



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando
concreto convencional expostos ao meio ambiente natural**

Amanda Maciel de Souza Costa

ORIENTADOR (A): Prof^a. Dr^a. Valéria Conceição Mouro Costa

PUBLICAÇÃO:

ANÁPOLIS - GO

2020

Amanda Maciel de Souza Costa

**Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando
concreto convencional expostos ao meio ambiente natural**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás - Campus Anápolis, como requisito parcial
para conclusão de curso.

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Valéria Conceição Mouro Costa.

ANÁPOLIS, 2020

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | | | |
|-------------------------------------|---|--------------------------|--------------------------------|
| ☐ | Tese | ☐ | Artigo Científico |
| ☐ | Dissertação | ☐ | Capítulo de Livro |
| ☐ | Monografia – Especialização | ☐ | Livro |
| ☒ | TCC - Graduação | ☐ | Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ | Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | | |

Nome Completo do Autor: Amanda Maciel de Souza Costa

Matrícula: 20151060130024

Título do Trabalho: Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando concreto convencional expostos ao meio ambiente natural.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

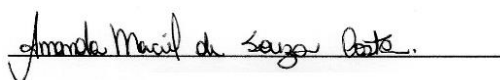
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____.

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 07/05/2021.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

COSTA, Amanda Maciel de Souza

C837a Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando concreto convencional expostos ao meio ambiente natural / Amanda Maciel de Souza Costa – Anápolis: IFG, 2020.
49 p. : il. color.

Orientadora: Prof. Dr. Valéria Conceição Mouro Costa.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Câmpus Anápolis – Engenharia Civil da Mobilidade, 2020.

1. Estruturas de concreto - vida útil. 2. Carbonatação 3. Fenolftaleína. I. COSTA, Valéria Conceição Mouro orien. II. Título.

CDD 624.1

Amanda Maciel de Souza Costa

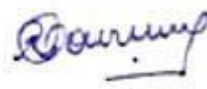
**Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando
concreto convencional expostos ao meio ambiente natural**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás - Campus Anápolis, como requisito parcial
para conclusão de curso.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Valéria Conceição Mouro Costa.

APROVADO EM: 13/11/2020

Orientador (a):



Prof.^a (IFG) Valéria Conceição Mouro Costa

Examinador (a):

JULIANO RODRIGUES
DA
SILVA:80748929134

Assinado de forma digital por JULIANO RODRIGUES DA
SILVA:80748929134
DN: c=BR, o=ICP-Brasil, ou=000001009937050, ou=Secretaria
da Receita Federal do Brasil - RFB, ou=RFB e-CPF A1, ou=AC
SERASA RFB v5, ou=03208618000130, ou=PRESENCIAL,
cn=JULIANO RODRIGUES DA SILVA:80748929134
Dados: 2021.05.03 18:37:05 -03'00'

Prof. (UEG) Juliano Rodrigues da Silva

Examinador (a):



Prof. (IFG) Thiago Eduardo Pereira Alves

ANÁPOLIS, 2020

*Dedico este trabalho a todas as pessoas
que não acreditaram que eu chegaria até aqui,
pois vocês me motivaram a chegar até ao final
e me fizeram acreditar que eu posso!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua infinita bondade na minha vida e por permitir que eu chegasse até aqui.

A minha família, por todo apoio. Aos meus pais, Marcelo e Vanilda, por sempre me incentivarem a estudar e por todo apoio em todos os momentos; ao meu irmão João Victor que de uma maneira ou outra estava me ajudando, principalmente com as dúvidas em contas “bobas”; ao meu marido, Victor, que esteve comigo em todos os momentos de desespero e preocupações, e com poucas palavras me ajudava.

Agradeço também, a minha professora Valéria, que além de orientadora é uma grande amiga, uma segunda mãe, obrigada por tudo nesses nove anos de convivência, você é um exemplo de mulher e profissional para mim, que continue com sua garra e inspirando mais pessoas.

Aos professores que passaram na minha trajetória, que de uma forma ou outra deixaram seus ensinamentos.

Aos colegas de turma, que em algum momento me ajudaram de alguma forma.

Ao laboratório do campus e aos profissionais envolvidos pela disponibilidade do uso do espaço.

RESUMO

O presente trabalho trata-se do estudo da frente de carbonatação, em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm de dimensões, utilizando concreto convencional, expostos ao meio ambiente natural do Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Goiás (IFG), *campus* Anápolis, aos 7, 28, 56 e 357 dias, respectivamente. O processo de carbonatação consiste um fenômeno natural relacionado à permeabilidade aos gases, penetrando o gás carbônico (CO₂) na estrutura de poros do concreto por uma diferença de concentração, sendo a difusão que ocorre por meio dos poros capilares interconectados, presentes no concreto e, na presença de água, o CO₂ reage com o hidróxido de cálcio, formando o carbonato de cálcio, iniciando a frente de carbonatação. O objetivo deste trabalho consiste em medir a profundidade da superfície carbonatada, ensaiando os corpos de prova a compressão e a tração por compressão diametral, comparando os resultados com os obtidos ensaiando os corpos de prova não carbonatados. Utilizou-se o método da RILEM CPC-18 para medir a frente de carbonatação, utilizando uma solução de fenolftaleína, sendo um indicador de pH. Comparando os valores da resistência a tração com corpos de prova carbonatados e os sem carbonatação, verifica uma redução da resistência a compressão, quando compara as amostras carbonatadas as não carbonatadas, de 1,15%, 2,13% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Sendo realizada a mesma comparação aos corpos de prova ensaiados a tração por compressão diagonal, com ou sem carbonatação, resultando em uma redução da resistência para amostras carbonatadas de 23,8%, 18,8% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Os ensaios a tração por compressão transversal, houve um maior avanço da frente de carbonatação, quando comparado aos ensaios de compressão axial.

Palavras-chave: Carbonatação; vida útil; estruturas de concreto; fenolftaleína.

ABSTRACT

The present study is about the study of the carbonation front, in cylindrical test bodies of 10 x 20 cm dimensions, using conventional concrete, exposed to the natural environment of the Laboratory of Materials of the Federal Institute of Goiás (IFG), campus Anápolis, at 7, 28, 56 and 357 days, respectively. The carbonation process consists of a natural phenomenon related to permeability to gases, penetrating the carbon gas (CO₂) in the concrete pore structure by a difference in concentration, the diffusion occurring through the interconnected capillary pores, present in the concrete and, in the presence of water, the CO₂ reacts with calcium hydroxide, forming the calcium carbonate, initiating front air of carbonation. The objective of this study is to measure the depth of the carbonated surface by testing the test bodies for compression and traction by diametral compression, comparing the results with those obtained by testing the non-carbonated test bodies. The RILEM CPC-18 method was used to measure the carbonation front using a phenolphthalein solution and is a pH indicator. Comparing the traction resistance values with carbonated test bodies and those without carbonation, there is a reduction in compression resistance, when comparing the carbonated and non-carbonated samples, of 1.15%, 2.13% and 2.9%, compared to 28 days, 56 and 357 days respectively. The same comparison was made with test bodies tested for traction by diagonal compression, with or without carbonation, resulting in a reduction in resistance for carbonated samples of 23.8%, 18.8% and 2.9%, compared to 28 days, 56 and 357 days, respectively. The cross-compression traction tests, there was a greater advance of the carbonation front compared to the axial compression tests.

