



**RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS DOSADOS COM
DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO**

SÃO PAULO
2010



ALBERTO CASANOVA TRUJILLO GUIMARÃES

KATIA REGINA ANSCHAU

RENATO ENCINAS LOPES

RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS DOSADOS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

Co-orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo.

SÃO PAULO
2010

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil professor De Luca pela valiosa colaboração no direcionamento, orientação e desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Enio José Pazini Figueiredo pela orientação do trabalho.

Ao professor José Roberto Saleme pela colaboração e apoio na pesquisa.

Ao laboratório Lap Power Consultoria e Serviços de Engenharia por ceder o laboratório para os experimentos, bem como grande parte dos recursos, especialmente pelo valioso apoio de seus funcionários diretamente envolvidos que auxiliaram no programa experimental.

A concreteira Supermix – Unidade de Sorocaba, em especial aos engenheiros André Tavares, Simoni e Janaína Ricchini pelo apoio e patrocínio.

Aos nossos familiares pela compreensão paciência e apoio.

FOLHA DE APROVAÇÃO

RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS DOSADOS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO

Por

ALBERTO CASANOVA TRUJILLO GUIMARÃES

KATIA REGINA ANSCHAU

RENATO ENCINAS LOPES

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

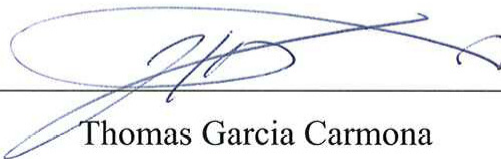
São Paulo (SP) 15 de dezembro de 2010.



Luis César De Luca



Enio José Pazini Figueiredo



Thomas Garcia Carmona

RESUMO

Este trabalho visou corroborar a existência de diferença na resistência à carbonatação de concretos dosados com diferentes tipos de cimento. Por meio de programa experimental corpos de prova dosados com três tipos de cimentos diferentes, CPII-32-E (Votorantim e Lafarge), CPIII e CPV-ARI (ambos Votorantim) foram submetidos a ensaios de compressão axial e de carbonatação acelerada em câmara de carbonatação. Para análise da frente de carbonatação, fatiaram-se os corpos-de-prova com espessura de aproximadamente 3 cm para posterior aspersão de fenolftaleína diluída na face interna, possibilitando uma visualização clara da região não carbonatada. Os resultados obtidos possibilitaram confirmar a hipótese inicial e ainda, contribuir com novas observações como, a influência da localização dos corpos-de-prova dentro da câmara, no fenômeno da carbonatação e o ganho de resistência à compressão após a carbonatação do concreto.

Palavras chave: concreto, carbonatação, cimento, ensaio acelerado de carbonatação, frente de carbonatação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).	15
Figura 2. Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida (MEHTA & MONTEIRO, 1994).....	16
Figura 3. Dimensões da câmara de carbonatação (em cm)	48
Figura 4. Variação na concentração de CO ₂ ao longo das horas.....	55
Figura 5. Corpos de prova dentro da câmara de carbonatação.....	57
Figura 6. Corpos de prova da camada superior de dentro da câmara de carbonatação.....	58
Figura 7. Corpos de prova da camada inferior de dentro da câmara de carbonatação.....	59
Figura 8. Ensaio de pH aos 0, 11 e 28 dias.....	63
Figura 9. Média da frente de carbonatação (aos 11 e 28 dias).....	65

LISTA DE FOTOS

Foto 1.	Materiais empregados nos corpos de prova.....	42
Foto 2.	Betoneira empregada	42
Foto 3.	Formas metálicas 10x20cm.	43
Foto 4.	Slump test	44
Foto 5.	Ensaio do teor de ar incorporado e equipamento utilizado.	45
Foto 6.	Concreto moldado.....	46
Foto 8.	Câmara de Carbonatação	48
Foto 9.	Orifícios para entrada de CO ₂	49
Foto 10.	Antes e durante insuflamento da câmara de Co ₂	49
Foto 11.	Equipamentos de medição utilizados (a) Medidor de concentração de CO ₂ , (b) Lápis medidor de pH, (c) Thermohigrômetro e (d) paquímetro.	51
Foto 12.	Ensaio superficial de pH com lápis medidor	52
Foto 13.	Ensaio de concentração de CO ₂ com medidor eletrônico.	53
Foto 14.	Detalhe do corpo de prova (CP03) após aplicação de fenolftaleína.	56
Foto 15.	Detalhe do corpo de prova (CP01) após aplicação de fenolftaleína.	56
Foto 16.	Detalhe do sistema de medição da frente de carbonatação no corpo de prova (CP01) após aplicação de fenolftaleína.....	57
Foto 17.	Corpos de prova da camada inferior de dentro da câmara de carbonatação.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CP-II-E-32 (fonte: cimento.org).	24
Tabela 2.	Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CPIII-32 (fonte: cimento.org)	26
Tabela 3.	Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CP V-ARI (fonte: cimento.org).	27
Tabela 4.	Composição dos cimentos brasileiros(fonte: BT – 106 ABCP).	28
Tabela 5.	Exigências físicas dos cimentos brasileiros (fonte: BT – 106 ABCP).	29
Tabela 6.	Exigências químicas dos cimentos brasileiros (fonte: BT – 106 ABCP).	30
Tabela 7.	Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos (fonte: BT – 106 ABCP).	30
Tabela 8.	Principais fatores que determinam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995).	33
Tabela 9.	Classificação da agressividade do ambiente (HELENE, 1995).	33
Tabela 10.	Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras – correlação com concentração de gás carbônico no ambiente (HELENE, 1995).	34
Tabela 11.	Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras – correlação com umidade do ar (HELENE, 1995).	35
Tabela 12.	Tabela 8. Resistência dos concreto frente ao risco de corrosão, devido à deterioração por carbonatação (HELENE et. al. , 2007).	36
Tabela 13.	Resultados do teste de abatimento.	44
Tabela 15.	Nomenclatura do CPs por série, de acordo com o cimento utilizado.	50
Tabela 16.	Quantidades de CO ₂ na câmara durante o ensaio de ppm.	54
Tabela 17.	Variação da concentração de CO ₂ dentro da câmara.	54
Tabela 18.	Ensaio de pH antes de submetidos ao ensaio de carbonatação.	60
Tabela 19.	Ensaio de pH após ensaio de carbonatação (11 dias).	61
Tabela 20.	Ensaio de pH após ensaio de carbonatação (28 dias).	62
Tabela 21.	Medição da frente de carbonatação (aos 11 dias).	63
Tabela 22.	Medição da frente de carbonatação (aos 28 dias).	64
Tabela 23.	Média da frente de carbonatação (aos 11 e 28 dias).	65
Tabela 24.	Resistência dos corpos de prova carbonatados e não carbonatados (aos 28 dias).	66

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
FOLHA DE APROVAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
RESUMO.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE FOTOS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	4
SUMÁRIO.....	5
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	7
1.2. OBJETIVOS	7
1.2.1. Objetivo Geral	8
1.2.2. Objetivos Específicos	8
1.3. HIPÓTESE	8
1.4. JUSTIFICATIVAS.....	8
1.4.1. Tecnológicas.....	9
1.4.2. Econômicas.....	9
1.4.3. Sociais.....	9
1.4.4. Ecológicas.....	10
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	10
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. CONCRETO	12
2.1.1. Histórico	12
2.1.2. Estrutura do Concreto	13
2.1.3. Produtos de hidratação.....	14
2.1.4. Zona de Transição do Concreto.....	14
2.1.5. Hidratação.....	15
2.1.6. Vazios na pasta endurecida.....	15
2.2. CIMENTO.....	18

2.2.1. COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (MATÉRIAS-PRIMAS)	18
2.2.2. TIPOS DE CIMENTO.....	23
2.3. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	31
2.3.1. Parâmetros determinantes da velocidade e profundidade de carbonatação.....	32
2.4. ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO.....	38
2.5. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO	39
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
3.1. MATERIAIS	41
3.2. TRAÇO DO CONCRETO	43
3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	43
3.4. CURA	46
3.5. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO.....	47
3.6. VARIÁVEIS.....	50
3.7. MEDIÇÕES.....	50
3.8. ENSAIOS	52
3.8.1. ENSAIO DE pH	52
3.8.2. Ensaio acelerado de carbonatação	53
3.8.3. Ensaio de profundidade de Carbonatação	55
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60
4.1. Ensaios de pH.....	60
4.2. Ensaios de frente de carbonatação.....	63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho de conclusão de curso discorrerá sobre como o concreto, dosado com diferentes tipos de cimento, responde ao fenômeno da carbonatação.

Para abordagem do tema desenvolveu-se um programa experimental com moldagem de corpos de prova cilíndricos 10x20, onde a única variável foi o tipo de cimento empregado, para posterior ensaio de medição da frente de carbonatação. Construiu-se uma câmara de carbonatação possibilitando o ensaio acelerado viabilizando assim o estudo. Ressalta-se que este ensaio acelerado ainda não é um assunto normatizado e o trabalho baseou-se em outros experimentos similares executados.

Os tipos de cimento escolhidos para o experimento foram CPIIE – 32, CPIII e CPV, comumente encontrados na região metropolitana de São Paulo.

O problema de pesquisa bem como os objetivos, hipóteses e justificativas serão apresentados a seguir neste capítulo, assim como uma visão geral da abordagem do trabalho como um todo.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Existe diferença na resistência à carbonatação de concretos dosados com diferentes tipos de cimento?

1.2. OBJETIVOS

Neste item apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. Objetivo Geral

Comparar as resistências à frente de carbonatação em concretos dosados com diferentes tipos de cimento em sua composição.

1.2.2. Objetivos Específicos

Medir a profundidade de carbonatação em concretos dosados com diferentes tipos de cimento;

Avaliar variação da velocidade de carbonatação com diferente concentração de CO₂;

Construir uma câmara de carbonatação e;

Realizar ensaio de carbonatação acelerado.

1.3. HIPÓTESE

Existe diferença na carbonatação, pois, parte-se da hipótese que o tipo de cimento empregado no concreto influencia na resistência à carbonatação.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

A carbonatação é um fenômeno natural ao qual o concreto está exposto e que com o passar do tempo leva à sua deterioração quando armado, uma vez que proporciona a redução do PH no meio, despassivando a armadura, facilitando o fenômeno da corrosão e expansão da armadura e deslocamento do concreto, diminuindo sua vida útil e requerendo intervenções para seu reparo e reconstituição da seção original.

1.4.2. Econômicas

Ultimamente gastos com recuperação de estruturas vêm crescendo, chegando a corresponder a 50% ou mais do total de gastos com a construção em diversos países (UEDA & TAKEWAKA *apud* GROCHOSKI & HELENE, 2008). Segundo Mietz (1998), o mais efetivo método para parar e prevenir a corrosão provocada pela carbonatação, e assim evitar o alto custo de reparos de construções e estruturas, é eliminar as causas para reações de corrosão. Dessa forma, objetiva-se estudar a resistência a carbonatação, visando o emprego de materiais que prolonguem a vida útil da estrutura e conseqüentemente preservem o patrimônio.

1.4.3. Sociais

A maior parcela de empregos para mão de obra não qualificada está no setor da construção civil. Quando o país se desenvolve, a infra-estrutura acompanha, conseqüentemente aumentam as estruturas em concreto armado que é um material amplamente conhecido e muito empregado. Visando fortalecer esse segmento, aumentando a vida útil das construções, este estudo objetiva

otimizar o uso do cimento para auxiliar na escolha do mesmo no que tange a resistência à carbonatação do concreto.

1.4.4. Ecológicas

As justificativas ecológicas se coadunam com uma nova tendência do mundo moderno: “o ecologicamente correto”. Visando a redução de dejetos, usualmente descartados em recuperações de concreto carbonatado comumente realizadas.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho será realizado através de revisão bibliográfica e programa experimental em laboratório com avaliação dos resultados obtidos. A revisão bibliográfica abordará quatro assuntos que predominam neste trabalho, a saber: o concreto e sua estrutura, as características dos diferentes tipos de cimento, com ênfase para os tipos de cimento empregados no programa experimental, o processo de carbonatação e medição da frente de carbonatação.

Destaca-se neste trabalho o programa experimental conduzido, baseado em moldagem de corpos de prova dosados com diferentes tipos de cimento, construção de câmara de carbonatação para ensaio acelerado e posterior medição da frente de carbonatação, comparando-se resultados dos corpos de prova submetidos ao ataque acelerado por carbonatação e outros não submetidos ao ensaio acelerado. No capítulo quatro deste trabalho os resultados obtidos no programa experimental são amplamente discutidos e comparados para embasar as considerações finais da pesquisa.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este item apresenta resumidamente o conteúdo de cada capítulo do trabalho:

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre o concreto e sua estrutura, os diferentes tipos de cimento, o processo de carbonatação e métodos de medição da frente de carbonatação.

