



**ESTUDO COMPARATIVO DAS CONDIÇÕES ATUAIS DAS CHAMINÉS A E B,
COM DIFERENÇA DE IDADE DE 13 ANOS.**

AMERICANA
2020



JAQUELINE PEGORETTI GRANATTI

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CONDIÇÕES ATUAIS DAS CHAMINÉS A E B,
COM DIFERENÇA DE IDADE DE 13 ANOS**

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

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

AMERICANA
2020

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por estarem sempre a frente de minha vida.

A minha família, por todo o apoio sempre.

Aos meus amigos, que sem eles, a vida não teria sentido.

Ao meu marido Wagner, pelo apoio em todas as áreas da vida, pelas conversas, pela amizade, pelo apoio familiar, pessoal, financeiro, e principalmente nos estudos, em me apoiar na escolha do curso, e pela confiança e compreensão, quando tive que ficar longe o fim de semana todo, durante esse período de conhecimento.

A CRB Construtora, pela confiança a me proporcionar a coordenação das obras de alto padrão, assim como meus superiores Alexandre e Gerson, por todo o apoio recebido nesses anos, pois estar nessa construtora me motivou a escolher esse curso, para que possamos juntos continuar entregando as obras, mantendo a qualidade de sempre.

A Petra Consultoria, pelo apoio recebido no fornecimento dos ensaios.

Ao Grupo IDD, pela oportunidade de ter aprendido com o ensinamento e experiência de ótimos professores, assim como os colegas e amigos de classe, que contribuíram muito para o sucesso desse curso.

Ao orientador Luís César De Luca, pela paciência na orientação deste trabalho, e por compartilhar seu conhecimento para a elaboração do mesmo.

Ao coordenador José Mário Andrello, pela paciência, por distribuir conhecimento e pela prontidão de estar sempre disposto a nos auxiliar e orientar.

Ao meu irmão Rafael, que é minha referência e meu orgulho na busca pelo conhecimento.

A minha vó Thereza, pelas bençãos dadas, as palavras de tranquilidade, e pela preocupação, quando pegava a estrada para ir até Americana. Sempre pedia para avisar quando tivesse chego, e por várias vezes orou, ainda mais em dias de chuva, para que eu chegasse em segurança.

A minha mãe Sandra, que sempre foi minha referência de determinação, garra, estudos, simplicidade, honestidade, alegria, e que de onde estiver, sei que está feliz, por ver mais essa etapa vencida. Te amo mãe.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo executar um estudo comparativo das condições atuais das estruturas das chaminés A e B, através de inspeções visuais e de resultados dos ensaios de detecção eletromagnética das armaduras, de alcalinidade, ultrassonografia, extração de testemunho e esclerometria, concluindo pela necessidade de uma impermeabilização e do aumento de cobrimento, devido ao ambiente agressivo em que se encontram, oriundo do processo de fabricação do papel. A chaminé A foi construída em 1988, e possui atualmente 32 anos de idade. Já a chaminé B foi construída em 2001, e completa 19 anos de sua construção. Ambas as chaminés foram dimensionadas conforme a norma de projeto de estruturas de concreto, na versão da NBR 6118 (antiga NB1) de 1978, pois a mesma teve sua revisão apenas em 2003. No Brasil a primeira norma sobre estruturas de concreto data de 1931. A NBR 6118:1978 permitia cobrimentos bem inferiores, e desprezando acintosamente a agressividade do meio ambiente. Em face dos enormes prejuízos causados com a perda precoce da vida útil de inúmeras obras públicas e privadas, poder-se-ia dizer que a norma brasileira, já àquela época, era temerária. Ambas as chaminés foram construídas em concreto armado, e possuem diferença de idade de 13 anos, estando localizadas em uma fábrica de papel e celulose, na cidade de Limeira/SP. Dentre as manifestações patológicas encontradas, constatou-se, através dos ensaios realizados e inspeções visuais, falhas de execução, pontos com cobrimentos insuficientes, corrosão de armaduras, pontos carbonatados, fissuras, pontos vazios na estrutura, eflorescências, lixiviação, acúmulo de fuligem, infiltrações devido a fissuras, e ausência de impermeabilização. Durante a conclusão do trabalho, certificou-se que a chaminé B apesar de ter a sua construção mais recente, possui um avanço de carbonatação de 0,69 mm/ano mais rápido do que a chaminé A, proveniente de falha na execução e/ou traço de concreto, como constatou-se no ensaio de ultrassonografia. Pela inspeção visual, constatou-se que a chaminé A está em estado mais avançado de degradação. Já no ensaio de detecção eletromagnética de armaduras, identificou-se que na chaminé B, 60% dos pontos estão de acordo com o cobrimento da norma vigente, enquanto que na chaminé A, apenas 50% dos pontos ensaiados atendem o cobrimento da norma atual. Foi constatado que externamente, a chaminé A encontra-se mais degradada do que a chaminé B, porém, internamente, ambas estão em condições de conservação semelhantes. Durante esse período, nenhuma das chaminés passaram por manutenção.