Key words: Carbonation; lifespan; concrete structures; phenolphthalein.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CO_2 – Dióxido de carbono (gás carbônico)

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

ELS – Estado Limite de Serviço

H_2S - Sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico

KOH – Hidróxido de potássio

NaOH – Hidróxido de sódio

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

O_2 - Oxigênio

pH – Potencial hidrogeniônico

SO_2 - Dióxido de enxofre

VUP – Vida Útil de Projeto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vida útil de projeto referida ao ELS	20
Figura 2 – Fatores que influenciam na carbonatação do concreto.....	25
Figura 3 – Moldes para corpo de prova.....	29
Figura 4 – Ensaio de <i>Slump Test</i>	33
Figura 5 – Tanque de cura úmida.....	33
Figura 6 – Rompimento por compressão do corpo de prova.....	34
Figura 7 – Rompimento do ensaio a tração por compressão diametral.....	35
Figura 8 – Amostra com solução de fenolftaleína aspergida.....	36
Figura 9 – Corpo de prova não carbonatado.....	36
Figura 10 – Corpo de prova com frente de carbonatação pouco avançada.....	36
Figura 11 – Amostra expostas ao ambiente natural.....	40
Figura 12 – Medição da profundidade de carbonatação.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vida Útil de Projeto (VUP).....	19
Tabela 2 – Ensaio físico cimento <i>Portland</i> CP II-Z-32.....	31
Tabela 3 – Ensaio de caracterização da brita 0.....	31
Tabela 4 – Ensaio de caracterização da areia.....	32
Tabela 5 – Dosagem do traço do concreto.....	32
Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão axial.....	37
Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração por compressão diametral.....	39
Tabela 8 – Avanço da profundidade de carbonatação.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental.....	22
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos resultados do ensaio de compressão axial simples.....38

Gráfico 2 – Comparação dos resultados do ensaio de tração por compressão diametral.39

Gráfico 3 – Comparação dos resultados no avanço da profundidade de carbonatação.....55

SUMÁRIO

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE QUADROS.....	XIII
LISTA DE QUADROS.....	XIII
SUMÁRIO	XV
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA	14
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	14
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 DURABILIDADE	16
2.1.1 Requisitos de durabilidade.....	17
2.2 VIDA ÚTIL.....	18
2.2.1 Vida útil de projeto	18
2.2.2 Procediemntos para calcular a VUP	19
2.2.3 Critérios que definem o término da vida útil	20
2.2.4 Agressividade ambiental.....	21
2.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO E ENVELHECIMENTO	22
2.3.1 Mecanismos relativos ao concreto.....	22
2.3.2 Mecanismos relativos à armadura	22

2.3.3	Mecanismos relativos à estrutura	23
2.4	CARBONATAÇÃO	23
2.4.1	Principais fatores que influenciam no avanço da carbonatação.....	24
○	Concentração de CO ₂	25
○	Umidade relativa.....	25
○	Tipo de cimento e adições.....	26
○	Relação água/cimento	26
○	Cura.....	27
○	Granulometria do agregado.....	27
○	Execução do concreto	27
2.4.2	Determinação da profundidade de carbonatação através de indicadores de pH.	28
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	METODOLOGIA.....	2929
3.2	MATERIAIS.....	3030
3.2.1	Cimento.....	30
3.2.2	Agregado graúdo.....	31
3.2.3	Agregado miúdo.....	32
3.2.4	Água.....	32
3.2.5	Dosagem.....	32
3.3	CONCRETAGEM	32
3.4	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES	3434
3.5	ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	34
3.6	ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	35
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	3737
4.1	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES	37
4.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	38

4.3	ENSAIO DE CARBONATAÇÃO	40
4.3.1	Medição da profundidade de carbonatação	40
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

A durabilidade das estruturas de concreto armado, consiste em um dos grandes desafios da construção civil, sendo que a durabilidade e a vida útil da estrutura dependem das condições ambientais do local onde a estrutura estará submetida, bem como dos fatores da execução e das características do concreto (REBMANN, 2011).

O concreto trata-se em um material bastante difundido mundialmente, podendo ser encontrado em vários locais, como por exemplo, na construção de elementos estruturais em casas, edifícios, rodovias, pontes, usinas hidrelétricas. Consiste em uma pedra artificial, que pode ser moldada, de acordo com as preferências do homem. Sendo bastante utilizado, por possuir diversas vantagens de utilização, tanto em estado endurecido resulta em resistência parecida com as das rochas naturais, quanto em estado fresco possibilita a sua moldagem. Destacando-se pela sua resistência à água, resultando em menor deterioração quando exposto à água, comparando-o ao aço e madeira e sua plasticidade permite a moldagem de várias formas construtiva (PEDROSO, 2009).

Cánovas (1988) define o concreto sendo uma mistura de pasta (água e cimento), agregados (miúdos e grãos) e quando há necessidade, pode conter alguns aditivos (CÁNOVAS, 1988).

Para cada obra escolhe-se um tipo de concreto específico, devendo atender as exigências de resistência e durabilidade. Podendo ocorrer em várias construções, as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, sendo a mais comum, a corrosão da armadura (SILVA, 2007).

Pruckner (2001) comenta que, a interação entre o aço e o concreto ocorre, de forma química, sendo formado um filme protetor e passivo, envolvendo a armadura, resultando em uma passividade. Quando a pasta hidratada tem alta alcalinidade, percebe-se a passivação da armadura, podendo ocorrer a corrosão da armadura.

Segundo RILEM (1988), define-se a carbonatação sendo a neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos

hidratados, contidos na pasta de cimento do concreto, pelo dióxido de carbono (CO_2), que para uma faixa de umidade precipitam como carbonato de cálcio.

Kazmierczak (1995) comenta que, a velocidade e a profundidade de carbonatação dependem de fatores relacionados com o meio ambiente e das características do concreto endurecido.

Esse trabalho se justifica, pois, a corrosão das armaduras trata-se de um tipo de deterioração, que pode ser iniciada por carbonatação, devido a despassivação da armadura, causando danos econômicos devido as dificuldades das técnicas de recuperação e sua eficácia a longo prazo (ISAIA, VAGHETTI e GASTALDINI, 1998).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal consiste em medir a frente de carbonatação, em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, expostos ao ambiente natural em que se encontra o Instituto Federal de Goiás (IFG), *campus* Anápolis, utilizando uma solução a base de fenolftaleína, conforme recomenda a RILEM CPC-18, aos 7, 28, 56 e 357 dias.

1.2.2 Objetivos Específicos

São considerados objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais utilizados no concreto;
- Realizar o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme as especificações da NM 67 (ABNT, 1998);
- Avaliar as resistências a compressão e a tração por compressão diametral, dos corpos de prova carbonatados;
- Comparar os resultados das resistências com os valores obtidos em corpos de prova não carbonatados.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho trata-se de uma pesquisa exploratória, por se tratar de um estudo de caso, sendo analisado a frente de carbonatação, bem como as resistências a compressão e resistência a tração em corpos de prova carbonatados, comparando os resultados aos adquiridos a corpos de prova sem carbonatação. Os corpos de prova foram moldados, ficando expostos a frente de carbonatação natural na área externa do galpão tecnológico do Instituto Federal de Anápolis, *Campus* Anápolis, ficando reservado e embalados em uma sala os corpos de prova sem carbonatação natural, sendo caracterizados os materiais presentes no traço do concreto, bem como os ensaios realizados, sendo detalhados no capítulo 3. Para o referencial teórico foi levantada uma série de informações, por meio de artigos, livros e trabalhos científicos presentes no Capítulo 2.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Devido a pandemia do COVID-19, alterou as datas iniciais dos ensaios, sendo aos 7, 28, 56 e 91 dias, para 7, 28, 56 e 357, sendo o último ensaio realizado pelo técnico do laboratório, Luciano, podendo acompanhar o desenvolvimento dos ensaios, utilizando o *Google Meet*.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao estudo da frente de carbonatação, descrevendo os objetivos e a justificativa.

O capítulo 2 mostra uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de vida útil e durabilidade, os mecanismos de deterioração e a carbonatação.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para alcançar o objetivo deste trabalho.

O capítulo 4 faz a apresentação e a análise dos resultados.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, enfatizando as principais conclusões observadas, sendo feita sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DURABILIDADE

Gentil (1996) considera a durabilidade sendo um fator importante na avaliação de um projeto, uma vez que o concreto consiste em um material de construção de grande e diversificado uso. Para o autor supracitado, as estruturas de concreto devem ser projetadas e executadas, mantendo as condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade, durante um tempo de vida útil, sem que ocorram custos não previstos de manutenção e possíveis reparos.