O **Capítulo 3** trata sobre o programa experimental realizado neste trabalho, apresentando a moldagem dos corpos de prova, o processo de carbonatação acelerado bem como as medições realizadas.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados deste estudo bem como análise dos mesmos com base no programa experimental, descrevendo a influência dos diferentes tipos de cimento na resistência à carbonatação.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

Este capítulo apresentou os objetivos, hipóteses e justificativas do problema de pesquisa proposto neste trabalho. Já o seguinte dará embasamento ao experimento objeto dessa pesquisa, descrevendo visão de diversos autores sobre o tema numa breve revisão bibliográfica das obras consideradas as mais relevantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo anterior apresentamos o problema desse trabalho e nesse capítulo visamos delinear os contornos do programa experimental que se pretende fazer através de uma revisão bibliográfica dos tópicos principais: estrutura do concreto, os diferentes tipos de cimento, o processo de carbonatação e métodos de medição da frente de carbonatação.

2.1. CONCRETO

De acordo com Salomão (2008), o concreto é o material de construção civil mais amplamente utilizado em obras tanto de pequeno quanto de grande porte. O concreto é de moldagem fácil e associado ao aço aperfeiçoa suas características para otimizar a resistência do material. Apesar de sua grande durabilidade, tem fatores que influenciam sua vida útil, entre eles a carbonatação – que é objeto deste estudo.

Neste item será delineada uma breve descrição inserindo o concreto, em especial sua estrutura e composição química, no panorama necessário para abordagem do tema deste trabalho.

2.1.1. Histórico

De acordo com Carvalho (2008) a civilização sempre buscou um material capaz de unir e dar coesão as alvenarias de pedra, eis que no princípio usou-se as argamassas de barro (os assírios e babilônios usaram a argila como material ligante) e que logo chegariam a uma argamassa mais resistente e durável, a argamassa de cal que posteriormente receberia adição de cinza pozzolânica pelos Romanos e a chamariam de *Opus Caementiciu*, a qual possui características semelhantes as do cimento atual.

Ainda segundo Carvalho (2008) esse concreto desenvolvido pelos romanos possui grandes diferenças quando comparado aos concretos simples ou armados atuais, já que sua grande utilização foi como argamassa de assentamento nas alvenarias de pedra, as quais, porém, foram reduzindo de dimensão nas construções das estradas, permitindo a comparação com os concretos atuais que teve sua descoberta por John Smeaton em 1758, passou a ser industrializado somente em 1791 por James Parker com o cimento Romano e por Joseph Aspdin com o cimento Portland atual em 1824. Por ser um produto de “fácil” manuseio e utilização passou a fazer parte da maioria das obras como a construção do 1º túnel sobre um rio em 1825 (rio Tamisa em Londres) por Marc I. Brunel o qual foi considerado a oitava maravilha do mundo e é utilizado até os dias de hoje.

2.1.2. Estrutura do Concreto

Metha & Monteiro (1994) descrevem o concreto comum como sendo um material poroso, com uma estrutura heterogênea e complexa. Ao analisar sua macroestrutura identificam-se dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e partículas de agregados.

Entretanto, analisando sua microestrutura com o auxílio de um microscópio, distingue-se a pasta de cimento em contato com o agregado gráudo, que possui características diferentes do restante da pasta, podendo ser considerada então mais um componente do concreto, isto é, a chamada zona de transição.

Ter conhecimento sobre esta ótica nos permite que se detectem os pontos aonde o material não se comporta bem e abre caminho para que se intervenha, adicionando novos elementos ao concreto, que melhorem seu desempenho (KAEFER, 200?).

2.1.3. Produtos de hidratação

Araújo (2004) explica que para formação do concreto, misturam-se proporções de cimento, água, areia e brita de acordo com o traço pré-estabelecido. Quando o cimento é disperso em água, os produtos formados durante a fabricação do cimento: sulfato de cálcio e os compostos de cálcio, tendem a entrar em solução e a fase líquida torna-se rapidamente saturada. Aparecem cristais de sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), resultado de combinações entre o cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila. Depois de algumas horas aparecem os cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e os pequenos cristais fibrilares de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Devido a não completar a combinação dos compostos do clínquer com a água, sobram grãos de clínquer não hidratados na pasta de cimento. Dessa forma, a matriz da pasta de cimento e a zona de transição contêm produtos de hidratação, distribuídos heterogeneamente, com diferentes tipos e quantidades de fases sólidas.

Segundo Mehta & Monteiro (1994) o volume de sólidos na pasta hidratada é constituído por cerca de 50 a 60% de silicato de cálcio hidratado e de 20 a 25% de cristais de hidróxido de cálcio, que tende a formar cristais grandes. Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida (MEHTA & MONTEIRO, 1994) e, conseqüentemente, desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade.

2.1.4. Zona de Transição do Concreto

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), a zona de transição do concreto é a região compreendida pela interface entre a superfície do agregado e a pasta propriamente dita. Esta é a região mais fraca do concreto com porosidade elevada e com grande diferenciação de formas cristalinas.

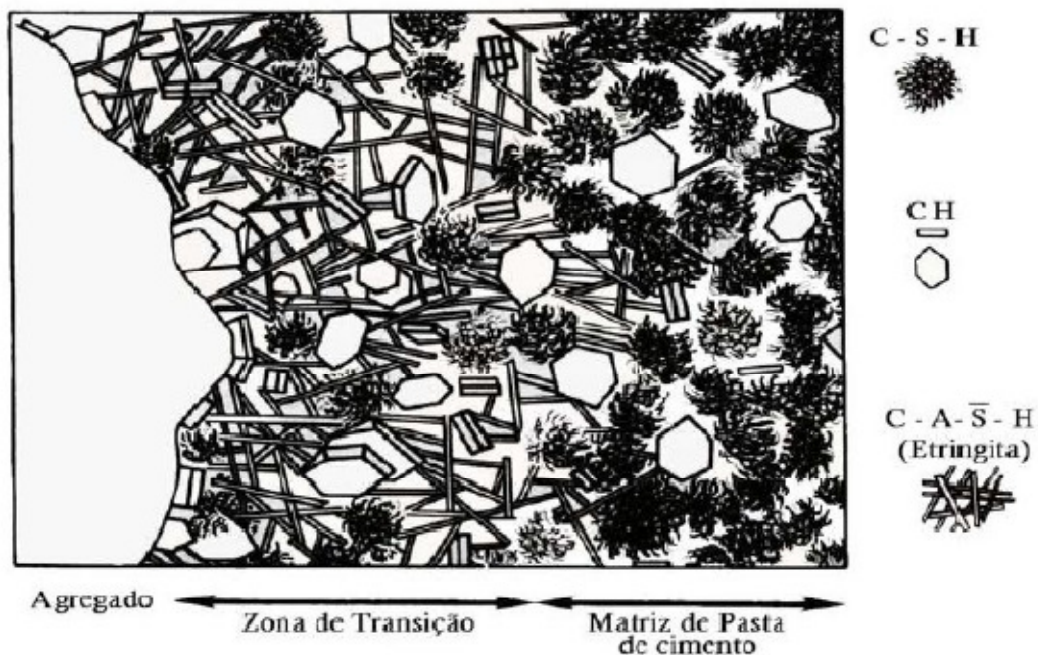


Figura 1. Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.1.5. Hidratação

De acordo com Kaefer (200?), o mecanismo de hidratação é constituído por um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases, seguido de um processo topo químico. De um modo simplista que o enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos já a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pelos silicatos (KAEFER, 200?).

2.1.6. Vazios na pasta endurecida

A porosidade da pasta de cimento hidratada distribui-se da seguinte forma (MEHTA & MONTEIRO, 1994):

- a) **poros de gel ou entre camadas de C-S-H:** vazios muito pequenos (com largura entre 5 e 25 Å), que não influem na resistência da pasta;
- b) **vazios capilares:** representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento. O volume total, e principalmente, a distribuição do tamanho dos poros afeta a resistência da pasta. Poros de pequeno diâmetro (< 50 nm) são descritos como pouco prejudiciais ao comportamento mecânico;
- c) **poros de ar incorporado:** possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser decorrentes de uma má vibração do concreto ou terem sido intencionalmente incorporados. Devido a suas grandes dimensões reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam a permeabilidade.

Os tamanhos característicos das fases sólidas e dos vazios na pasta explanados anteriormente são ilustrados por MEHTA & MONTEIRO (1994) na Figura 2.

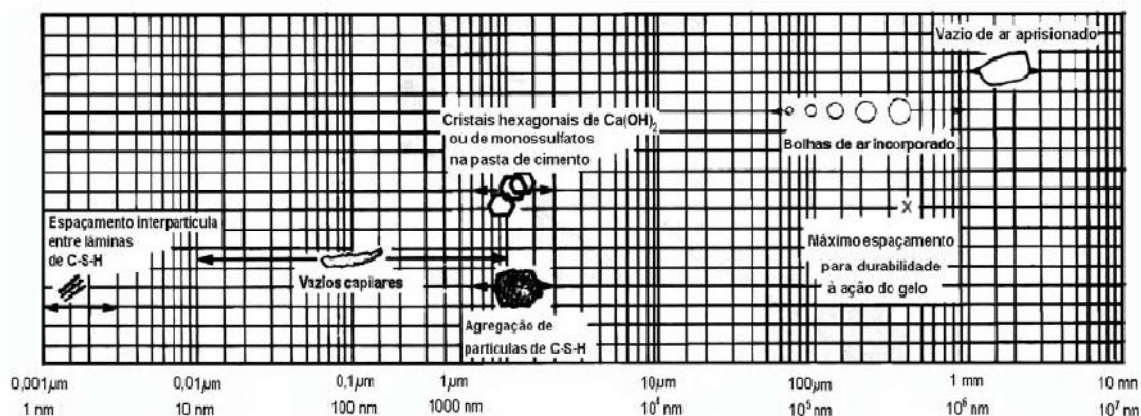


Figura 2. Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os vazios podem ser classificados em três: interlamelar no C-S-H, capilar e de ar incorporado.

Segundo Araújo (2004) em sua pesquisa bibliográfica, Powers (1962) apud Metha & Monteiro (1994) afirma que os vazios decorrentes dos espaços

interlamelares do C-S-H são responsáveis por 28% da porosidade capilar no C-S-H sólido e têm a largura de 18 Å. Já Feldman & Sereda (1970), apud Mehta & Monteiro (1994), sugerem que esse espaço não tem dimensão fixa, mas sim variável, de 5 a 25 Å. Apesar dessas divergências entre diferentes autores, o tamanho não é significativo na estrutura microscópica do concreto, portanto, este vazio não é considerado no estudo de fatores que possam influenciar a resistência e a permeabilidade da pasta. Por outro lado, devido à existência de água retida nesses vazios por pontes de hidrogênio, esses vazios podem influenciar na retração por secagem e na fluência do concreto.

De acordo com Araújo (2004), os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta. Ao acrescentar água ao cimento, ocorre o processo de hidratação. Nesse processo são formados produtos de hidratação através do consumo de água. Ocorre retração hidráulica que acaba reduzindo o volume total de uma mistura de cimento com água.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), a densidade do cimento Portland anidro é maior que a densidade média dos produtos de hidratação. Estima-se que 1 cm³ de cimento requer o dobro de espaço, após a hidratação completa, ao redor de 2 cm³, para acomodar os produtos de hidratação (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Porém, nem todo o espaço gerado é ocupado por cimento ou pelos produtos de hidratação. O espaço não ocupado consiste de vazios capilares. O volume e o tamanho dos capilares são determinados pela relação água/cimento utilizada que determina a distância inicial entre as partículas de cimento anidro da pasta de cimento recém misturada e o grau de hidratação do cimento.

Mehta & Monteiro (1994) quantifica as dimensões dos vazios capilares, comparando relação de água/cimento baixa e elevada. Em pastas com baixa relação água/cimento, ou seja, bem hidratadas, os vazios capilares podem variar entre 10 e 50 nm. Já em pastas de relação água/cimento elevada, nas primeiras idades de hidratação, os vazios capilares são bem maiores, podendo atingir de 3 a 5 µm (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Conforme apresentado no item 2.1.6.b, vazios maiores que 50 nm começam a prejudicar o comportamento mecânico.

Metha & Monteiro (1994) quantificam também a dimensão dos vazios capilares que têm forma irregular e dos vazios de ar incorporado que são geralmente esféricos. Estes vazios podem ser provocados propositadamente ao concreto pela adição de aditivos incorporadores de ar ou devido ao aprisionamento de ar na massa fresca do cimento durante a mistura. Conforme mostrado na figura 2, os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm e os por ar incorporado variam de 0,05 a 1 mm.

2.2. CIMENTO

O cimento empregado na composição do concreto é o objeto de estudo desse trabalho, com o objetivo de analisar sua influência no processo de carbonatação. Dessa forma torna-se necessário conhecer os tipos de cimento, bem como suas propriedades gerais e seu processo de produção.

2.2.1. COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (MATÉRIAS-PRIMAS)

Para conhecer bem as características e propriedades dos diversos tipos de cimento portland é importante estudar sua composição: clínquer e adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento portland.

Segundo o boletim técnico da ABCP BT-106 (2002), as adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

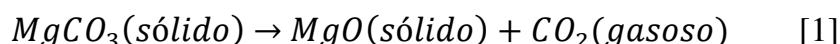
2.2.1.1 Clínquer

Na produção do cimento é necessária a obtenção de clínquer que tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. No seu processo de obtenção a rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C, onde a cada intervalo de temperatura ocorre uma transformação específica do material. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó, que é a forma final adotada (BT-106, 2002).