Palavras-chave: *manifestações patológicas, estrutura de concreto, chaminé, fábrica de papel e celulose.*

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Sinais de lixiviação e impregnações de sais na mureta.....	21
Foto 2 – Fissura com manchas de percolação de água e eflorescência.....	23
Foto 3 - Ensaio para identificar a frente de carbonatação.	26
Foto 4 - Vista aérea da fábrica, e a localização das chaminés.....	33
Foto 5 - Deslocamento do concreto e corrosão das armaduras.	34
Foto 6 – Processo de lixiviação do concreto.	34
Foto 7 – Evidência de umidade e eflorescência.	34
Foto 8 – Parede interna com armaduras com baixo cobrimento.	34
Foto 9 - Vista geral das paredes externas da Chaminé A.	35
Foto 10 – Na parede externa com danos do concreto e armadura.....	35
Foto 11 – Escorrimento dos subprodutos oriundos da exaustão.	35
Foto 12 - Degradação da pasta de cimento do concreto.	35
Foto 13 - Parede interna com deslocamento do concreto.	36
Foto 14 - Pontos de segregação no concreto da laje teto.....	36
Foto 15 - Laje de teto com sinais de eflorescência.....	36
Foto 16 - Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.....	38
Foto 17 – Ensaio de alcalinidade do concreto.	38
Foto 18 - Realização do ensaio de ultrassonografia.	39
Foto 19 - Realização do ensaio de esclerometria	39
Foto 20 - Extração de testemunho.	40
Foto 21 – Ensaio de Resistência a compressão.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo. Fonte: POSSAN, 2010.....	25
Figura 2 - Esquema simplificado de corrosão de armadura por carbonatação. Fonte: (HELENE, 2013).....	25
Figura 3 - Representação das estruturas em contato com o mar têm maior vulnerabilidade nas zonas de variação da maré. Fonte: (HELENE, 2013).....	27
Figura 4 - Princípio de funcionamento de ensaio de VPU.	29
Figura 5 - Modelo simplificado de funcionamento de um esclerômetro. Fonte: (THOMAZ, 2020).	30
Figura 6 – Croqui de localização dos ensaios.	37
Figura 7 – Espessura média de cobrimento.	42
Figura 8 – Ensaio de alcalinidade.....	43
Figura 9 – Ensaio de ultrassonografia.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Interpretação de resultado. Fonte: CANOVAS, 1988	30
Tabela 2 – Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.....	41
Tabela 3 – Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.....	42
Tabela 4 – Ensaio de alcalinidade do concreto.	43
Tabela 5 – Ensaio de ultrassonografia - Chaminé A	45
Tabela 6 – Ensaio de ultrassonografia - Chaminé B	46
Tabela 7 - Extração de testemunho.	47
Tabela 8 – Ensaio de resistência a compressão.	48
Tabela 9 - Ensaio de esclerometria – Chaminé A	49
Tabela 10 - Ensaio de esclerometria – Chaminé B.....	50

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	6
LISTA DE FOTOS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	9
SUMÁRIO.....	10
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1. Objetivo Geral	14
1.2.2. Objetivos Específicos	14
1.3. HIPÓTESE	14
1.4. JUSTIFICATIVAS	14
1.4.1. Tecnológicas.....	15
1.4.2. Econômicas	15
1.4.3. Sociais	15
1.4.4. Ecológicas	16
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	18
2.1.1. Definição	18
2.1.2. Vida Útil	19
2.2. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	
20	
2.2.1. Definição	21
2.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO, RELATIVOS AO CONCRETO	21
2.3.1. Lixiviação	21