De acordo com ACI (American Concrete Institute) 201.2R (2008), a durabilidade do concreto pode ser definida como a sua capacidade de resistir à ação do clima, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Consideram-se como concretos duráveis aqueles que continuam em sua forma, ou seja, não se deformam, como as estruturas construídas e que não atingem o estado limite de serviço, e aqueles que permanecem com sua qualidade original quando expostos ao meio ambiente agressivo.

Helene (1997) destaca que, a durabilidade da estrutura de concreto pode ser determinada por quatro fatores, identificados como regra dos 4C, exemplificando-a em um concreto fabricado, sem correto adensamento, resultando em um concreto altamente poroso, devido aos índices de vazios presente no mesmo. A regra dos 4 C consistem nos seguintes processos:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

O CEB-FIP MC-90 (1993) conceitua durabilidade, quando as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e operadas, sob condições ambientais esperadas, mantendo sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável, durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem necessitar de manutenção e reparo.

Apesar de ser estudada há muito tempo, a NBR 6118 (2003) após um período de 21 anos sem atualizações, acrescentou na versão citada, a durabilidade como fator importante e indispensável a ser considerado no dimensionamento das estruturas de concreto armado. Conceituando a durabilidade na capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto, pelo autor do projeto estrutural e a contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

A norma supracitada acrescenta que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Para Couto (2017), a durabilidade consiste na capacidade de manutenção e de funcionalidade da estrutura ou componente estrutural, acima de determinado tempo. Sendo a funcionalidade, a capacidade de uma dada estrutura ou elemento estrutural atender as funções a que foi projetado e construído.

Segundo a ISO 13823, 2008, define-se a vida útil como o período especificado, para o qual uma estrutura ou um componente deve ser utilizado, para a finalidade a que se destina, sem necessidade de grandes reparos.

Medeiros, Andrade e Helene (2011) afirmam como sendo fundamental, o conhecimento da durabilidade e dos métodos de previsão da vida útil das estruturas de concreto, no auxílio na previsão do comportamento do concreto em longo prazo, prevenindo as manifestações patológicas precoces e contribuindo para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas.

2.1.1 Requisitos de durabilidade

A grande parte dos parâmetros de durabilidade se relacionam ao ambiente ao qual o concreto será inserido, sendo que os agentes agressivos não estão apenas no ambiente, mas podem estar presentes nos materiais que compõe o concreto. Tornando possível dosar o concreto de modo a atender aos requisitos de durabilidade, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil (LEITE, GIRARDI, HASTENPFLUG, 2018).

2.2 VIDA ÚTIL

2.2.1 Vida útil de projeto

Vida Útil de Projeto (VUP) pode ser definida, de acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011), como o período de tempo que vai despassivar a armadura, sendo denominado período de iniciação, que consiste no tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinjam a armadura, não significando a ocorrência de corrosão.

Considera-se a VUP o período de tempo estimado para que um sistema seja projetado, de maneira a atender aos requisitos de desempenho estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o cumprimento correto dos processos de manutenção, especificados no Manual de Uso, Operação e Manutenção (NBR ABNT 14037, 1998).

A VUP não deve ser confundida com os seguintes termos: tempo de vida útil, durabilidade, prazo de garantia legal, sendo uma estimativa teórica de tempo que compõe o tempo de vida útil (NBR 15575-1, 2013).

A NBR 15575 (2013) define que, a durabilidade da estrutura deve ser compatível com os critérios estabelecidos na Tabela 1 sobre a vida útil de projeto (VUP). Segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), pode definir a vida útil de projeto como a capacidade do edifício de permitir inspeções prediais, como intervenções de manutenção prevista no manual de operação, uso e manutenção.

A Tabela 1 especifica o valor teórico da VUP para cada um dos sistemas que a compõe, considerando a periodicidade e processos de manutenção especificados no Manual de Uso, Operação e Manutenção, elaborado de forma a atender especificações da norma NBR 5674 (ABNT, 2013).

Tabela 1 – Vida Útil de Projeto (VUP)

SISTEMA	VUP mínima (anos)
Estrutura	≥ 50 (segundo ABNT NBR 8681, 2003)
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

Fonte: ABNT NBR 15575-1, 2013.

2.2.2 Procedimentos para calcular a vida útil de projeto

Segundo Helene (2004), a estimativa de vida útil de estruturas de concreto pode ser efetuada por meio de um dos quatro procedimentos:

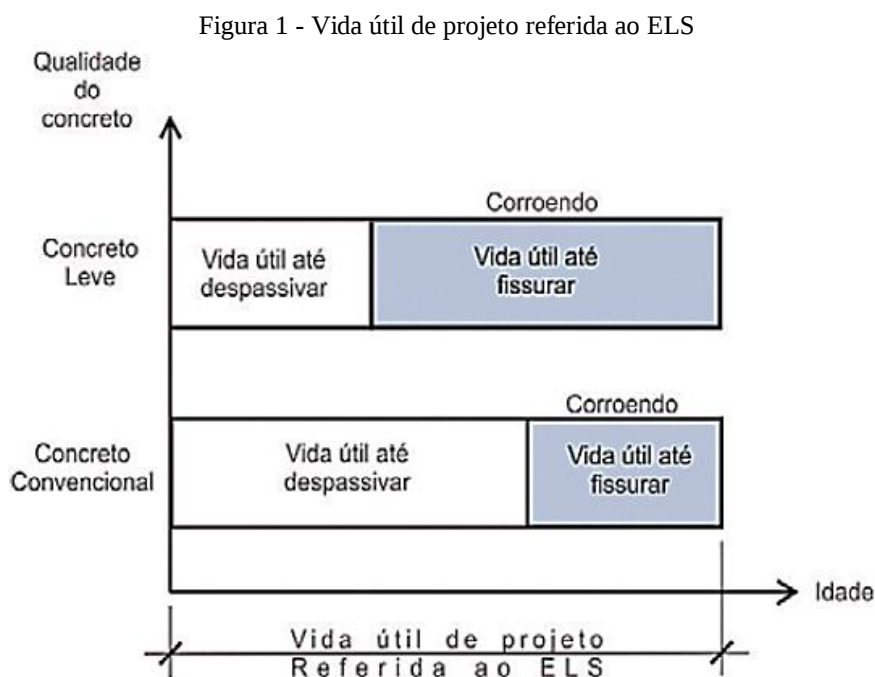
- Método com base nas experiências anteriores: desde as primeiras normas, são especificadas algumas exigências com finalidade de garantir a durabilidade, indicando que, se seguir as recomendações, serão alcançados bons resultados.
- Método dos ensaios acelerados: trata-se de um método que foi introduzido pelos Americanos, em 1978, na primeira norma ASTM E 632, e logo em seguida a ISO 6241 (1984). Sendo um método que se aplica a estudos de produtos orgânicos, tendo difícil aplicação direta no projeto de estruturas de concreto, cujos principais materiais são de natureza inorgânica. Esses ensaios de degradação acelerada podem ser usados para estimar a vida útil do concreto, sendo esse mecanismo que se difere das condições reais.
- Método Determinista: este método possui os mecanismos de transporte de gases, de fluídos e de íons através dos poros do concreto, no caso do período de iniciação e a lei de Faraday, no caso do período de propagação, sempre que se trate de corrosão das armaduras.
- Método Estocástico ou Probabilista: consiste num método mais moderno, que se aproxima mais da realidade da durabilidade em estruturas de concreto.

Admitem-se distribuições normais ou Gaussianas para as ações agressivas e log-normal ou normal para as resistências da estrutura a essas ações de deterioração, consistindo no período da teoria das falhas, aplicando a distribuição de *Weibull*.

2.2.3 Critérios que definem o término da vida útil

A previsão da vida útil total corresponde à ruptura total ou colapso parcial da estrutura, tendo a estrutura perdido a característica de atender as funções pela qual foi projetada. Chama-se de vida útil de serviço ou de utilização o tempo total, a partir do término da construção até o aparecimento de uma patologia considerada grave, se uma estrutura não atende mais as funções pela qual foi projetada, considera o término da sua vida útil (MEDEIROS, ANDRADE, HELENE, 2011).