Segundo Taylor (1967), o processo de clinquerização divide-se nas seguintes etapas, de acordo com sua temperatura:

Em temperaturas abaixo de 100°C ocorre a evaporação da água e o H₂O líquido assume estado gasoso.

Em torno de 340°C inicia-se a decomposição do carbonato de magnésio, conforme demonstrado na equação 1.



Uma das reações mais importantes para obtenção do clínquer é a decomposição do carbonato de cálcio que tem início em temperatura acima de 805°C e que ressaltamos aqui por relacionar-se diretamente com o objeto do trabalho. Trata-se de reação de descarbonatação, conforme mostra a equação 2.

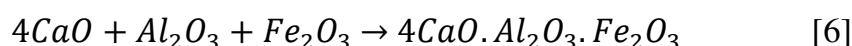
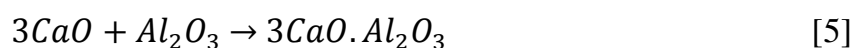
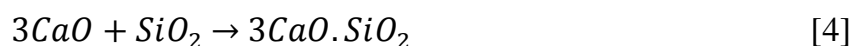
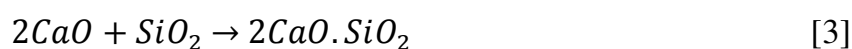


As primeiras reações de formação do clínquer iniciam-se em temperatura em torno de 550°C com a desidroxilação da fração argilosa. A argila

perde água dando origem a silicatos de alumínio e ferro altamente reativos com CaO.

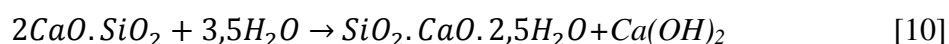
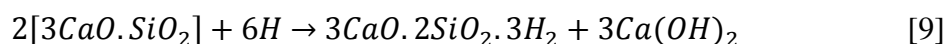
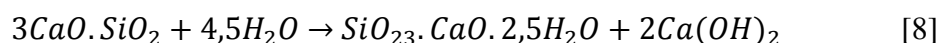
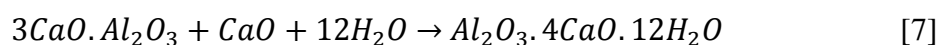
A formação de silicato dicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) inicia-se em temperatura de 900°C , onde sílica livre e CaO reagem lentamente. Essa reação é acelerada na presença de Ferro (Fe) e Alumínio (Al).

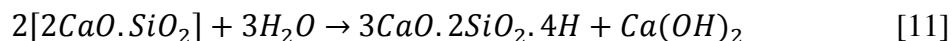
A última etapa, na temperatura mais elevada (entre 1200°C e 1450°C) é a formação de silicato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$). Os produtos da reação são $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ e o restante do CaO não combinado, conforme mostram as equação 3 a 6.



O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, denominada hidrólise, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.

De forma abreviada seguem as principais reações de hidratação, sendo que o primeiro a reagir é o $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (vide equação 7), seguido do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (equações 8 e 9), e o $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ reage muito mais tarde, conforme demonstrado nas equações 10 e 11, apresentadas a seguir:





2.2.1.2 Adições

De acordo com o BT-106 (2002) as adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento portland hoje disponíveis no mercado. Entende-se como sendo essas outras matérias-primas o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozzolânicos e os materiais carbonáticos. Cada material de adição tem uma característica específica, sendo a função básica do gesso controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. A ausência desse material de adição na moagem do clínquer inviabilizaria seu uso em obras, uma vez que o cimento endureceria quase que instantaneamente ao entrar em contato com a água. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa.

Durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas são obtidas as escórias de alto-forno que se assemelham aos grãos de areia. As escórias de alto-forno têm a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Por essa característica tornou-se possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final, além de atender plenamente aos usos mais comuns.

Outra matéria prima utilizada no cimento são os materiais pozzolânicos. Trata-se de rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Quando pulverizados em partículas muito

finas, os materiais pozolânicos também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, porém de forma distinta. Os materiais pozolânicos sob forma de pó muito fino não reagem quimicamente simplesmente na presença da água. Precisam além da água ainda de outro material, o clínquer, que no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana e nessa reação sim geram primeiro um estado pastoso e depois endurecido.

Por esse motivo a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade aos concretos e às argamassas.

Há pesquisas de outros materiais pozolânicos que possam ter seu uso consagrado, tais como as cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a sílica ativa, um pó finíssimo que sai das chaminés das fundições de ferro-silício e que, embora em caráter regional, já é empregado no Brasil.

Outro aditivo aos concretos e argamassas são os materiais carbonáticos. Trata-se de rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição garante propriedade de melhor trabalhabilidade, funcionando como um verdadeiro lubrificante, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento. Quando presentes no cimento são conhecidos como filler calcário.

Portanto, conclui-se que, de todas as adições, o gesso não pode, em hipótese alguma, deixar de ser misturado ao cimento. As demais matérias-primas adicionadas (escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) são totalmente compatíveis com o principal componente do cimento portland: o clínquer. Assim esses materiais conferem ao cimento pelo menos uma qualidade a mais, não devendo ser descartados.

2.2.2. TIPOS DE CIMENTO

As propriedades do cimento portland têm evoluído constantemente, inclusive com emprego de aditivos que melhoram as características do cimento. Hoje o cimento portland é normatizado e segundo o site cimento.org existem onze tipos mais comuns no mercado, dos quais descrevemos os a seguir.

2.2.2.1. Cimento Portland comum (CP-I)

O CP-I é o tipo mais básico de cimento Portland, indicado para uso em construções que não requeiram condições especiais e não apresentem ambientes desfavoráveis como exposição à águas subterrâneas, esgotos, água do mar ou qualquer outro meio com presença de sulfatos. A única adição presente no CP-I é o gesso (cerca de 3%, que também está presentes nos demais tipos de cimento Portland). O gesso atua como um retardador de pega, evitando a reação imediata da hidratação do cimento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 5732 (1991).

2.2.2.2. Cimento portland comum com adição (CP I-S)

O CP I-S, tem a mesma composição do CP I (clínquer+gesso), porém com adição reduzida de material pozolânico (de 1 a 5% em massa). Este tipo de cimento tem menor permeabilidade devido à adição de pozolana. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 5732 (1991).

2.2.2.3. Cimento portland composto com escória (CP II-E)

Os cimentos CP II são ditos compostos, pois apresentam, além da sua composição básica (clínquer+gesso), a adição de outro material. O CP II-E, contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. O CP II-E é composto de 94% à 56%

de clínquer+gesso e 6% à 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. O CP II-E, é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578 (1991).

A tabela 1 apresenta resumidamente as especificações e normas a serem seguidos para esse tipo de cimento, quanto aos seus ensaios físicos e químicos.

CP II-E-32	Especificações ABNT	
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤2,5	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO ₂ (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Tabela 1. Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CP-II-E-32

(fonte: cimento.org).

2.2.2.4. Cimento portland composto com pozolana (CP II-Z)

CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para

obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. O cimento CP II-Z, também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578 (1991).

2.2.2.5. Cimento portland composto com pozolana (CP II-F)

O CP II-E é composto de 90% à 94% de clínquer+gesso com adição de 6% a 10% de material carbonático (fíler) em massa. Este tipo de cimento é recomendado desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento porém não é indicado para aplicação em meios muito agressivos. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578 (1991).

2.2.2.6. Cimento portland de alto-forno (CP III)

O cimento portland de alto-forno contém adição de escória no teor de 35% a 70% em massa, que lhe confere propriedades como; baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividade (barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, etc) como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento, estruturas de concreto simples, armado ou protendido, etc. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 5735 (1991).

A tabela 2 apresenta resumidamente as especificações e normas a serem seguidos para esse tipo de cimento, quanto aos seus ensaios físicos e químicos.

CP III-32	Especificações ABNT	
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	-	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	≤4,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤1,5	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	-	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO ₂ (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Tabela 2. Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CP III-32 (fonte: cimento.org)

2.2.2.7. Cimento portland Pozolânico (CP IV)

O cimento portland Pozolânico contém adição de pozolana no teor que varia de 15% a 50% em massa. Este alto teor de pozolana confere ao cimento uma alta impermeabilidade e consequentemente maior durabilidade. O concreto confeccionado com o CP IV apresenta resistência mecânica à compressão superior ao concreto de cimento Portland comum à longo prazo. É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 5736 (1991).

2.2.2.8. Cimento portland de alta resistência inicial (CP V-ARI)

O CP V-ARI assim como o CP-I não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático). O que o diferencia deste último é processo de dosagem e produção do clínquer. O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do concreto em suas primeiras idades, podendo atingir 26MPa de resistência à compressão em apenas 1 dia de idade. É recomendado o seu uso, em obras onde seja necessário a desforma rápida de peças de concreto armado. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 5733 (1991).

A tabela 3 apresenta resumidamente as especificações e normas a serem seguidos para esse tipo de cimento, quanto aos seus ensaios físicos e químicos.

CP V-ARI	Especificações ABNT	
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	≥3000	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤6,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥14,0	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	-	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	≤4,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤1,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤3,5	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO ₂ (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Tabela 3. Especificações e normas dos ensaios físicos e químicos do CP V-ARI (fonte: cimento.org).

2.2.2.9. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)

Qualquer um dos tipos de cimento Portland anteriormente citados podem ser classificados como resistentes a sulfatos, desde que se enquadrem dentro de uma das características abaixo:

- a) Teor de aluminato tricálcico (C3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- b) Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- c) Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa e;
- d) Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos

É recomendado para meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos.

A tabela 4 apresenta um resumo comparativo dos vários tipos de cimento abordados neste capítulo, quanto a sua composição.

Tipo		Classes Resist. (Mpa)			Composição (%)				Norma Brasileira
					Clínquer + Gesso	Escória Alto-forno	Pozolana	Fíler	
1	CP I	25	32	40	100	0			NBR 5732
	CPI-S				95-99	1 - 5			
2	CP II-E	25	32	40	56-94	6 - 34	0	0-10	NBR 11578
	CP II-Z				76-94	0	6 - 14	0-10	
	CP II-F				90-94	0	0	6 - 10	
3	CP III	25	32	40	25-65	35-70	0	0-5	NBR 5735
4	CP IV	25	32	40	45-85	0	15-50	0-5	NBR 5736
5	CP V-ARI	25	32	40	95-100	0	0	0-5	NBR 5733

Tabela 4. Composição dos cimentos brasileiros(fonte: BT – 106 ABCP).

A tabela 5 apresentado a seguir resume as características físicas dos diversos tipos de cimento, dentre os quais destacam-se para este estudo os cimentos tipo II, III e V.

Tipos	Finura		Tempo de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão											
	# 200	Blaine	Início	Fim	A Frio	A quente	1 dia			3 dias			7 dias			28 dias		
	(75 µm)	(cm²/g)	(min)	(min)	(mm)	(mm)	25	32	40	25	32	40	25	32	40	25	32	40
1	CPI	≤12,0	≥1	≤10	≤5,0	≤5,0	≥8,0	≥10,0	≥15,0	≥15,0	≥20,0	≥25,0	≥25,0	≥32,0	≥40,0			
		≥2400																
		≥2600																
2	CPI-S	≤10,0	≥1	≤10	≤5,0	≤5,0	≥8,0	≥10,0	≥15,0	≥15,0	≥20,0	≥25,0	≥25,0	≥32,0	≥40,0			
		≥2400																
		≥2600																
3	CPI-II-F	≤10,0	≥1	≤12	≤5,0	≤5,0	≥8,0	≥10,0	≥12,0	≥15,0	≥20,0	≥23,0	≥25,0	≥32,0	≥40,0			
		≥2800																
		-																
4	CPI-III	≤8,0	≥1	≤12	≤5,0	≤5,0	≥8,0	≥10,0	≥12,0	≥15,0	≥20,0	≥23,0	≥25,0	≥32,0	≥40,0			
		≥3000																
		-																
5	CP V-ARI	≤6,0	≥1	≤10	≤5,0	≤5,0	≥14,0	≥24,0	≥34,0	≥34,0	≥34,0	≥34,0	≥34,0	≥34,0	≥34,0			

Tabela 5. Exigências físicas dos cimentos brasileiros (fonte: BT – 106 ABCP).

A tabela 6 resume as exigências químicas dos diversos tipos de cimento, conforme segue:

Tipos		Resíduo insolúvel	Perda ao fogo	MgO	SO	CO
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	CP I	≤1,0	≤2,0	≤6,5	≤4,0	≤1,0
	CP I-S	≤5,0	≤4,5	≤6,5	≤4,0	≤3,0
2	CP II-E	≤2,5	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
	CP II-Z	≤16,0	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
	CP II-F	≤2,5	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
3	CP III	≤1,5	≤4,5	---	≤4,0	≤3,0
4	CP IV	---	≤4,5	≤6,5	≤4,0	≤3,0
5	CP V-ARI	≤1,0	≤4,5	≤6,5	**	≤3,0

Tabela 6. Exigências químicas dos cimentos brasileiros (fonte: BT – 106 ABCP).

Para a realização do objeto de pesquisa, foram estudados três tipos de cimento: CP II E 40 (Votorantim e Lafarge), CP III, CP V Ari. Esta escolha baseou-se no fato desses cimentos serem os mais empregados e comuns de serem encontrados na região.

