:6,5</b>	7,43	6,31	8,86	9,10

LEGENDA: CR = Concreto Referência  
A1 e A2= Amostras 1 e 2.

ANEXO 5 - Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto com metacaulim nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO P.C.D. (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CMT</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A1	A2	A1	A2
<b>1:5</b>	12,55	15,41	16,21	14,39
<b>1:3,5</b>	15,34	12,74	16,45	18,15
<b>1:6,5</b>	8,07	8,78	14,14	12,84
<b>LEGENDA:</b> CR = Concreto com Metacaulim A1 e A2= Amostras 1 e 2.				

ANEXO 6 - Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto com sílica ativa nas idades de 7 e 28 dias.

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO P.C.D. (MPa)</b>				
<b>Traços</b>	<b>CSA</b>			
	Idades (dias)			
	<b>7</b>		<b>28</b>	
	A1	A2	A1	A2
<b>1:5</b>	10,84	9,22	13,26	11,60
<b>1:3,5</b>	9,42	13,10	11,93	14,31
<b>1:6,5</b>	5,23	6,11	9,90	7,84
<b>LEGENDA:</b> CR = Concreto com Sílica Ativa A1 e A2= Amostras 1 e 2.				



ANEXO 7- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de Módulo de elasticidade para o concreto referência na idade de 28 dias.

<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CR</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	44,32	48,66
<b>1:3,5</b>	47,43	45,41
<b>1:6,5</b>	37,55	37,19
LEGENDA: CR = Concreto Referência A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 8 - Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de Módulo de elasticidade para o concreto com Metacaulim na idade de 28 dias.

<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CMT</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	42,98	45,94
<b>1:3,5</b>	55,25	50,25
<b>1:6,5</b>	36,18	39,12
LEGENDA: CR = Concreto com Metacaulim A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 9- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de Módulo de elasticidade para o concreto com Sílica ativa na idade de 28 dias.

<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CSA</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	32,26	36,74
<b>1:3,5</b>	31,79	32,83
<b>1:6,5</b>	39,20	35,26
LEGENDA: CR = Concreto com Sílica Ativa A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 10 - Valores encontrados no ensaio de absorção dos CP's para os concretos  
Referência na idade de 28 dias.

<b>ABSORÇÃO (g/cm<sup>2</sup>)</b>						
<b>CR</b>						
<b>Traço</b>	<b>0h</b>	<b>4h</b>	<b>8h</b>	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>
<b>1:5</b>	0	0,03221	0,03415	0,03522	0,03664	0,03811
<b>1:3,5</b>	0	0,02003	0,02127	0,02486	0,02512	0,02667
<b>1:6,5</b>	0	0,03735	0,03924	0,04205	0,04398	0,04608

ANEXO 11 - Valores encontrados no ensaio de absorção dos CP's para os concretos com  
Metacaulim na idade de 28 dias.

<b>ABSORÇÃO (g/cm<sup>2</sup>)</b>						
<b>CMT</b>						
<b>Traço</b>	<b>0h</b>	<b>4h</b>	<b>8h</b>	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>
<b>1:5</b>	0	0,01103	0,02179	0,02876	0,03379	0,03427
<b>1:3,5</b>	0	0,00855	0,01657	0,02023	0,02459	0,02477
<b>1:6,5</b>	0	0,00579	0,01522	0,03243	0,03606	0,03723

ANEXO 12 - Valores encontrados no ensaio de absorção dos CP's para os concretos com  
Sílica Ativa na idade de 28 dias.

<b>ABSORÇÃO (g/cm<sup>2</sup>)</b>						
<b>CSA</b>						
<b>Traço</b>	<b>0h</b>	<b>4h</b>	<b>8h</b>	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>
<b>1:5</b>	0	0,01213	0,02019	0,02395	0,02894	0,03161
<b>1:3,5</b>	0	0,00926	0,01147	0,01862	0,02158	0,02504
<b>1:6,5</b>	0	0,00931	0,01325	0,02652	0,03168	0,03407

LEGENDA: CR = Concreto Referência      CMT = Concreto com Metacaulim  
CSA= Concreto com Sílica Ativa      A1 e A2= Amostras 1 e 2.

ANEXO 13- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de penetração de íons cloreto no concreto referência na idade de 28 dias.

<b>PENETRAÇÃO DE CLORETOS (Q)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CR</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	3885	3945
<b>1:3,5</b>	3118	3596
<b>1:6,5</b>	4603	4127
LEGENDA: CR = Concreto Referência A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 14- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de penetração de íons cloreto no concreto com Metacaulim na idade de 28 dias.

<b>PENETRAÇÃO DE CLORETOS (Q)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CMT</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	911	727
<b>1:3,5</b>	0	0
<b>1:6,5</b>	1399	1517
LEGENDA: CMT=Concreto com Metacaulim A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 15- Valores encontrados para todas as amostras no ensaio de penetração de íons cloreto no concreto com Sílica Ativa na idade de 28 dias.

<b>PENETRAÇÃO DE CLORETOS (Q)</b>		
<b>Traços</b>	<b>CSA</b>	
	A1	A2
<b>1:5</b>	263	215
<b>1:3,5</b>	219	237
<b>1:6,5</b>	306	288
LEGENDA: CSA = Concreto com Sílica Ativa A1 e A2= Amostras 1 e 2.		

ANEXO 16 - Valores encontrados no ensaio de carbonatação de todos os CP's para os concretos referência ao longo de 42 dias.

Dias	Carbonatação do CR (mm)					
	1:5		1:3,5		1:6,5	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
AC	4	4	2	2	4	4
7 dias	4	4	2	4	5	5
14 dias	4	4	4	4	6	6
28 dias	5	5	4	4	7	9
35 dias	5	7	4	6	10	10
42 dias	5	7	4	6	10	10

LEGENDA: CR = Concreto Referência  
A1 e A2= Amostras 1 e 2.  
AC= Antes de entrar na câmara de carbonatação.

ANEXO 17 - Valores encontrados no ensaio de carbonatação de todos os CP's para os concretos com adição de Metacaulim ao longo de 42 dias.

Dias	Carbonatação do CMT (mm)					
	1:5		1:3,5		1:6,5	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
AC	2	2	2	2	3	3
7 dias	3	3	2	4	3	5
14 dias	3	3	2	4	5	5
28 dias	5	5	4	4	5	7
35 dias	5	7	4	4	6	8
42 dias	5	7	4	4	6	8

LEGENDA: CMT = Concreto com Metacaulim  
A1 e A2= Amostras 1 e 2.  
AC= Antes de entrar na câmara de carbonatação.

ANEXO 18- Valores encontrados no ensaio de carbonatação de todos os CP's para os concretos com adição de Sílica ativa ao longo de 42 dias.

Dias	Carbonatação do CSA (mm)					
	1:5		1:3,5		1:6,5	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
AC	2	2	1	1	4	4
7 dias	3	3	1	1	4	4
14 dias	3	3	1	1	4	6
28 dias	4	5	1	1	4	6
35 dias	5	6	1	1	5	7
42 dias	5	6	1	1	5	7

LEGENDA: CSA = Concreto com Sílica ativa  
A1 e A2= Amostras 1 e 2.  
AC= Antes de entrar na câmara de carbonatação.