Na Figura 1, pode-se observar a vida útil total de projeto, disposta no Estado Limite de Serviço (ELS), como sendo a soma do tempo de ocorrência da despassivação e o tempo de corrosão, formando um volume de produtos de corrosão, sendo suficientes para romper e destacar o cobrimento da armadura.



Fonte: MEDEIROS, ANDRADE, HELENE (2011).

De acordo com Meira (2017), o concreto forma uma dupla proteção para a armadura, sendo uma proteção física, separando o aço do meio externo, e outra proteção química, em função do seu elevado pH, contribuindo para a formação e estabilidade da capa passiva, protegendo a armadura de corrosão futura, devido a formação do filme passivo. Segundo o autor supracitado, a ocorrência de uma reação eletroquímica, resulta nos produtos de corrosão, sendo agrupados em uma fina camada incorporada à superfície do aço. Com a perda de estabilidade dessa película, inicia-se o processo de despassivação.

2.2.4 Agressividade ambiental

Helene (1997) diz que, a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas, que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente, das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e de outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto. Sendo que essa classificação, com base nas condições de exposição da estrutura ou suas partes, deve levar em conta o micro e macroclima atuantes sobre a obra e suas partes críticas.

Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com a Quadro 1, podendo ser avaliada segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes (ABNT NBR 6118, 2003).

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Frac	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118:2003.

2.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO E ENVELHECIMENTO

Os principais mecanismos de deterioração e envelhecimento foram definidos e citados os sintomas por Helene (1997). O autor comenta que, a inserção na norma de projeto de estruturas de concreto sobre o tema durabilidade ocorreu tardiamente em 2003 e estão listados na NBR 6118 (ABNT, 2003).

2.3.1 Mecanismos relativos ao concreto

- Lixiviação: ocorre por ação de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas, que dissolvem e carregam os compostos hidratados da pasta de cimento. Sendo os sinais uma superfície arenosa ou com agregados expostos, sem a pasta superficial, com eflorescências de carbonato, elevada retenção de fuligem e risco de desenvolvimento de fungos, consequente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais.
- Expansão por sulfatos: ocorre pelas águas e solos que contenham ou encontrem-se contaminados com o sulfato. Os sintomas básicos consistem em uma superfície com fissuras aleatórias, esfoliação e redução significativa da dureza e resistência superficial do concreto, com consequente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais.
- Expansão por reação álcali-agregado: expansão que ocorre por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos. Ocorrendo uma expansão geral da massa de concreto, com fissuras superficiais e profundas, caso a massa seja contínua, em caso de estruturas delgadas, encontra-se fissuras ordenadas.
- Reações superficiais delétricas: acontecem com certos agregados decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica. Os agregados que contém pirita podem acarretar manchas, cavidades e protuberâncias na superfície dos concretos.

2.3.2 Mecanismos relativos à armadura

- Despassivação por carbonatação: acontece pela ação do gás carbônico (CO_2) na atmosfera. Este fenômeno não é perceptível a olho nu, não reduzindo a resistência do concreto, aumentando a dureza superficial. Para a identificação da frente ou

profundidade de carbonatação, requer ensaios específicos. Caso atingir a armadura, dependendo das condições de umidade ambiente, podendo ocorrer corrosão, com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes.

- Despassivação por cloretos: Teores elevados de cloreto podem ter sido introduzidos durante o amassamento do concreto, por meio do excesso de aditivos aceleradores de endurecimento. Este fenômeno não é perceptível a olho nu, não reduzindo a resistência do concreto, nem alterando seu aspecto superficial. Sua identificação da frente ou da profundidade de penetração de certo teor crítico de cloreto, requer ensaios específicos, ao atingir a armadura, promovem séria corrosão, podendo gerar o colapso da estrutura ou de suas partes.

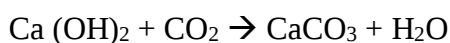
2.3.3 Mecanismos relativos à estrutura

São todos os mecanismos que estão relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmicas, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação etc.

2.4 CARBONATAÇÃO

Venuat e Alexandre (1969) definem o fenômeno de carbonatação, sendo um processo químico que reduz o pH, considerando 12 como valores próximos de 12 para inferiores à 10 da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos hidratados do concreto, presentes nas suas fases líquida e sólida.

A carbonatação do concreto consiste no processo que acontece em superfícies de estruturas expostas a alta alcalinidade, devido a presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado nas reações de hidratação, que pode ser reduzida com o tempo. Essa redução ocorre pela ação do CO_2 que está presente na atmosfera e também por outros gases ácidos, como SO_2 (dióxido de enxofre) e H_2S (sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico). A Equação química 1 mostra a reação química da carbonatação.



Equação 1

Segundo Polito (2006), a carbonatação pode ser a condição principal para o início da corrosão da armadura.

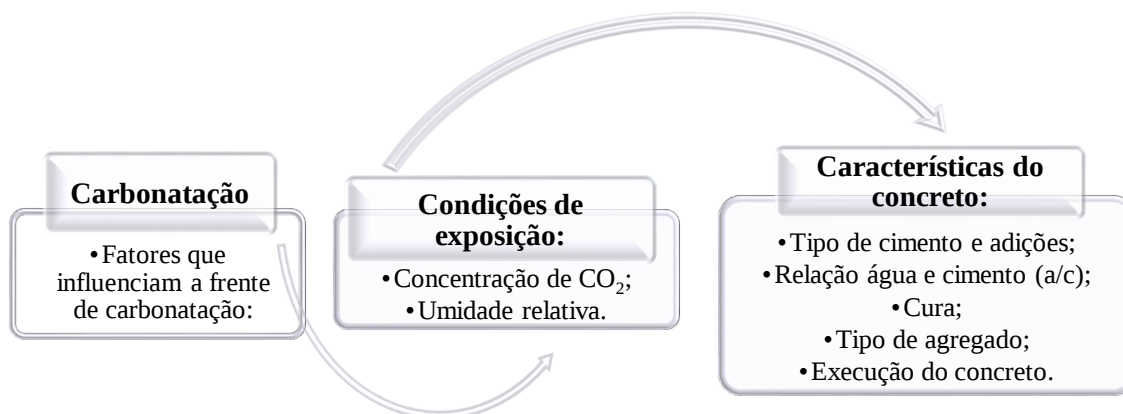
Portanto, a carbonatação tem início na face externa da estrutura de concreto, que forma a frente de carbonatação, podendo ser dividida em três áreas, sendo a região carbonatada, a região intermediária (que está em processo de carbonatação) e a região mais profunda do concreto (que ainda não foi carbonatada). Quando a frente de carbonatação avança para o interior do concreto, podendo chegar até a armadura, que causará a despassivação do aço, tornando a armadura desprotegida em relação ao processo de corrosão (OLIVEIRA, 2017).

Em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO_2), o processo de carbonatação pode requerer vários anos para apresentar profundidades importantes que comprometam a durabilidade das armaduras, sendo função, dentre outros aspectos, da relação água/aglomerante e da composição química do cimento. Para relações água/aglomerante mais elevadas (acima de 0,60), com cerca de um ano de exposição ao CO_2 , já é possível obter dados de profundidade carbonatada. Contudo, para concretos com relações água/aglomerante menores (inferiores a 0,50), o tempo demandado para determinar a velocidade de carbonatação pode levar até 20 anos (KOBUKU e NAGATAKI, 1989).

2.4.1 Principais fatores que influenciam no avanço da carbonatação

Conforme citado por Oliveira (2017), existem fatores relevantes que influenciam o avanço da frente de carbonatação, como pode ser observado na Figura 2, que consistem nas exposições ao meio em que se encontram, bem como as características do concreto.

Figura 2 – Fatores que influenciam na carbonatação do concreto



Fonte: Adaptado pela Autora (2019), de CASCUDO e CARASEK (2011).