São fatores conhecidos e amplamente estudados quanto a influência dos diversos tipos de cimento nas propriedades físico-químicas do produto final, seja argamassas ou concretos, apresentadas na tabela 7 abaixo.

Propriedades	Tipo de Cimento						
	Comum e Cmposto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistencia Inicial	Resistente aos Sulfatos	Branco Estrutural	Baixo Calor de Hidratação
Resistências à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura
Calor gerado na reação do cimentos com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgoto)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Tabela 7. Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos (fonte: BT – 106 ABCP).

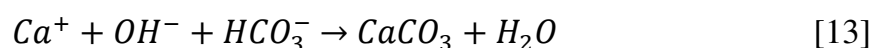
O objeto desse estudo é avaliar a influência dos tipos de cimento na propriedade de resistência à carbonatação, fenômeno explanado no próximo tópico.

2.3. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Segundo GOMES (2007) a carbonatação é um fenômeno natural, onde o concreto sofre a agressão do Dióxido de Carbono presente no meio, transformando o hidróxido de Cálcio presente, em Carbonato de Cálcio mais água, gerando a diminuição da alcalinidade da peça e a redução de volume (retração por carbonatação).

“A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio com o líquido intersticial existente nos poros do concreto, que se encontra saturado por hidróxidos de cálcio provenientes da hidratação do cimento, e também, com outros compostos hidratados do cimento em equilíbrio com o líquido intersticial. O ácido carbônico (H_2CO_3), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S) são os principais constituintes ácidos do meio (SCHRODER & SMOLCZYC *apud* CUNHA & HELENE, 2001)”

Segundo CARMONA (2005) as reações básicas são as seguintes, conforme equação 12 e 13:



E essa reação ocorre gradualmente, fazendo com que a espessura carbonatada aumente com o tempo e o PH da estrutura diminua (ARAÚJO, 2004).

De acordo com Salomão (2008) o fenômeno de carbonatação não é prejudicial ao concreto, mas sim o efeito que esse pode proporcionar ao concreto armado, já que o mesmo em presença de umidade e oxigênio dá-se início à corrosão.

Carmona (2005) apresenta os fatores que influenciam na carbonatação do concreto, como segue:

- a) Relação A/C;
- b) Tipo de cimento e adição;
- c) Concentração de CO₂ no ambiente;
- d) Cura e compactação do concreto;
- e) Umidade;
- f) Temperatura e;
- g) Fissuração.

2.3.1. Parâmetros determinantes da velocidade e profundidade de carbonatação

De acordo com Kazmierczak (1995), a velocidade e a profundidade de carbonatação estão relacionadas a fatores como o meio ambiente e as características finais do concreto endurecido. Na tabela 8 apresentada a seguir constam os fatores condicionantes bem como as características influenciadas.

	Fatores condicionantes	Características influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO ₂	- Mecanismos físico-químico - Velocidade de carbonatação
	Umidade reática do ambiente	- Grau de saturação dos poros - Velocidade de carbonatação
	Temperatura	- Velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento: - Características do clínquer - Teor de adições	- Porosidade da pasta carbonatada - Reserva alcalina
	Traço	- Porosidade
	Qualidade de execução: - Defeitos - Cuidados com a cura	- Porosidade - Grau de hidratação

Tabela 8. Principais fatores que determinam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995).

2.3.1.1. Condições de exposição

Para comparação de diferentes condições de exposição Helene (1995) reuniu em suas publicações a classificação de acordo com a agressividade do ambiente, baseando-se nas condições de exposição da estrutura ou de suas partes, levando em conta o macro e o micro-clima atuantes. A agressividade ambiental é avaliada de acordo com a durabilidade da armadura e do próprio concreto, considerando a classificação apresentada na tabela 9.

Classificação da agressividade do ambiente		
Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Tabela 9. Classificação da agressividade do ambiente (HELENE, 1995)

2.3.1.2. Concentração de CO₂

Segundo o princípio da Lei de Fick citado na obra de Kazmierczak (1995), a difusão do CO₂ pelos poros do concreto se dá na razão direta do

gradiente de concentração de CO_2 . De acordo com esse raciocínio, a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de. Figueiredo et al. (1993) reforça que a elevada relação água/cimento dos concretos define as características de compacidade da pasta de cimento endurecida, uma vez que este fator influi diretamente na qualidade do concreto.

A Tabela 10 mostra a correlação entre a agressividade do meio e a concentração de gás carbônico no ambiente (HELENE, 1995). O mesmo autor cita em obras anteriores (HELENE, 1986) valores típicos de concentração de CO_2 na atmosfera em ambientes diversos, podendo variar de 0,03% em ambientes rurais até 1,2% em ambientes urbanos.

Classe de agressividade	Agressividade	Concentração de gás carbonico
I	Atmosfera rural	$\leq 0,3\%$
II	Urbana	$\leq 0,3\%$
III	Marinha ou industrial	$\leq 0,3\%$
IV	Pólos industriais	$\leq 0,3\%$

Tabela 10. Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras – correlação com concentração de gás carbônico no ambiente (HELENE, 1995).

2.3.1.3. Umidade relativa do ambiente

A velocidade de difusão do CO_2 através dos poros de concreto é condicionada pela quantidade de água contida nos poros do concreto que por sua vez sofre influência pela umidade relativa do ar (U.R.) (FIGUEIREDO et al., 1993). A tabela 11 classifica segundo Helene (1995) a agressividade do ambiente em função da umidade relativa do ambiente.

Classe de agressividade	Agressividade	Umidade relativa do ar
I	Atmosfera rural	U.R. $\leq$ 60% interiores secos
II	Urbana	U.R. $\leq$ de 60% a 95% U.R. = 100% (submersa)
III	Marinha ou industrial	U.R. < de 60% a 100% (variável)
IV	Pólos industriais	Interiores úmidos de indústrias com agentes agressivos

Tabela 11. Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras – correlação com umidade do ar (HELENE, 1995).

Segundo Figueiredo et al. (1993) os maiores graus de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa situa-se entre 50 e 70% (média U.R. e alta difusão do CO₂). Ambientes com umidade relativa inferior a 20% (baixa U.R.) ou superior a 95% (meio saturado) não induzem absolutamente ao fenômeno de carbonatação ou então o fenômeno ocorre muito lentamente.

2.3.1.4. Temperatura

Kazmierczak (1995) cita em sua obra que em ensaios acelerados de carbonatação realizados por Papadakis et al. (1991) e Thomas & Matthews (1992) as variações de temperatura entre 20°C e 45°C não exercem influência significativa na velocidade de carbonatação. Nos ensaios todas as demais condições de exposição foram mantidas constantes e apenas a temperatura foi alterada dentro do intervalo citado. Não foi detectado efeito significativo da temperatura na velocidade de penetração da frente de carbonatação nos ensaios acelerados, uma vez que nesse tipo de ensaio o fenômeno preponderante de transporte é a difusão do CO₂ e sua velocidade é pouco influenciada por variações de temperatura.

Segundo HELENE *et. al.* (2007) são preferíveis os cimentos tipo comum e de alta resistência inicial sem aditivos para reduzir a profundidade de carbonatação. Ele ainda classifica a resistência dos concretos frente ao risco de corrosão, devido à deterioração por carbonatação, conforme a tabela 12.

Classe do concreto	Classe de resistência f_{ck} MPa	Máxima relação A/C	Deterioração por carbonatação (% de aditivos)
durável	$\geq C50$	$\leq 0,38$	$\leq 10\%$ de pozolana, sílica ativa, metacaulim ou escória de alto forno
Resistente	C 35 C 40 C 45	$\leq 0,50$	$\leq 10\%$ de pozolana ou sílica ativa ou metacaulim $\leq 15\%$ de escória de alto forno
Normal	C 25 C 30	$\leq 0,62$	Qualquer
Atacável	C 10 C 15 C 20	Qualquer	Qualquer

Tabela 12. Resistência do concreto frente ao risco de corrosão, devido à deterioração por carbonatação (HELENE *et. al.* , 2007).

Segundo Carmona (2005) é possível a previsão de expectativa de profundidade, conforme equação 14 a seguir:

$$e = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad [14]$$

Onde;

e = profundidade de carbonatação (mm);

k_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($\text{mm/ano}^{1/2}$) e;

t = Tempo (ano).

Com a observação de que se considera o coeficiente de difusão efetivo de CO_2 igual ao de O_2 , por facilidade em determinação no laboratório.

Observa-se ainda que Carmona (2005) diferencia o coeficiente de carbonatação (k_{CO_2}) para diferentes tipos de cimentos, e determina esses coeficientes conforme segue:

$$k_{CO_2} = (6,7882 - 0,1131 \times f_{ck}) \times \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad [15]$$

$$k_{CO_2AF} = 1,2 \times (6,7882 - 0,1131 \times f_{ck}) \times \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad [16]$$

$$k_{CO_2POZ} = 1,1 \times (6,7882 - 0,1131 \times f_{ck}) \times \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad [17]$$

Onde:

K_{CO_2} = coeficiente de carbonatação para CPI (mm/ano^{1/2})

K_{CO_2AF} = coeficiente de carbonatação para CPIII (mm/ano^{1/2})

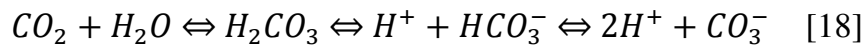
K_{CO_2POZ} = coeficiente de carbonatação para CPIV (mm/ano^{1/2})

F_{ck} = resistência característica do concreto (MPa)

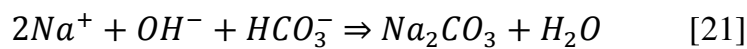
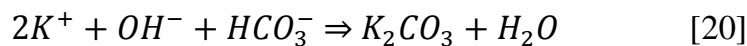
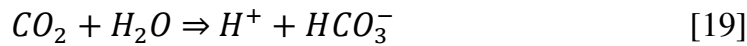
C_s = concentração ambiente do CO₂ (% volume)

É de se esperar, portanto, que a espessura de carbonatação para cimentos CPIII seja superior à espessura de carbonatação de cimentos CPIV e esta por sua vez superior a espessura de carbonatação de cimentos CPI, ou seja, o cimento CPIII é o menos resistente à carbonatação.

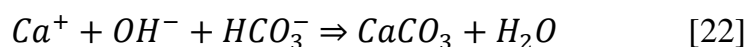
Para que a reação de carbonatação se produza naturalmente, é necessário que o anidrido carbônico (CO₂) seja solubilizado, conforme apresentado na Equação 18 (FORRESTER, 1976).



As equações 19 a 21 dos compostos básicos carbonatáveis do concreto, os álcalis do cimento mais solúveis (hidróxido de potássio KOH e hidróxido de sódio NaOH) são simplificadas e apresentadas a seguir.



A reação de carbonatação para o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 está apresentada na equação 22 a seguir:



Helene (1993) define a profundidade ou espessura de carbonatação, como sendo um frente que separa duas zonas de pH muito distintas, uma com pH próximo a 13 e outra com pH próximo a 8. A carbonatação dá-se a partir da superfície e avança progressivamente para o interior do concreto. Geralmente é expressa em mm ou em cm e na maioria das vezes é representada através de um valor médio, nem sempre muito uniforme, pois é medida em concretos contendo agregados graúdos com dimensão máxima característica acima de 19 mm.

2.4. ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO

Conforme explanado no item anterior, a carbonatação é um fenômeno natural, onde o concreto sofre agressão do dióxido de carbono presente no meio. Esta agressão ocorre continuamente e a degradação sob condições naturais é lenta. Por tratar-se de fenômeno importante quanto a avaliação da vida útil de um dos materiais mais empregados na construção civil, desenvolveram-se técnica de acelerar o ataque por dióxido de carbono para medir seu impacto no meio. Ainda pouco estudado e não normatizado, o ensaio acelerado de carbonatação está sendo aperfeiçoado em cada programa experimental onde é empregado, porém, consiste basicamente da construção de uma câmara de carbonatação, onde é introduzido dióxido de carbono sob pressão e os corpos de prova a serem ensaiados são submetidos a esse meio por tempo controlado.

Segundo PAULETTI (2004) ensaios acelerados de carbonatação não são normatizados, são de difícil comparação e os fatores mais significativos é a relação A/C e principalmente percentual de CO_2 . Sendo que as amostras carbonatadas em câmara saturada de CO_2 apresentaram um comportamento distinto daquelas carbonatadas a 6%, atingindo profundidades 116% maiores que

em ambientes saturados. O tipo de cimento, tipo de secagem e o tempo não apresentaram grande significância na profundidade de carbonatação, quando comparados aos demais fatores.

No caso desse estudo e programa experimental o ensaio resume-se em fechar hermeticamente a câmara de carbonatação, onde são introduzidos teores de CO_2 superiores ao encontrado na atmosfera, na concentração aproximada de 100%. A umidade interna da câmara é de aprox. 60% e a temperatura de aprox. 25°C. A entrada de CO_2 dá-se através de orifício com registro para monitorar a entrada do gás carbônico através de mangueira conectada a um cilindro. A saída do gás é impedida para manter o interior da câmara saturado e atingindo todos os corpos de prova dispostos em seu interior.