Segundo as condições de exposição, Oliveira (2017) define como principais fatores que influenciam no avanço da carbonatação:

- Concentração de CO₂

As altas concentrações de CO₂ provocam as chances de ataque ao concreto com mais velocidade. Em concretos com maiores índices de relação água/cimento, a penetração flui mais rapidamente, isto acontece e torna o risco de deterioração maior, devido ambientes com altos índices de CO₂. Locais como túneis, viadutos e garagens são considerados locais especiais, pois são espaços confinados, fazendo com que o gás carbônico seja mais elevado que o normal.

- Umidade relativa

Determina o grau de saturação dos poros do concreto. A carbonatação não ocorre quando os poros estão totalmente secos ou saturados, pois o gás carbônico não consegue reagir e difundir-se. Em ambientes que o concreto apresenta poros que estão totalmente secos, a umidade na atmosfera é baixa, então o CO₂ tem fácil acesso nas regiões internas do concreto, porém com a falta de água para reagir com os componentes do concreto a carbonatação não ocorre. Em locais onde os poros estão completamente saturados, também não ocorre carbonatação, pois, o teor de água fica elevado e o CO₂ tem dificuldades de penetrar, sendo a sua velocidade de difusão baixa. Por isso, para que a

carbonatação ocorra, os poros devem estar relativamente preenchidos com água, permitindo que o CO_2 avance com facilidade, reagindo com a água e os componentes do concreto, acontecendo assim a carbonatação, que pode despassivar a armadura.

- Tipo de cimento e adições

O tipo e quantidade de cimento que são empregados na produção do concreto estão relacionados diretamente a velocidade em que acontece a frente de carbonatação, implicando na quantidade de compostos alcalinos presentes, que dependendo do cimento, sendo mais ou menos disponíveis para reagir com o CO_2 presente no ambiente (OLIVEIRA, 2017).

Segundo Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997), os cimentos puros, como o cimento Portland I e V-ARI apresentam maiores resistências a carbonatação em relação aos cimentos com aditivos, isto acontece devido a maiores velocidade e profundidade da frente de carbonatação em cimentos com aditivos, pois possuem uma reserva alcalina disponível menor, facilitando a penetração da carbonatação, pois o CO_2 reage diretamente com os compostos alcalinos do cimento, tais como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH e o C-S-H.

Deste modo, o avanço da frente de carbonatação e a concentração de hidróxido de cálcio nos poros do concreto dependem: do tipo de cimento utilizado, dos acréscimos de aditivos ou não, da relação água e cimento (a/c) e do grau de hidratação. Pode-se citar como exemplo, o alto calor de hidratação que possui o silicato tricálcio, fazendo com que o concreto possa fissurar, abrindo caminho para o CO_2 penetrar no seu interior.

- Relação água/cimento

A relação água e cimento está diretamente ligado a porosidade, na forma, no volume e na distribuição dos poros, controlando a penetração dos íons cloreto, ou seja, relacionando com a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido e suas propriedades mecânicas finais, sendo que o aumento dessa relação resulta em maior porosidade e permeabilidade, tornando mais fácil a difusão do CO_2 no concreto (MONTEIRO, 2002).

- Cura

Conforme Oliveira (2017), a cura do concreto consiste em um conjunto de medidas necessárias para evitar a evaporação da água presente no concreto de maneira rápida, ficando o concreto fica sob uma camada de água, durante determinado tempo, onde ocorre as reações de hidratação e endurecimento do cimento. Um cuidado maior deve ser tomado com cimento com adições minerais, como pozolanas e escórias de alto forno, podendo ter a propensão de acontecer a frente de carbonatação.

Quando não se realiza a cura corretamente, pode gerar fissuras de dimensões variadas, sendo que essas microaberturas facilitam a entrada do CO₂, tornando mais fácil o avanço da frente de carbonatação no concreto (OLIVEIRA, 2017).

- Granulometria do agregado

Quanto mais fino o agregado miúdo, maior será a sua superfície específica, precisando de mais água para deixar o concreto mais trabalhável. Como consequência, o uso de agregados maiores necessitará de menos água, para o concreto realizar a trabalhabilidade (OLIVEIRA, 2017).

- Execução do concreto

Para obter bons resultados quanto as características da resistência a compressão, pega, trabalhabilidade e impermeabilidade, torna-se necessário ter uma boa execução do concreto, resultando na estabilidade e durabilidade da edificação. Alguns fatores podem influenciar na boa execução do concreto, como a mistura da pasta, transporte, lançamento e adensamento (OLIVEIRA, 2017).

- Mistura da pasta: a mistura dos agregados graúdos e miúdos, os aglomerantes, aditivos e a água formam uma massa homogênea, garantindo uma boa resistência e trabalhabilidade. Podendo ser executada manualmente ou de maneira mecânica (OLIVEIRA, 2017).

- Transporte: após o amassamento, o concreto deve ser transportado o mais rápido possível para o local de lançamento, de modo que sua homogeneidade seja garantida. Os principais meios de transporte podem ser por carros (carrinho de mão, motorizados), guinchos, calhas e caminhões betoneiras (AZEREDO, 1977).
- Lançamento: deve ser lançado cuidadosamente, evitando a segregação dos materiais, que ocorre quando os agregados graúdos se separam dos demais. Uma vez iniciado o lançamento, deve ser finalizado, não podendo ultrapassar uma hora, porque pode afetar a resistência final e a trabalhabilidade (OLIVEIRA, 2017).
- Adensamento: tem como objetivo deslocar com esforço, os elementos que compõe o concreto, movendo as partículas para ocupar os vazios e expulsar o ar do material. O processo de adensamento pode ser feito de várias maneiras, manualmente, por socamento ou apiloamento, e mecânico, por vibração ou centrifugação.

2.4.2 Determinação da profundidade de carbonatação através de indicadores de pH.

Segundo Polito (2006) a observação da ocorrência da carbonatação pode ser realizada de várias maneiras, por meio de raios-X, análise térmica diferencial, observação microscópica, sendo possível observar a presença de CaCO_3 . Porém, a carbonatação está associada com a queda do pH, assim a forma mais comum de realizar a confirmação consiste na utilização dos indicadores químicos de pH.

O teste químico baseia-se em aplicar sobre a superfície de concreto uma solução (alcólica) chamada fenolftaleína a 1%, ou a solução (aquosa) timolftaleína a 1%, e observar a alteração da cor da superfície do concreto (POLITO, 2006).

Segundo Gentil *apud* Polito (2006) a fenolftaleína adquire a coloração róseo-avermelhada para pH iguais ou superiores a 9,5. E a timolftaleína adquire a coloração azulada em pH iguais ou superiores a 10,5, para valores abaixo desses, as soluções permanecem incolores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa consiste na revisão bibliográfica sobre o tema, enfatizando a durabilidade e vida útil da estrutura, ressaltando entre os mecanismos de deterioração, a carbonatação no concreto, sendo apresentado os principais fatores que influenciam no avanço da carbonatação, bem como as equações e os indicadores de pH, que possibilitam identificar a profundidade de carbonatação.

Para medir a profundidade de carbonatação escolheu-se a fenolftaleína, como indicador de pH, devido ao método apresentar mais possibilidades de queda de pH, conforme visto na revisão bibliográfica, a timolftaleína adquire a queda do pH para valores iguais ou superiores a 10,5, sendo que a fenolftaleína mostra a queda e pH para valores menores que 10,5 chegando a 9,5. Para o método escolhido serão seguidas as recomendações da RILEM CPC-18 (1988).

Utilizou-se corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm de concreto, conforme recomendado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), como mostra a Figura 3, expostos a atmosfera natural, em que se encontra o Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Goiás, *campus* Anápolis, para avaliar a profundidade de carbonatação. Serão observadas e analisadas as resistências a compressão axial simples e a resistência a tração por compressão diametral, nesses corpos de prova carbonatados, comparando-os aos valores observados em corpos de prova não carbonatados aos 7, 28, 56 e 357 dias.

Figura 3 – Moldes para corpo de prova - NBR 5738 (ABNT, 2015)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Trata-se de uma pesquisa de revisão bibliográfica e ensaios experimentais, sendo avaliadas a frente de carbonatação, as resistências a compressão axial simples, bem como as resistências a tração por compressão diametral, sendo observados os resultados e comportamentos obtidos, comparando-os com o referencial teórico.

3.2 MATERIAIS

Foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais compostos no concreto utilizado nesta pesquisa, com o objetivo de definir o traço a ser utilizado e conhecer suas propriedades. Para as caracterizações dos materiais, os procedimentos experimentais foram realizados de acordo com cada norma específica.

3.2.1 Cimento

Utilizou-se o cimento CP II-Z-32, devido a disponibilidade na região, e principalmente por ter boa resistência a meios agressivos, sendo considerado um cimento que serve para diversas aplicações, utilizado onde necessita de resistência a compressão de 25 Mpa (BT-106, ABCP, 2002), suas principais características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaio físico cimento Portland CP II-Z-32

CP II-Z-32 - 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	NBR 11579
Finura na peneira #325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	<5	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	>10	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	>20	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	>32	NBR 7215
Massa específica (kg/dm ³)	3,14	NBR NM 23
Massa unitária (kg/dm ³)	1,42	NBR NM 45

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2018)

3.2.2 Agregado graúdo

Utilizou-se como agregado graúdo a brita 0, que foi cedida pelo laboratório de engenharia, do Instituto Federal de Goiás – *Campus Anápolis*, a Tabela 3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da brita.

Tabela 3 – Ensaio de caracterização da brita 0.

AGREGADO GRAÚDO - ABNT		
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO		
Massa específica (kg/dm ³)	2,64	NBR NM 53
Massa unitária (kg/dm ³)	1,33	NBR NM 45
Módulo de Finura	2,9	NBR NM 53
Dimensão máxima (mm)	9,5	NBR NM 53
Índice de Forma	2,91	NBR 7809

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo, utilizado na confecção do traço, também foi cedido pelo *campus*. Foi usada areia natural de rio, média, lavada e também devido à disposição da região. Nos ensaios realizados, a Tabela 4 descreve os resultados obtidos.

Tabela 4 – Ensaios de caracterização da areia

AGREGADO MIÚDO - ABNT		
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO		
Massa específica (kg/dm ³)	2,66	NBR 9776
Massa unitária (kg/dm ³)	1,51	NBR NM 45
Dimensão máxima (mm)	2,40	NBR NM 248
Módulo de finura	2,90	NBR NM 248

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.4 Água

A água usada foi também cedida pelo Instituto Federal de Goiás, e é fornecida pela Companhia de Saneamento de Goiás – SANEAGO.

3.2.5 Dosagem

A dosagem do concreto foi realizada pelo método do ACI simplificado, que define um valor inicial para o abatimento de tronco de cone, diâmetro máximo do agregado graúdo e relação água/cimento em razão da resistência e/ou durabilidade desejada do concreto. A Tabela 5 vem nos mostrar esses valores.

Tabela 5 – Dosagem do traço de concreto

Dosagem	Cimento	Areia	Brita 0	A/C
Convencional	1	1,13	1,4	0,50

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3 CONCRETAGEM

Foram moldados 16 corpos de prova, sendo 6 para amostra sem carbonatação e 10 para as amostras carbonatadas, sendo realizados o ensaio de compressão, de tração por

compressão diametral e medida da profundidade de carbonatação, nas idades de 7, 28, 56 e 357 dias.

Logo após rodar o traço na betoneira, realizou o ensaio de *Slump Test*, normatizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), cujo objetivo consiste em determinar a consistência do concreto em seu estado fresco, por meio da medida de seu assentamento, e espera-se que o concreto atinja uma resistência de 25 MPa. A Figura 4, mostra a medição do abatimento do tronco, sendo igual a relação água e cimento adotada.

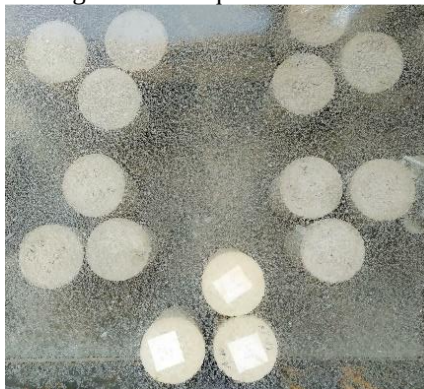
Figura 4 – Ensaio *Slump Test*.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Depois de moldados, e desformados os corpos de prova foram levados para um tanque onde ficaram por sete dias submersos em um tanque de água, para o processo de cura, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Tanque de cura úmida



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão realizado de acordo com a especificação da NBR 5739 (ABNT, 1994), que descreve o passo a passo do ensaio, onde o corpo de prova cilíndrico deve ser disposto de modo que o seu eixo vertical coincida com o centro da máquina, após isso, o acionamento da máquina é feito, aplicando uma carga contínua, em seguida, foram dadas as medições de forças, que indica a carga máxima atingida. A Figura 6 mostra o momento após a ruptura do corpo de prova testado.

Figura 6 – Rompimento por compressão do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado segundo a NBR 7222 (ABNT, 1994), que diz que o corpo de prova deve ser colocado de maneira que o seu contato com a máquina seja ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo de prova, apoiado lateralmente por ripas de madeira, em seguida aplicar a carga de maneira contínua e sem choques e após isso é feita a leitura da carga máxima atingida. A Figura 7 mostra a realização do ensaio.

Figura 7 – Rompimento por ensaio a tração por compressão diametral.



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.6 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Após o rompimento dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de carbonatação, cujo objetivo é medir a frente de carbonatação do concreto ensaiado. Sendo a parte do corpo de prova foi quebrada, aplica sobre essa parte uma solução chamada fenolftaleína (indicador de pH), que é um líquido de cor inicial transparente, e que ao ser aplicada sobre a superfície do concreto pode ou não ter sua coloração alterada, como mostra a Figura 8.

Caso, ao entrar em contato com a superfície do concreto e obtermos uma cor rosa, é sinal que a estrutura não foi carbonatada (Figura 9), e onde a cor natural do concreto é resultado da carbonatação, na Figura 10, percebe - se que as bordas do corpo de prova permaneceram na cor natural do concreto, isso significa que a carbonatação ainda está avançando. Essa alteração de cor se dá devido ao pH em que a estrutura se encontra, em lugares onde o pH se encontra ácido a fenolftaleína permanece incolor, em pH básico, ela se encontra na cor rosa. Sendo verificadas aos 7, 28, 56 e 357 dias.

Figura 8 – Amostra com a solução de fenolftaleína aspergida.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 9 – Corpo de prova não carbonatado.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 10 – Corpo de prova com a frente de carbonatação pouco avançada.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

A Tabela 6, mostra um resumo dos resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão axial simples, durante os 7, 28, 56 e 357 dias, das amostras que foram carbonatadas e das não carbonatadas.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão axial.