A averiguação do preenchimento de todo o interior da câmara é feita através da colocação da mangueira de saída do ar da câmara em um recipiente contendo uma solução alcalina com fenolftaleína. A solução terá coloração vermelhada, até que o CO_2 preencha a câmara e comece sair pela mangueira, provocando a carbonatação da solução alcalina contida no recipiente, tornando-a incolor. No momento em que a solução alcalina com fenolftaleína torna-se incolor os registros são fechados, tanto o de entrada de CO_2 quanto o de saída do ar, confinando os corpos-de-prova no interior da câmara, a qual estará totalmente preenchida com dióxido de carbono. O controle de umidade no interior da câmara de carbonatação é feito através do uso de uma solução de água e ácido sulfúrico na proporção 1:1, localizada no fundo da câmara de carbonatação.

2.5. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

Normalmente, para detectar a carbonatação, utiliza-se a fenolftaleína. Este reagente determina se o concreto está ou não está carbonatado, ou seja, nas áreas onde não houver mudança de cor, o concreto está carbonatado, as que

ficarem em tom rosa, não estão carbonatadas. Este sistema não quantifica a carbonatação, e sim, apenas a sua presença. A determinação precisa do pH do concreto é importante, pois, um concreto com o pH em torno de 13 necessita de pelo menos 7.000 a 8.000 partes por milhão (ppm) de cloretos, para ter um ambiente extremamente propício para o início das células eletroquímicas da corrosão. No caso de pH entre 10 e 11, a quantidade de cloretos necessário para promover a formação de células eletroquímicas de corrosão estará em torno de 100 ppm ou menos.

De acordo com PAULETTI (2004) o armazenamento e análise de imagens digitais mostram-se adequada para os estudos de profundidade de carbonatação, pois, medições que ficaram duvidosas ou que precisem ser conferidas podem ser refeitas, sem qualquer perda de definição da frente de carbonatação, uma vez que as imagens ficarão armazenadas. Isso também possibilita que a análise seja feita com menor desgaste do operador, em relação à medição com paquímetro, que necessita ser feita no máximo cerca de 24 horas após a aspersão da fenolftaleína, sob o risco de perder definição da frente de carbonatação. Essa técnica de análise digital também permite que as imagens sejam resgatadas no futuro, para a realização de outras medidas.

Este capítulo apresentou o embasamento teórico para o programa de pesquisa experimental, abordando os tópicos principais e relevantes para este experimento, orientando a modelagem da parte prática em laboratório.

Foram abordados os tópicos de estrutura de concreto, os diferentes tipos de cimento, dando enfoque maior para os empregados no experimento, o processo de carbonatação acelerada e métodos de medição da frente de carbonatação.

O capítulo seguinte apresenta a metodologia empregada na condução do experimento, mostrando alguns ensaios de verificação durante a moldagem dos corpos de prova. Apresenta também a câmara de carbonatação montada pelos alunos para condução do ensaio de carbonatação acelerada.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme o panorama apresentado na revisão bibliográfica do capítulo anterior, o programa experimental será descrito detalhadamente neste capítulo. Resumidamente o programa experimental consistiu em moldagem de corpos de prova, exposição à câmara de carbonatação, medição das profundidades de carbonatação atingidas com o avanço do tempo.

3.1. MATERIAIS

No programa experimental deste estudo optou-se por comparar resultados de três tipos de cimento: CP II E 40 (Votorantim e Lafarge), CP III (Votorantim), CP V Ari (Votorantim).

Os demais materiais empregados na moldagem dos corpos de prova foram: areia lavada, brita 1 e água.

Os materiais bem como sua dosagem foram cuidadosamente monitorados, mantendo-se como única variável o tipo de cimento, todos os demais materiais foram retirados dos mesmos lotes e preparados identicamente.

Os materiais empregados estão retratados na foto 1, sendo que para cada traço do concreto foi utilizado recipiente de cor específica, diferenciando os diferentes tipos de cimento.



Foto 1. Materiais empregados nos corpos de prova.

Para mistura e homogeneização do concreto foi utilizada uma betoneira de 200 (duzentos) litros, conforme mostra a foto 2.



Foto 2. Betoneira empregada

3.2. TRAÇO DO CONCRETO

O Traço experimental utilizado foi 1:2,28:3,61:0,765, com um consumo mínimo de cimento determinado pela ABNT NBR 12655:2006 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Foi adotado fator água cimento 0,765 para obtenção de concreto poroso, facilitando a penetração de CO₂ e conseqüente carbonatação.

3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos padrão de 10x20 para cada tipo de cimento, sem armadura, conforme mostra a foto 3.



Foto 3. Formas metálicas 10x20cm.

A moldagem dos corpos-de-prova e slump teste foram realizados de acordo com ABNT NBR 5738:2008 - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. O slump-test realizado está demonstrado na foto 4.



Foto 4. Slump test

Os resultados do teste de Abatimento serão apresentados na tabela 13 onde pode-se observar uma homogeneidade dos traços no que se refere à trabalhabilidade, revelada pelo abatimento do tronco de cone.

Tipo de Cimento	Marca	Slump Teste	R%	Temperatura °C
CP II E 40	Votorantim	12	55	28
CP II E 40	Lafarge	11	49	29
CP III	Votorantim	12	44	30
CP V-ARI	Votorantim	12	72	19

Tabela 13. Resultados do teste de abatimento.

Nota-se que apesar de atingir temperaturas bastante discrepantes, chegando a variações de até 30% da média, os resultados de abatimento do tronco de cone estão praticamente constantes, conforme o esperado, notando-se apenas pequeno desvio do corpo de prova moldado com CP II E 40 da Lafarge.

Após realização da moldagem e verificação do slump test foi realizado o ensaio de Teor de ar incorporado do Concreto conforme ABNT NBR 9833:2008 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. As fotos 5.a e 5.b mostram os ensaios realizados.



(a)



(b)

Foto 5. Ensaios do teor de ar incorporado e equipamento utilizado.

Os resultados obtidos da medição de Teor de ar incorporado estão representados na tabela 14 a seguir.

Tipo de Cimento	Marca	Teor de ar Incorporado %
CP II E 40	Votorantim	1,7
CP II E 40	Lafarge	1,7
CP III	Votorantim	1,8
CP V-ARI	Votorantim	1,9

Tabela 14. Resultados da medição de teor de ar incorporado

Segundo a NBR 9833:2008, o teor de ar incorporado no concreto não pode ser superior a 3%, portanto as medições estão dentro dos padrões estabelecidos, notando-se ainda pequena variação entre os diversos tipos de cimento.

Depois de executado e concluído os ensaios, o concreto foi moldado nas fôrmas, conforme pode ser visto na foto 6. A desmoldagem deu-se após 24 horas.



Foto 6. Concreto moldado

3.4. CURA

Os corpos-de-prova foram desmoldados depois de 24 (vinte e quatro) horas e encaminhados à câmara de cura úmida para cura durante 28 dias, como pode ser observado na foto 7.



Foto 7. Cura úmida

3.5. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

Para acelerar o processo do avanço da frente de carbonatação do concreto, houve exposição dos corpos de prova a uma câmara sendo desenvolvida pelos próprios colaboradores desta pesquisa, com dimensões conforme ilustrado na figura 3.

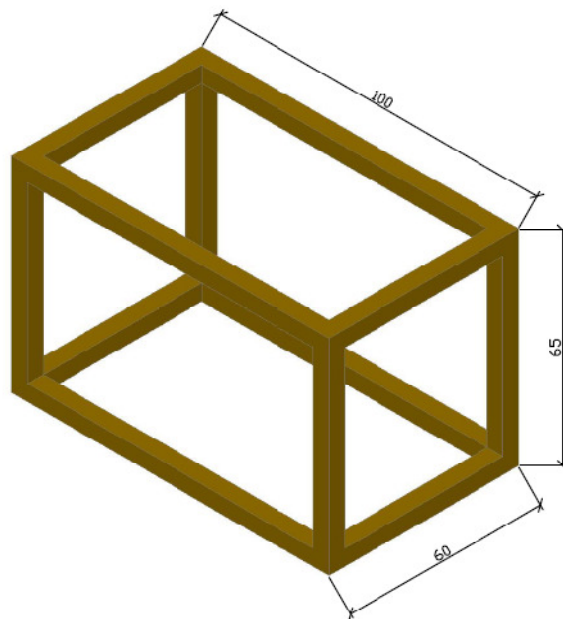


Figura 3. Dimensões da câmara de carbonatação (em cm)

A carbonatação foi obtida com concentração de gás carbônico de 100% (cem por cento), nos primeiros 11 dias e aproximadamente 50% a partir do 12º ao 28º dias.



Foto 8. Câmara de Carbonatação

A câmara de carbonatação consiste em caixa de madeira compensada com placas de espessura de 0,5mm coberta com plástico de 300 micras, fechada, com uma “porta” para remoção e colocação dos corpos-de-prova na sua área interna. Sua vedação foi realizada com silicone e grampos, além de impermeabilizá-la na área em que os corpos-de-prova ficaram apoiados. Para a entrada de gás carbônico, foram realizados dois orifícios na sua parte traseira, conforme mostra a foto 9.



Foto 9. Orifícios para entrada de CO₂

Para controlar a pressão da câmara, foi necessário não realizar a vedação de uma extremidade da caixa e a pressão foi controlada no visual, ou seja, no momento em que o plástico estufava a pressão era diminuída no cilindro.



Antes

Durante

Foto 10. Antes e durante insuflamento da câmara de CO₂.

3.6. VARIÁVEIS

As variáveis independentes desse programa experimental foram os tipos de cimento, que no caso foram: Cimento Portland Tipo II-E, classe 40 – Votorantim e Lafarge, Cimento Portland Tipo III, Cimento Portland Tipo V-ARI – Votorantim. Os corpos de prova moldados com cimentos diferentes foram nomeados por séries, conforme apresentado na tabela 15 a seguir.

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca
S1	1, 2, 3 e 4	CP II E 40	Votorantim
S2	1, 2, 3 e 4	CP II E 40	Lafarge
S3	1, 2, 3 e 4	CP III	Votorantim
S4	1, 2, 3 e 4	CP V-ARI	Votorantim

Tabela 15. Nomenclatura dos CPs por série, de acordo com o cimento utilizado.

Neste trabalho as variáveis dependentes foram a medição do pH do concreto, a profundidade de carbonatação, concentração de CO₂ além da resistência à compressão dos corpos-de-prova carbonatados e não carbonatados.

As variáveis supramencionadas permitem a discussão técnica da profundidade de frente de carbonatação com diversos tipos de cimento.

3.7. MEDIÇÕES

Foram realizadas medições de concentração de CO₂ e umidade do ar durante o ensaio de carbonatação acelerada. Após retirada dos corpos de prova da câmara de carbonatação foram realizadas as medições de profundidade de carbonatação. Para tanto, foram empregados os equipamentos descritos a seguir.

Os equipamentos de medição utilizados, expostos na foto 11 (a,b,c,d) serão apresentados brevemente a seguir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Foto 11. Equipamentos de medição utilizados (a) Medidor de concentração de CO₂, (b) Lápis medidor de pH, (c) Thermohigrômetro e (d) paquímetro.

O Thermohigrômetro Minipa MT 241, equipamento utilizado para controle de umidade relativa do ar e temperatura no interior da câmara de carbonatação, foi representado na foto 11 (c).

Para verificação do pH do concreto foi utilizado lápis medidor de pH, conforme foto 11 (b).

O medidor de concentração de CO_2 Testo, equipamento utilizado para controle de Concentração de gás carbônico no interior da câmara está representado na foto 11 (a).

O instrumento apresentado na foto 11 (d): um paquímetro, foi empregado para medição da profundidade de carbonatação

3.8. ENSAIOS

Neste item serão descritos os ensaios realizados e sua metodologia. Ressalta-se que os resultados obtidos no experimento serão apresentados e interpretados no capítulo 4 desse trabalho.

3.8.1. ENSAIO DE pH

Inicialmente foi medido o pH dos corpos-de-prova com lápis medidor de superfície para posteriormente encaminhá-los a câmara de carbonatação, conforme mostra a foto 12.

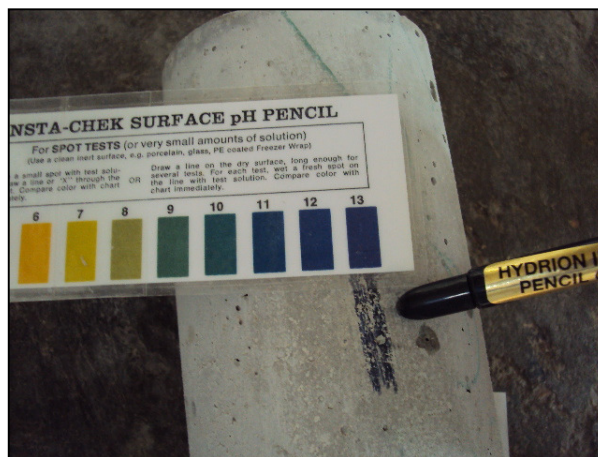


Foto 12. Ensaio superficial de pH com lápis medidor

O ensaio neste corpo-de-prova mostra por comparação de escala de cores que o pH é de 13.

3.8.2. Ensaio acelerado de carbonatação

Os corpos-de-prova foram colocados dentro da Câmara de Carbonatação sendo medido por equipamento apropriado, com alta concentração de CO₂ conforme foto 13.



Foto 13. Ensaio de concentração de CO₂ com medidor eletrônico.

Nos primeiros onze dias foram introduzidas doses altas de CO₂, ou seja, o cilindro emanava vinte minutos de CO₂ três vezes ao dia. A partir do décimo segundo dia a emanção era de dois minutos uma vez ao dia.

Após 11 (onze) dias os corpos-de-prova foram retirados da câmara para verificação da frente de carbonatação. O motivo pelo qual foram deixados os onze dias é devido ao não registro de trabalho deste tipo jungido com poucos recursos financeiros e, portanto, deixamos o mesmo por mais um período de tempo.

A concentração de CO₂ foi verificada com instrumento apropriado. Segundo relatórios divulgados pelo Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas a atual concentração de CO₂ é de 381 ppm, o utilizado nesta pesquisa foi conforme tabela 16.

11 dias ppm	12° ao 28° dias ppm
≥ 10000	5200 a 6000

Tabela 16. Quantidades de CO₂ na câmara durante o ensaio de ppm

Após os 11 (onze) dias a concentração foi em menor intensidade, ou seja, dois minutos uma vez ao dia medindo a cada duas horas no 12° e 13° dias conforme tabela 17 e após esse período, passou-se a medir somente 3 vezes ao dia variando conforme e a figura 4 transcrita abaixo.

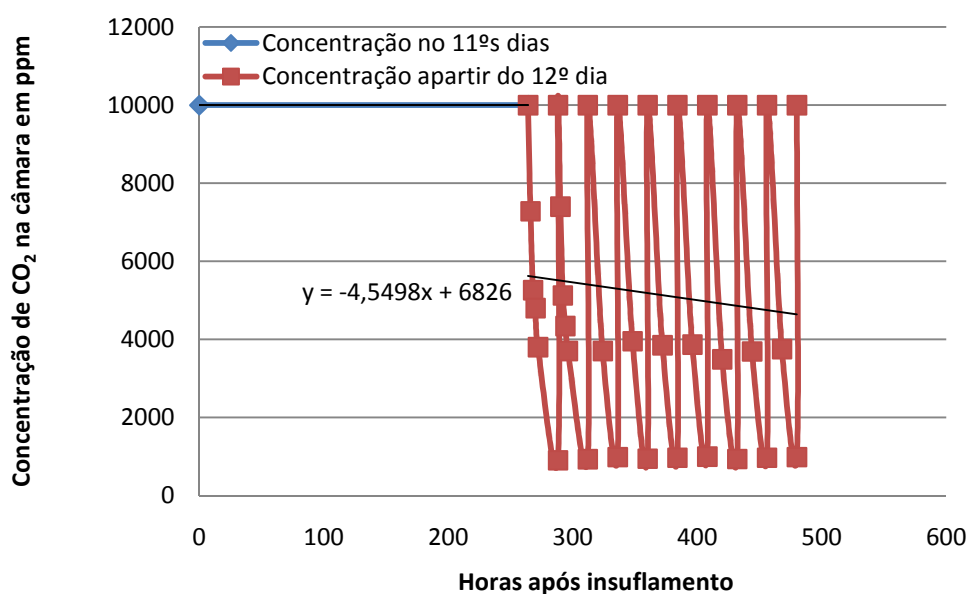
Dia ppm	Horas após	ppm
12	0	9999
12	2	7280
12	4	5259
12	6	4800
12	8	3800
12	24	900
13	0	9999
13	2	7400
13	4	5125
13	6	4340
13	8	3700

Tabela 17. Variação da concentração de CO₂ dentro da câmara.

Os valores de concentração de CO₂ medidos dentro da câmara de carbonatação foram medidos com equipamento, cujo valor de leitura máxima era de 9999 ppm, portanto, houve separação em valores acima de 10.000 ppm e apenas abaixo desse valor foi possível estabelecer um intervalo.

Como após o 11º dia houve uma redução na introdução de CO₂, houve diminuição da concentração, conforme apresentado na tabela 17. Para melhor visualização dos dados obtidos na tabela 17 representamos graficamente a curva de concentração dos primeiros 11 dias e após a mudança do procedimento.

Figura 4. Variação na concentração de CO₂ ao longo das horas.



Observa-se que após o 11º dia a concentração média no interior da câmara foi de aproximadamente 5000 ppm ou seja 50%.

3.8.3. Ensaio de profundidade de Carbonatação

Após retirados da câmara de carbonatação, foram cortadas fatias de aprox. 3cm de espessura de cada corpo-de-prova para verificação do avanço da frente de carbonatação.

A frente de carbonatação foi detectada por meio do uso de aspersão de fenolftaleína que ao entrar em contato com a superfície do corpo-de-prova reage quimicamente e sua cor rosa/avermelhada indica que o concreto não está carbonatado; já o não aparecimento da cor rosa/avermelhado indica superfície carbonatada, conforme pode ser verificados nas fotos 14, 15 e 16.

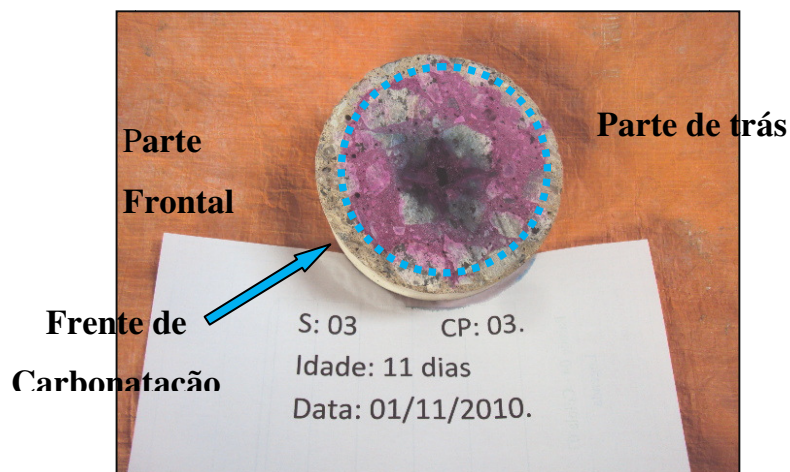


Foto 14. Detalhe do corpo de prova (CP03) após aplicação de fenolftaleína.

Nesta fatia do corpo de prova nota-se diferença no avanço da frente de carbonatação, devido à frente de exposição dentro da câmara de carbonatação. Onde houve incidência direta de CO_2 a carbonatação avançou mais, apresentando cor de concreto com espessura maior que a parte de trás, que não ficou diretamente exposta ao CO_2 .

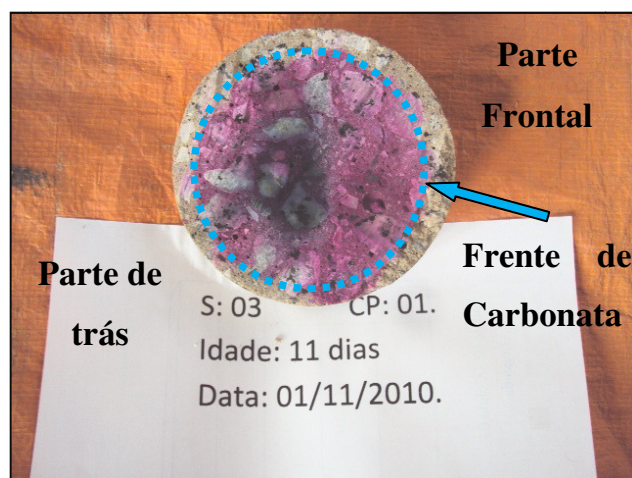


Foto 15. Detalhe do corpo de prova (CP01) após aplicação de fenolftaleína.

Nesta fatia do corpo de prova nota-se da mesma forma a diferença no avanço da frente de carbonatação. Portanto, isso demonstra que a localização dos corpos de prova dentro da câmara de carbonatação que será ilustrado com as figura 5, 6 e 7, é relevante e deve ser levada em consideração na avaliação dos resultados. A face exposta diretamente ao orifício da entrada de CO_2 mostrou

frente de carbonatação superior à face oposta como já apresentado nas fotos 14 e 15.

A frente de carbonatação foi medida por meio de paquímetro digital, notando-se na foto 16 um avanço de 7,85mm no ponto de maior frente de carbonatação do CP 01 da série 03 (cimento CP-III), aos 11 dias de exposição à câmara de carbonatação.



Foto 16. Detalhe do sistema de medição da frente de carbonatação no corpo de prova (CP01) após aplicação de fenolftaleína.

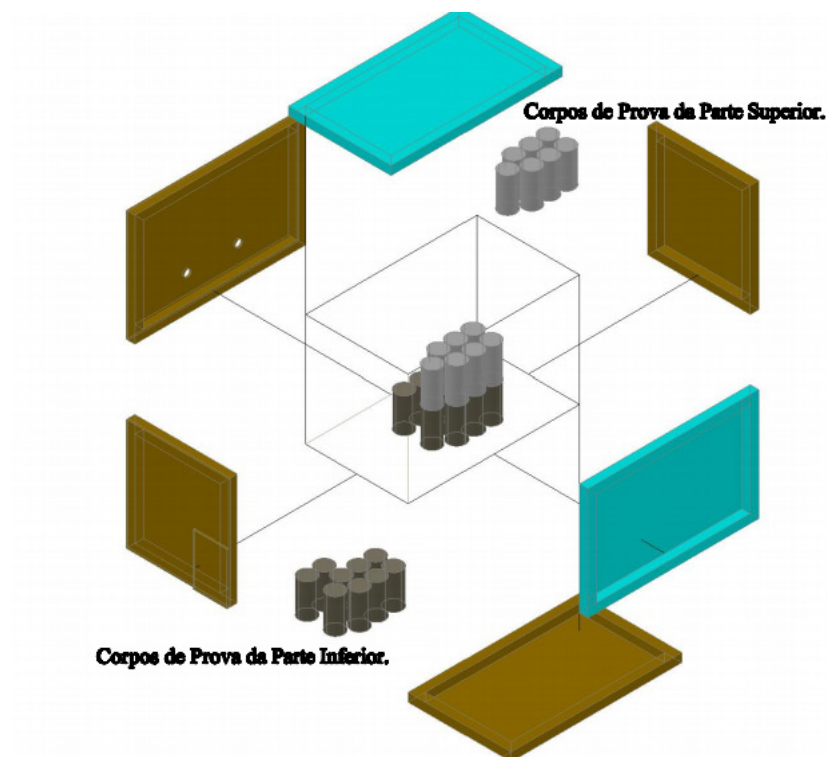


Figura 5. Corpos de prova dentro da câmara de carbonatação

As figuras 6 e 7 representam como que a localização dos corpos-de-prova dentro da câmara de carbonatação responde frente à incidência direta de CO_2 nos mesmos. Procurou-se por meio de fotos posteriores ao ensaio de pH organizá-los da maneira que estavam antes do ensaio.

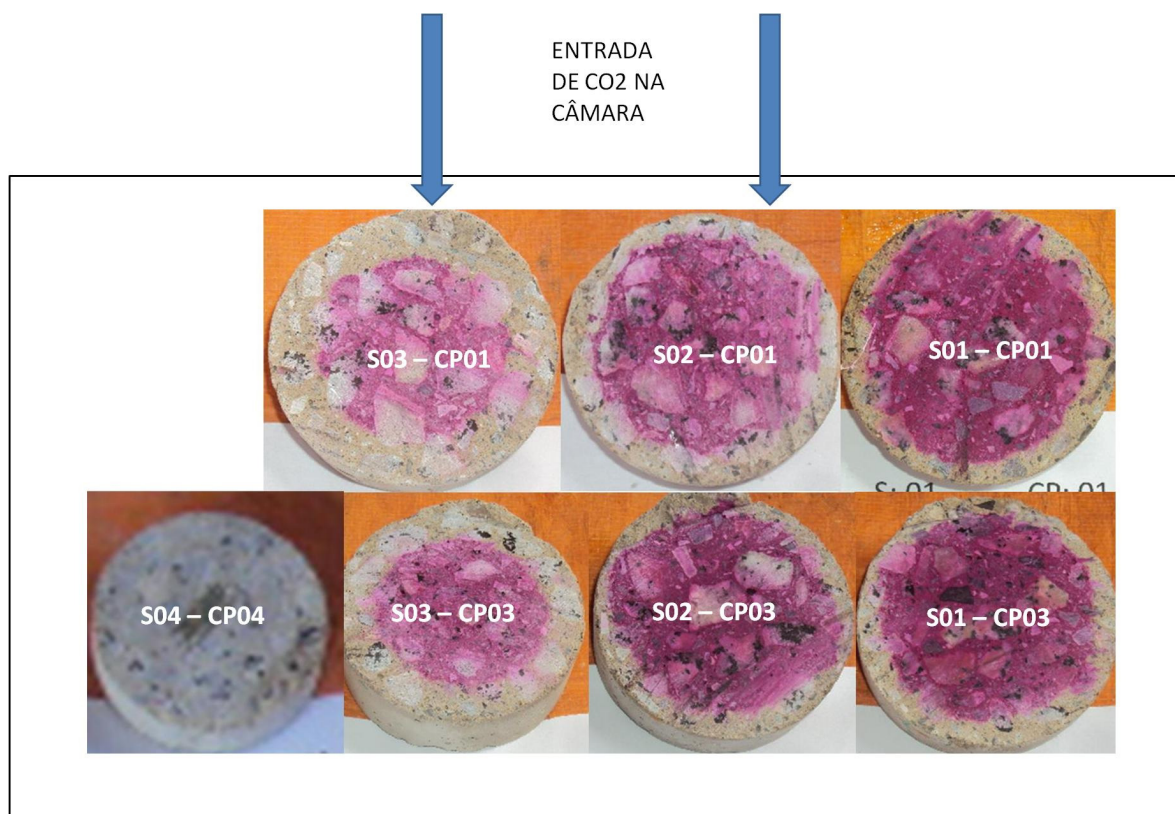


Figura 6. Corpos de prova da camada superior de dentro da câmara de carbonatação

Os corpos de prova CP 04 apresentados nas figuras 6 e 7 não foram objeto de aplicação de fenolftaleína, pois sua utilidade foi para posterior ensaio a compressão.