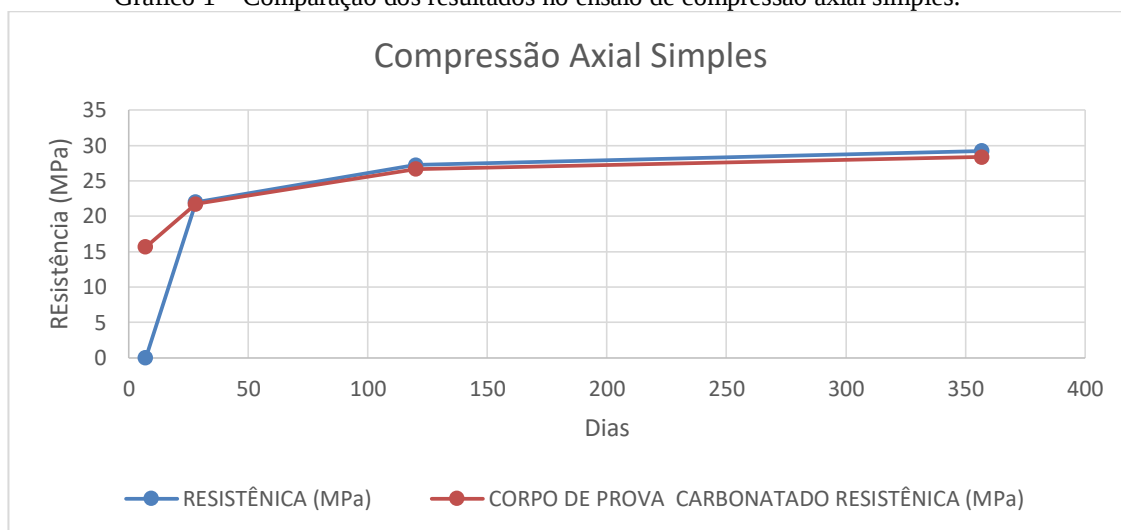
CORPO DE PROVA NÃO CARBONATADO			
ENSAIO	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)	PROFUNDIDADE CARBONATADA (cm)
Compressão axial simples	7	-	-
	28	22,00	-
	56	27,24	-
	357	29,24	-
CORPO DE PROVA CARBONATADO			
ENSAIO	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)	PROFUNDIDADE CARBONATADA (cm)
Compressão axial simples	7	15,70	0
	28	21,75	0,25
	56	26,67	0,30
	357	28,39	0,50

Fonte: Autoria própria, 2020.

Analisando a Tabela 6, verifica-se uma redução da resistência a compressão, quando compara as amostras carbonatadas as não carbonatadas, de 1,15%, 2,13% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Quando compara o valor carbonatado de 7 dias a 28 dias, verifica que houve uma redução de 3,8 %.

No Gráfico 1, tem-se uma representação entre os resultados obtidos no ensaio de compressão axial simples, entre as amostras não carbonatadas e carbonatadas, e pode-se observar o crescimento da resistência com o passar dos dias.

Gráfico 1 – Comparação dos resultados no ensaio de compressão axial simples.



Fonte: Autoria própria, 2020.

4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O resumo dos resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão diametral, são apresentados na Tabela 7, durante os 7, 28, 56 e 357 dias, das amostras que foram carbonatadas e das não carbonatadas, verifica-se uma redução da resistência a tração por compressão diametral, quando compara as amostras carbonatadas as não carbonatadas, de 23,8%, 18,8% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Quando compara o valor carbonatado de 7 dias a 28 dias, verifica que houve uma redução de 9,05%.

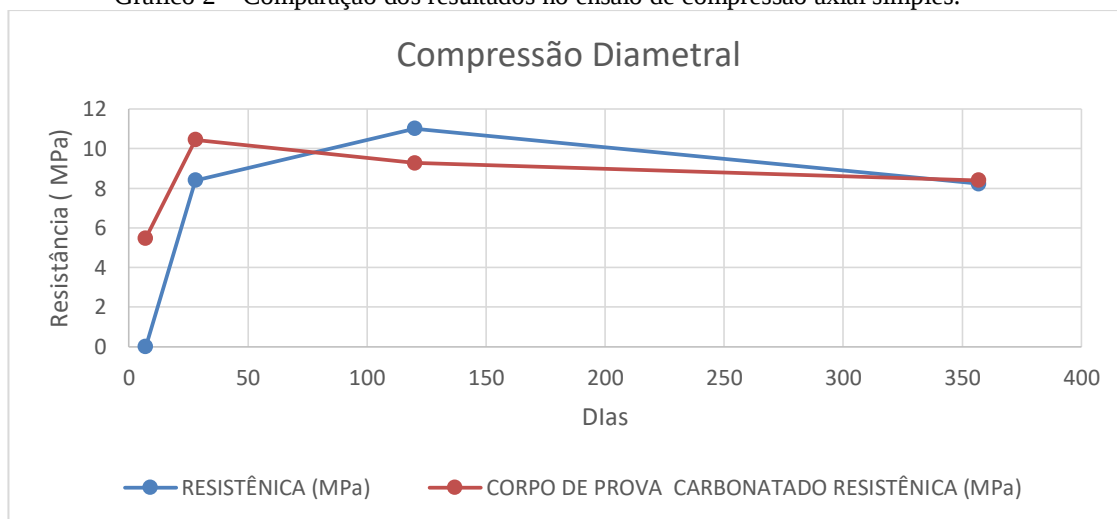
Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral.

CORPO DE PROVA NÃO CARBONATADO			
ENSAIO	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)	PRODUNDIDADE CARBONATADA (cm)
Tração por compressão diametral	7	-	-
	28	8,43	-
	56	11,01	-
	357	8,22	-
CORPO DE PROVA CARBONATADO			
ENSAIO	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)	PRODUNDIDADE CARBONATADA (cm)
Tração por compressão diametral	7	5,48	0
	28	10,44	0,20
	56	9,27	0,50
	357	8,40	0,80

Fonte: Autoria própria, 2020.

O Gráfico 2, traz a reprodução dos resultados no ensaio de tração por compressão diametral, onde percebe-se um crescimento e depois um decrescimento da resistência dos corpos de prova.

Gráfico 2 – Comparação dos resultados no ensaio de compressão axial simples.



Fonte: Autoria própria, 2020.

4.3 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

O ensaio de carbonatação, foram feitas com as amostras submetidas ao ambiente natural do IFG, como mostra a Figura 11a e Figura 11b, estando as demais amostras guardadas, afim de evitar seu contato com o ambiente.

Figura 11 – Amostras expostas ao ambiente natural.



Fonte: Autoria própria, 2020.

4.3.1 Medição da profundidade de carbonatação

A medição da profundidade de carbonatação foi feita com o auxílio de uma régua milimétrica, afim de saber a medida do seu avanço, a Figura 12, mostra como é feita a medição.

Figura 12 – Medição da profundidade de carbonatação.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Tabela 8, mostra os resultados obtidos com a medição da frente de carbonatação, de amostras carbonatadas e não carbonatadas.

Tabela 8 – Avanço da profundidade de carbonatação.

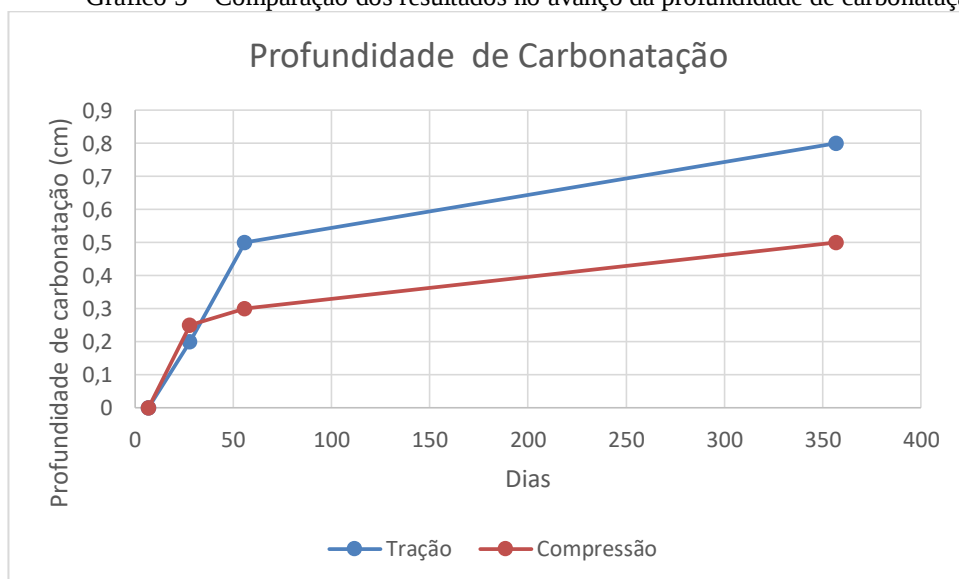
CARBONATAÇÃO - ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	
DIAS	PROFUNDIDADE (cm)
7	0
28	0,20
56	0,50
357	0,80

CARBONATAÇÃO - ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES	
DIAS	PROFUNDIDADE (cm)
7	0
28	0,25
56	0,30
357	0,50

Fonte: Autoria própria, 2020.

O Gráfico 3, é a representação do avanço da profundidade de carbonatação, nos períodos de 7, 28, 56 e 357 dias, observa-se que com o passar do tempo teve um aumento, chegando aos 0,8 cm no último ensaio realizado, a tração.

Gráfico 3 – Comparação dos resultados no avanço da profundidade de carbonatação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Ao analisar os resultados, pode-se concluir que o avanço de carbonatação maior foi obtido no ensaio de tração por compressão diametral, onde observa-se 0,8 cm de frente carbonatada e de 0,5 cm no ensaio de compressão axial simples. Fazendo uma regra de três simples, temos que para a frente de carbonatação atingir todo o corpo de prova, teremos uma espera de aproximadamente 25 anos, nos corpos de prova do ensaio de tração por compressão diametral e 39 anos no ensaio de compressão axial simples.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante as leituras de trabalhos acadêmicos e artigos pôde-se perceber que a linha de pesquisa sobre patologia no Brasil é recente, encontrando trabalhos da década de 80 que mostravam a preocupação com a durabilidade, sendo esse conceito incorporado à norma de estruturas de concreto, a 6118, somente em 2003.

Foi possível observar a formação dos conceitos, alguns que são aplicados nas disciplinas de estruturas, considerando as máximas solicitações (em torno de 95%) para as menores resistências (em torno de 5 %), prevenindo assim que a estrutura não sofra ruínas, nem colapsos, sendo calculada para não alcançar a máxima solicitação.

Durante a revisão da literatura, pôde-se observar que o estudo sobre manutenção é recente, e sobre o desempenho, que foi citado pela ISO na década de 80, foi introduzido na ABNT em 2010, na norma 15575. Foi possível entender que o profissional deve fazer um manual para a manutenção, seguindo as recomendações da NBR 14037 de 1998, evitando assim o término da vida útil, bem como as deteriorações das estruturas, que muitas vezes ocorrem devido à falta das manutenções preventivas e corretivas.

Verifica-se que alguns profissionais não conseguem fechar o ciclo de durabilidade, deterioração e vida útil, e para fins de simplificação utilizam a norma de inspeção predial nacional do IBAPE - Instituto brasileiro de avaliações e perícias de engenharia, que na sua última versão introduziu os conceitos de desempenho e manutenção, consistindo basicamente num modo de realizar vistoria, classificando os graus de riscos da falha, indicando as prioridades e responsabilidades, sendo mais utilizada para fins comerciais.

Durante a revisão bibliográfica, foi observado que a patologia surge devido as deteriorações que ocorrem devido a agressividade do ambiente, ao uso incorreto da edificação e a ausência de manutenções, tornando difícil afirmar que uma obra realizada em uma cidade ocorre as mesmas patologias das executadas em cidades diferentes.

Em relação ao ensaio de *slump*, abatimento do tronco de cone, verificou-se que o resultado obtido ficou dentro do intervalo considerado para calcular o traço.

Em relação aos ensaios compressão axial simples, observa-se um aumento significativo da resistência do concreto ao longo do período ensaiado, quanto ao ensaio de tração por compressão diametral, percebe-se um aumento e depois um decrescimento em relação a resistência dos corpos de prova, e quanto a carbonatação, verificou-se o avanço da frente de carbonatação, de forma significativa chegando a um resultado de máximo de 0,8 cm, faltando 4462,5 dias para completas a face de 10 cm. E para o ensaio de compressão, faltam 7140 dias para alcançar a face toda.

Quando comparou os valores da resistência a tração carbonatado, com os valores não carbonatados, verificou-se uma redução da resistência a compressão, quando compara as amostras carbonatadas as não carbonatadas, de 1,15%, 2,13% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Quando compara o valor carbonatado de 7 dias a 28 dias, verifica que houve uma redução de 3,8 %. O mesmo foi feito para o ensaio de tração por compressão diametral, tendo maiores diferenças, com os seguintes resultados quando compara as amostras carbonatadas as não carbonatadas, de 23,8%, 18,8% e 2,9 %, em relação aos 28 dias, 56 e 357 dias, respectivamente. Quando compara o valor carbonatado de 7 dias a 28 dias, verifica que houve uma redução de 9,05%. Nota-se uma diferença maior até atingir os 28 dias, ficando menor em ambos os casos uma redução de 2,9% para valores de 357 dias, mostrando que após os 80 dias, existe pouca alteração nas resistências.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho aplicou-se a medição manual da frente de carbonatação sugerindo como trabalho futuro, verificar a frente de carbonatação por meio de existente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide to durable concrete – ACI 201.2R – 08**. Farmington Hills, ACI, 2008.

ARAÚJO, Gleidson Soares; SILVA, elisabete oliveira da; VIEIRA, Fernanda Sousa. **CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**. In: Anais da VII Mostra de Pesquisa em Ciência e Tecnologia DeVry Brasil. Anais. BELÉM, CARUARU, FORTALEZA, JOÃO PESSOA, MANAUS, RECIFE, SALVADOR, SÃO LUÍS, SÃO PAULO, TERESINA: DEVRY BRASIL, 2016. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/viimostradevry/29067-CARBONATACAO-DO-CONCRETO>. Acesso em: 23/03/2020 10:56.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização de cimento Portland**. 7. Ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT – 106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1:2013. Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14037: Manual de operação, uso e manutenção das edificações. Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67: 1998. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Procedimento – Rio de Janeiro, 2003.

AZEREDO, H. A. **O edifício e sua cobertura**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. Tradução de Maria Celeste Marcondes, Carlos W. F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. 1 ed. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ações da carbonatação no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1a. ed. São Paulo. IBRACON, v 1, p 849-885, 201.

Cimento Portland composto com pozolana. Disponível em:

<https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-ii-z-32/>. Acesso em 16/06/2020.

COUTO, Rafael Aredes. **Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à carbonatação**. Belo Horizonte, 2017.

GENTIL, V. **Corrosão**. Livros Técnicos e Científicos S. A, 3 ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996.

HELENE, P. R. L. **Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Seminário de Patologia das Construções, 2, 2004, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004.

v. 1. p. 1-30.

HELENE, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto**. São Paulo, 1997.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini – Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, 1986. 47p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **General principles on the design of structures for durability**. ISO 13823. 2008.

ISAIA, G.C; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A.L.G. (1998). “Efeitos de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. Rio de Janeiro. Anais. São Paulo. 14p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **General principles on the design of structures for durability**. ISO 13823. 2008.

KAZMIRCZAK, C. S.; **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. 168 p. Tese de doutorado – CPGECC, Escola Politécnica de São Paulo – USP, São Paulo.

Kobuku, M.; Nagataki, S. (1989). **Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test**. In: MALHOTRA, V. M (Ed.) International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim. Detroit: American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p.315-329 (SP-114).

LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. “**Durabilidade do Concreto:**

Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes”. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana n. 8 (2018) pp. 14-25

MEDEIROS, M. H. F., ANDRADE, J. J. O., HELENE, P. (2011). **Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto Armado**. Capítulo 22.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. – João Pessoa: IFPB, 2017.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de**

armaduras. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 211p.

NEVILLE, A. M., “**Creep of concrete as a function of its cement paste content**”, Magazine Concrete, Res. 16, Nº 46, 1964, P. 21-30.

OLIVEIRA, T. R. **Análise da frente de carbonatação em concreto convencional: Estudo de caso em edificações com idade diferenciada na cidade de Juazeiro do Norte** – CE. Juazeiro do Norte, 2017.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem.** Revista Concreto, 2009, p.14.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

PRUCKNER, F. (2001). “**Corrosion and protection of reinforcement in concrete measurements and interpretation**”. Vienna, 9 p. Thesis (Doctorate) – Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Vienna.

REBMANN, M.S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento portland e alta resistência.** Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.

RILEM CPC-18. (1988). “**Measurement of hardened concrete carbonation depth**”. In: Materials and Structures, [s.n.], p. 453-455.

SILVA, Valdirene Maria (2007). “**Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**”. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.