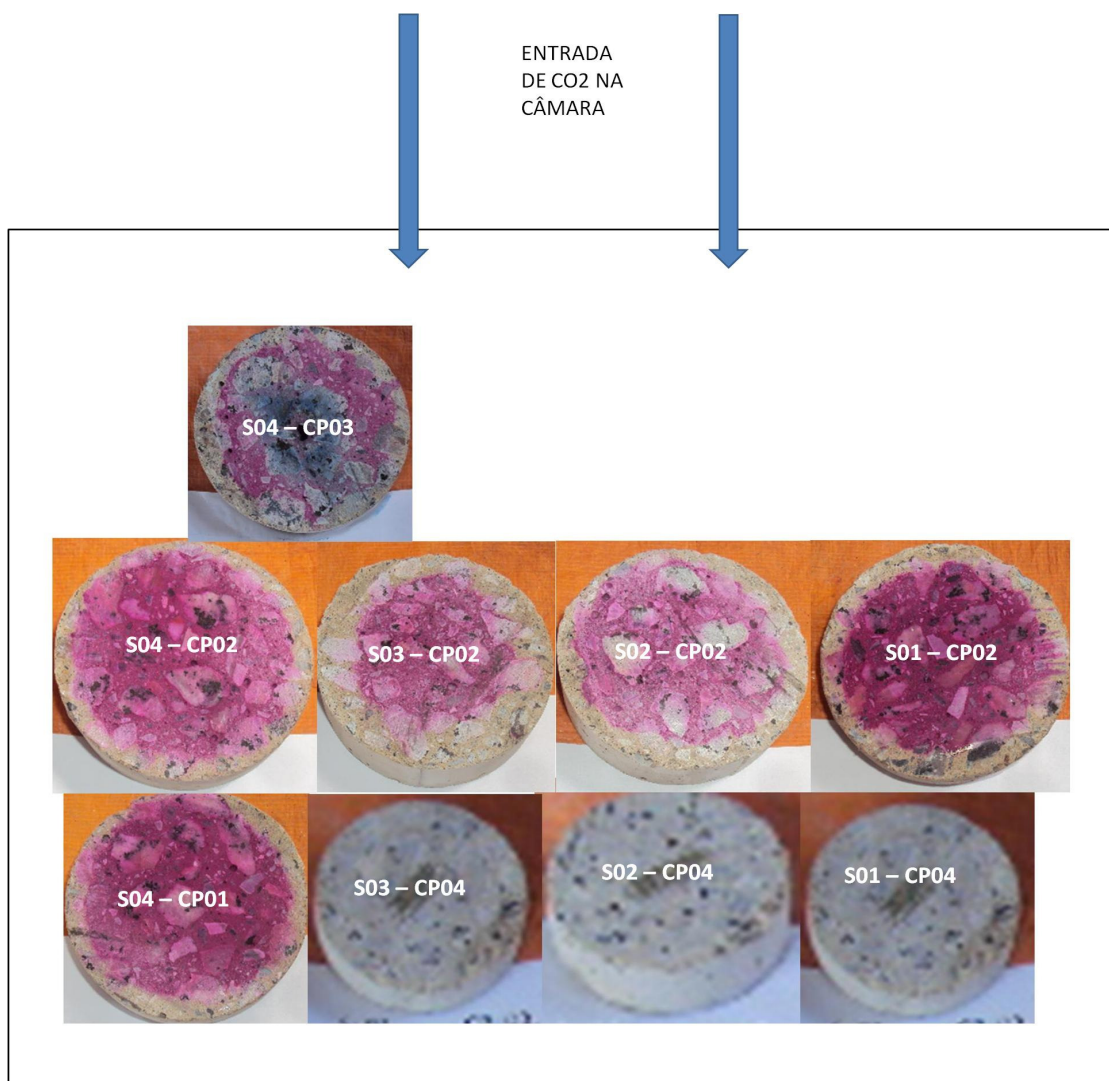


Figura 7. Corpos de prova da camada inferior de dentro da câmara de carbonatação

Este capítulo apresentou o programa experimental e procedimento adotados para medição dos resultados obtidos.

Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte, que também terá uma breve análise desses dados, com base na pesquisa bibliográfica realizada e delineado no capítulo 2.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada uma compilação dos resultados obtidos no programa experimental, seguida de análise, conforme a hipótese criada no capítulo 1 e embasada teoricamente com a revisão bibliográfica realizada no capítulo 2.

4.1. Ensaios de pH

Foram realizados ensaios de pH em todos os CPs antes e após a retirada dos mesmos da Câmara de carbonatação, cujos resultados apresentamos na tabela 18 a seguir.

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	pH
S1	1	CP II E 40	Votorantim	12
S1	2	CP II E 40	Votorantim	12
S1	3	CP II E 40	Votorantim	12
S1	4	CP II E 40	Votorantim	12
S2	1	CP II E 40	Lafarge	13
S2	2	CP II E 40	Lafarge	13
S2	3	CP II E 40	Lafarge	13
S2	4	CP II E 40	Lafarge	13
S3	1	CP III	Votorantim	12
S3	2	CP III	Votorantim	12
S3	3	CP III	Votorantim	12
S3	4	CP III	Votorantim	12
S4	1	CP V-ARI	Votorantim	13
S4	2	CP V-ARI	Votorantim	13
S4	3	CP V-ARI	Votorantim	13
S4	4	CP V-ARI	Votorantim	13

Tabela 18. Ensaios de pH antes de submetidos ao ensaio de carbonatação.

Os resultados apresentados na tabela 18 comprovam a teoria de que o concreto em seu estado inicial, após moldagem e cura, apresenta pH de alta alcalinidade. Notou-se ainda diferenças características entre tipos de cimento, sendo que para os cimento CP II E 40 Votorantim e CP III Votorantim obteve-se média de pH de 12, já para os outros dois tipos de cimento, média de pH de 13.

Após submetidos ao ensaio de carbonatação acelerado, o pH dos corpos de prova foi novamente medido com lápis medidor de pH.

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	pH
S1	1	CP II E 40	Votorantim	6
S1	2	CP II E 40	Votorantim	6
S1	3	CP II E 40	Votorantim	6
S2	1	CP II E 40	Lafarge	6
S2	2	CP II E 40	Lafarge	6
S2	3	CP II E 40	Lafarge	6
S3	1	CP III	Votorantim	5
S3	2	CP III	Votorantim	5
S3	3	CP III	Votorantim	5
S4	1	CP V-ARI	Votorantim	8
S4	2	CP V-ARI	Votorantim	9
S4	3	CP V-ARI	Votorantim	8

Tabela 19. Ensaios de pH após ensaio de carbonatação (11 dias)

Os resultados obtidos após ensaio de carbonatação demonstram diferença do pH dos diferentes cimentos, ressaltando-se, que o cimento CP V ARI teve pH em torno de 9, bem acima da média de 6 dos CP II E (ambos os fabricantes) e que o CP III ficou com o menor pH. Diferenças essas mantidas aos 28 dias, representadas na tabela 20.

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	pH
S1	1	CP II E 40	Votorantim	4
S1	2	CP II E 40	Votorantim	4
S1	3	CP II E 40	Votorantim	4
S1	4	CP II E 40	Votorantim	-
S2	1	CP II E 40	Lafarge	4
S2	2	CP II E 40	Lafarge	4
S2	3	CP II E 40	Lafarge	4
S2	4	CP II E 40	Lafarge	-
S3	1	CP III	Votorantim	2
S3	2	CP III	Votorantim	3
S3	3	CP III	Votorantim	2
S3	4	CP III	Votorantim	-
S4	1	CP V-ARI	Votorantim	6
S4	2	CP V-ARI	Votorantim	6
S4	3	CP V-ARI	Votorantim	7

Tabela 20. Ensaios de pH após ensaio de carbonatação (28 dias)

Após 28 dias houve avanço na diminuição do pH, ou seja, os resultados obtidos após ensaio de carbonatação demonstram diferença do pH dos diferentes cimentos, ressaltando-se, que o cimento CP V ARI manteve seu pH mais alto que os demais enquanto o CP III continuou com o menor pH em relação aos demais. Pode-se então resumir esses dados em um gráfico para melhor visualizar a situação conforme figura 8.

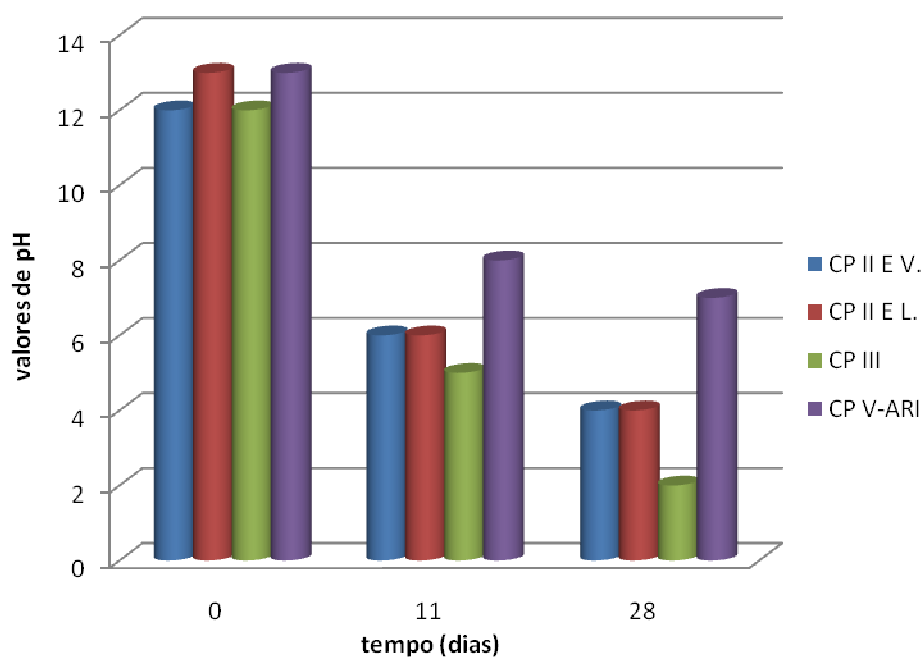


Figura 8. Ensaios de pH aos 0, 11 e 28 dias.

4.2. Ensaios de frente de carbonatação

Após os ensaios ficou latente que a frente de carbonatação evoluiu em função da locação dos corpos-de-prova conforme tabelas 21 e 22 a seguir:

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	Carbonatação Parte frontal (mm)	Carbonatação Parte de trás (mm)
S1	1	CP II E 40	Votorantim	4,59	3,81
S1	2	CP II E 40	Votorantim	4,08	3,75
S1	3	CP II E 40	Votorantim	4,60	3,27
S1	4	CP II E 40	Votorantim	-	-
S2	1	CP II E 40	Lafarge	7,77	5,61
S2	2	CP II E 40	Lafarge	6,02	5,06
S2	3	CP II E 40	Lafarge	2,77	2,45
S2	4	CP II E 40	Lafarge	-	-
S3	1	CP III	Votorantim	7,85	4,85
S3	2	CP III	Votorantim	6,98	5,09
S3	3	CP III	Votorantim	5,41	4,42
S3	4	CP III	Votorantim	-	-
S4	1	CP V-ARI	Votorantim	2,72	1,43
S4	2	CP V-ARI	Votorantim	3,34	2,15
S4	3	CP V-ARI	Votorantim	3,68	2,45
S4	4	CP V-ARI	Votorantim	-	-

Tabela 21. Medição da frente de carbonatação (aos 11 dias).

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	Carbonatação Parte frontal (mm)	Carbonatação Parte de trás (mm)
S1	1	CP II E 40	Votorantim	11,16	7,46
S1	2	CP II E 40	Votorantim	10,91	7,85
S1	3	CP II E 40	Votorantim	9,87	8,01
S1	4	CP II E 40	Votorantim	-	-
S2	1	CP II E 40	Lafarge	10,62	9,60
S2	2	CP II E 40	Lafarge	10,24	7,72
S2	3	CP II E 40	Lafarge	9,65	6,46
S2	4	CP II E 40	Lafarge	-	-
S3	1	CP III	Votorantim	16,57	13,59
S3	2	CP III	Votorantim	15,22	12,60
S3	3	CP III	Votorantim	12,45	9,42
S3	4	CP III	Votorantim	-	-
S4	1	CP V-ARI	Votorantim	7,24	6,25
S4	2	CP V-ARI	Votorantim	7,11	6,01
S4	3	CP V-ARI	Votorantim	-	-
S4	4	CP V-ARI	Votorantim	-	-

Tabela 22. Medição da frente de carbonatação (aos 28 dias).

Além da diferença da frente de carbonatação em função da locação dos corpos-de-prova na câmara, as tabelas 21 e 22 apontam também a diferença de avanço da carbonatação dos diferentes tipos de cimento. Nota-se avanço maior nos corpos de prova de cimento tipo CP II E 40 (Lafarge) e CP III, enquanto os corpos de prova do CP V ARI apresentaram o menor avanço da frente de carbonatação, comprovando a maior resistência do CP V que foi apontada na revisão bibliográfica.

Para efeito de comparação dos resultados obtidos, foram calculadas as médias dos valores de avanço maior (frente exposta diretamente ao CO₂), conforme apresentamos na tabela 23 e na figura 9 a seguir.

Série (S)	Tipo de Cimento	Marca	Média da carbonatação Parte frontal (mm) – aos 11 dias	Média da carbonatação Parte frontal (mm) – aos 28 dias	Aumento da frente de carbonatação (%)
S1	CP II E 40	Votorantim	4,42	10,65	141
S2	CP II E 40	Lafarge	5,52	10,17	84
S3	CP III	Votorantim	6,75	14,75	119
S4	CP V-ARI	Votorantim	3,25	7,18	121

Tabela 23. Média da frente de carbonatação na face exposta (aos 11 e 28 dias).

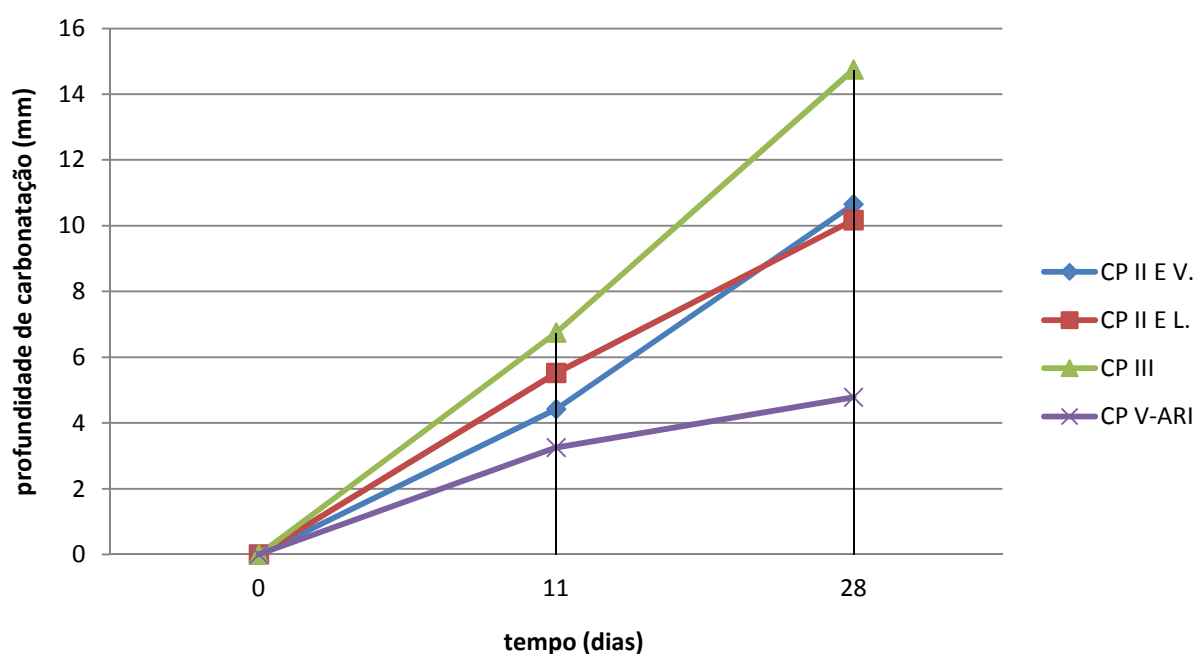


Figura 9. Média da frente de carbonatação (aos 11 e 28 dias).

Nota-se claramente com a figura 9 a diferença entre os tipos de cimento, no que tange a variação da frente de carbonatação. O Cimento tipo CP-V apresentou maior resistência à carbonatação, tendo menor espessura carbonatada.

Já o CP-III apresentou maior espessura carbonatada, tendo menor resistência à carbonatação.

A maior variação relativa da frente carbonatada das medições realizadas no 11º e no 28º dia foi observada no CP II E 40 (Votorantim), chegando à diferença de 141%.

Mesmo tratando-se do mesmo tipo de cimento (CP II E 40), porém de fabricantes diferentes, a variação relativa entre as frentes de carbonatação aos 11 e 28 dias, foi da ordem de grandeza de 84%, apesar de ter diferença pequena na espessura carbonatada medida aos 28 dias, sendo de apenas 4,5%.

Ademais, houve diferença significativa da frente de carbonatação nos corpos-de-prova de mesmo tipo de cimento, devido a sua localização dentro da câmara, pois se voltarmos às figuras 6 e 7 percebe-se que parte dos corpos-de-prova estavam “confinados” entre outros com conseqüente reduzida área diretamente exposta ao CO₂. Nota-se que os corpos-de-prova 3 da série 2 (CP II E Lafarge), corpo-de-prova 3 da série 3 (CP III) e corpo-de-prova 1 da série 4 (CP V-ARI) ficaram na segunda fila e seus resultados apresentaram valores inferiores aos da primeira fila.

A resistência a compressão foi medida em um corpo-de-prova mantido fora da câmara de carbonatação e outro submetido ao ensaio acelerado por 28 dias, comparando-se sempre corpos-de-prova da mesma série, ou seja, do mesmo tipo de cimento, os resultados estão expostos na tabela 24.

Série (S)	CP	Tipo de Cimento	Marca	CP NÃO Carbonatado	CP Carbonatado
S1	4	CP II E 40	Votorantim	32,20 MPa	34,06 MPa
S2	4	CP II E 40	Lafarge	30,00 MPa	32,05 MPa
S3	4	CP III	Votorantim	23,07 MPa	28,02 MPa
S4	4	CPV – ARI	Votorantim	37,00 MPa	41,03 MPa

Tabela 24. Resistência dos corpos de prova carbonatados e não carbonatados (aos 28 dias).

Analisando a tabela 24, percebe-se claramente um aumento da resistência nos corpos-de-prova carbonatados, quando comparados aos referenciais não carbonatados. O ganho de resistência variou de acordo com o tipo de cimento, sendo o menor ganho obtido o dos cimentos CP II E (6 e 7 % respectivamente dos fabricantes Votorantim e Lafarge) e o maior do cimento CP III (21%). Porém, em valores medidos, a maior resistência atingida foi do cimento tipo CP V-ARI.

Este capítulo apresentou os resultados do programa experimental e uma análise dos resultados do mesmo, já no próximo, apresentaremos as considerações finais da pesquisa e algumas sugestões para novas pesquisas que surgiram durante a construção dessa, para orientação à trabalhos futuros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentar-se-á as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de confirmação da diferença de resistência à frente de carbonatação em concretos dosados com diferentes tipos de cimento em sua composição foi viabilizada por meio de programa experimental baseado em estudo detalhado da bibliografia disponível e aplicação das normas técnicas vigentes.

Os resultados dos ensaios comprovaram o comportamento diferente de cada tipo de cimento, frente à carbonatação e resistência à compressão.

Considerando-se que foram atingidos os objetivos propostos nesta pesquisa, nota-se que a hipótese foi comprovada, observando que:

- i. O CP III apresentou menor resistência à carbonatação.
- ii. O CP V apresentou maior resistência à carbonatação.
- iii. O ganho de resistência à compressão tem relação com o fenômeno da carbonatação. O maior ganho de resistência à compressão ocorreu no cimento que mais carbonatou.
- iv. O CP II E 40 (Votorantim e Lafarge) carbonatado apresentou menor aumento de resistência à compressão e maior variação percentual de profundidade de carbonatação. Notou-se ainda a diferença de comportamento do mesmo tipo de cimento,

porém, de fabricantes diversos, fenômeno este porém acreditado à posição ocupada dentro da câmara de carbonatação.

- v. Notou-se que em todos os tipo de cimento a frente de carbonatação da face oposta à emissão de CO_2 foi inferior à face exposta diretamente. Esta variação chegou a 37 % para o cimento CP II E 40 (Votorantim), 28% para o cimento CP II E 40 (Lafarge), 24% para o cimento CP III e 17% para o cimento CP V-ARI.
- vi. Os maiores valores de frente de carbonatação foram medidos nos corpos-de-prova de cimento tipo CP III e os menores valores no cimento tipo CP V-ARI.
- vii. Os valores de pH mais baixos foram os obtidos para o cimento CP III, os mais altos para o CP V. E portanto, observou-se que quanto maior a frente de carbonatação, menor o pH do concreto.
- viii. A variação da concentração de CO_2 após o primeiro ensaio aos 11 dias implicou em alteração nas curvas de frente de carbonatação dos diferentes cimentos, onde os cimentos tipo CP II E 40 (Votorantim) e CP III tiveram tendência ascendente, ou seja, houve aumento relativo da frente de carbonatação. Já os outros dois tipos de cimento, CP II E (Lafarge) e CP V-ARI apresentaram curva com tendência a diminuição na velocidade de frente de carbonatação.

- ix. Verificou-se ainda que os corpos-de-prova não expostos ao ensaio acelerado de carbonatação não apresentaram frente de carbonatação no período de 28 dias de duração dos ensaios.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, abaixo, proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- i. Realizar ensaios de carbonatação acelerada variando-se apenas a concentração de CO_2 na câmara.
- ii. Estudar a influência da localização dos corpos de prova dentro da câmara, avaliando método de melhor distribuição do CO_2 .
- iii. Estudar mesmo tipo de cimento de fabricantes diferentes frente à resistência à carbonatação.
- iv. Comparar ensaio acelerado com carbonatação não acelerada.
- v. Estudar a realcalinização dos corpos de prova carbonatados por meio de aspersão de solução alcalina.
- vi. Pesquisar a influencia do avanço da área de recuperação de estruturas com o aumento das vendas de um determinado tipo de cimento em uma determinada época anterior.

Este capítulo encerrou a pesquisa mostrando as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros nessa área, o próximo capítulo apresentará toda bibliografia consultada para estruturação dessa pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. São Paulo, 2002, 7ª Ed., 28p. (BT-106).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 – Cimento Portland Comum**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5733 – Cimento Portland com Alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5735 – Cimento Portland de Alto Forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6023 – Informação e Documentação: Referência - Elaboração**. Rio de Janeiro, 1982. (citar na introdução do trabalho)

_____. **NBR 7215 – Cimento Portland: Determinação da resistência a compressão**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9833 – Concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 11578 – Cimento Portland Composto. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento - procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

ARAÚJO, F. W. C. **Contribuição à Viabilização da Técnica de Realcalinização do Concreto Carbonatado Através da Absorção/Difusão de Soluções Alcalinas.** Goiânia, 2004. 204 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** São Paulo, 2005. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARVALHO, J. D. N. **Estruturas de concreto I.** Maringá, 2008. Notas de Aula – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá.

CUNHA, A. C. Q. & HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação.** São Paulo, 2001. 17 p. Boletim Técnico – Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, C.; HELENE, P. R. L. **Fatores determinantes de iniciação e propagação da corrosão da armadura de concreto.** São Paulo, 1993. Boletim Técnico – Departamento de Engenharia de

Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, BT/PCC 121.

FORRESTER, J. A. **Colloquium on Carbonation of Concret.**, RILEM, 1976, Measurement of Carbonation, Paper 2.1.

GOMES, M. **Norma de inspeção predial**. São Paulo, 2007, IBAPESP.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras**. São Paulo, 2008. Boletim Técnico – Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, P. **Corrosão das Armaduras para concreto armado**. São Paulo, IPT, PINI, 1986.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993, 231 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

_____. **Vida útil das estruturas**. São Paulo, 1995, p. 28-31, Técnica, nº 17, julho/agosto.

HELENE, P.; PEREIRA, F.. **Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto**. São Paulo, SIKA, 2007, Cap. 2, p. 91- 140. (ver artigo de 2003, só do HELENE)

KAEFER L. F. **Considerações sobre a microestrutura do concreto**. 200?, Disponível em <http://files.grupog7.webnode.com/200000328-52f2a53ea8/microestrutura.pdf> Acesso em 01/08/2010 às 22 horas.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação.** São Paulo, 1995. 168 p. Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.

MIETZ, J. **Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures.** European Federation of Corrosion Publications, n°. 24. 1st edition. England: Ed. IOM communications Ltd, 1998. 57p.

MEHTA P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994, 573p.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental Modeling Investigation of Concrete Carbonation.** ACI Materials Journal / July-August 1991.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SALOMÃO, M. C. F. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto.** 2008. 10 p. Universidade Federal de Uberlândia, MG.

TAYLOR, H. F. W. **Enciclopedia de La Química Industrial – La Química de Los Cementos.** Bilbao – Espanha, 1967. Volume 1, Ed. URMO.