2.3.2.	Expansão por Sulfatos	22
2.3.3.	Eflorescência	23
2.4.	MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO, RELATIVOS Á ARMADURA	23
2.4.1.	Corrosão por Carbonatação	24
2.4.2.	Corrosão por Cloreto (Alto Teor de Íon Cloro)	26
2.5.	ENSAIOS	27
2.5.1.	Ensaio de Detecção Eletromagnética de Armaduras	27
2.5.2.	Ensaio de Alcalinidade do Concreto	28
2.5.3.	Ensaio de Ultrassonografia.....	29
2.5.4.	Ensaio de Esclerometria	30
2.5.5.	Ensaio de Resistência a Compressão	30
2.5.6.	Extração de Testemunho	31
3.	ESTUDO DE CASO.....	32
3.1.	SISTEMATIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	32
3.2.	INSPEÇÃO VISUAL COM REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CHAMINÉ A	
	33	
3.1.	INSPEÇÃO VISUAL COM REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CHAMINÉ B	
	35	
3.2.	LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ENSAIADOS	36
3.3.	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	37
3.3.1.	Ensaio de Detecção Eletromagnética de Armaduras	37
3.3.2.	Ensaio de Alcalinidade do Concreto	38
3.3.3.	Ensaio de Ultrassonografia.....	38
3.3.4.	Ensaio de Esclerometria	39
3.3.5.	Extração de Testemunho	39
3.3.6.	Ensaio de resistência a compressão.....	40
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	41
4.1.1.	Resultados da Espessura Média dos Cobrimentos	41
4.1.2.	Ensaio de Alcalinidade do Concreto	43

4.1.3. Ensaio de Ultrassonografia.....	45
4.1.4. Extração de Testemunho e Ensaio de Resistência a Compressão.....	47
4.1.5. Esclerometria.....	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho possui como temática principal, o estudo comparativo das condições das estruturas das chaminés A e B, onde foram feitas inspeções visuais e os ensaios de detecção eletromagnética das armaduras, de alcalinidade, ultrassonografia, extração de testemunho e esclerometria.

Assim como os seres humanos, que estão sujeitos a terem problemas no nascimento (no caso da construção, durante a execução da obra), estão sujeitos a acidentes, e também à deterioração, com o passar do tempo. Pode-se até contratar profissionais habilitados, mas sem o acompanhamento e, a vistoria técnica, o serviço pode não sair com a qualidade esperada.

Segundo (Matos, et al., 2008), como a fabricação de papel envolve processos químicos agressivos, esse ambiente acaba sendo ideal para a degradação das estruturas de concreto. Os danos identificados nessas estruturas de concreto armado são causados, além do ambiente, pela má execução, pela falta de manutenção preventiva no decorrer dos anos, e devido a finalidade de uso e operação da estrutura, ela sofre agressão química e física, tendo como sequela a deterioração e degradação dos substratos de concreto.

Devido ao ano de construção, nenhuma das chaminés foram executadas seguindo os parâmetros de durabilidade e vida útil, como observa-se hoje em dia, pois no ano de construção e de projeto a NBR 6118 (antiga NB1) de 1978 não abordava o desempenho da durabilidade.

Hoje, a ABNT possui uma grande atualização de seu catálogo de normas, comparando-se com o ano de construção das chaminés.

Em vigor desde 2013, a norma de desempenho veio para estabelecer padrões mínimos de qualidade nas edificações residenciais. Os problemas patológicos estão presentes na maioria das edificações, seja com maior ou menor intensidade, variando do período de aparição e, ou forma de manifestação (PIRES, 2013).

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A chaminé A e a chaminé B, com diferença de idade de 13 anos e situadas em uma fábrica de papel e celulose localizada na cidade de Limeira/SP, apresentam as mesmas condições atuais com relação a deterioração?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. **Objetivo Geral**

Comparar as condições atuais da chaminé A e chaminé B, com diferença de idade de aproximadamente 13 anos e situadas em uma fábrica de papel e celulose localizada na cidade de Limeira/SP.

1.2.2. **Objetivos Específicos**

Comparar os resultados dos ensaios (alcalinidade, ultrassonografia, esclerometria, detecção eletromagnética de armaduras e resistência a compressão) da chaminé A e chaminé B, com diferença de idade de aproximadamente 13 anos e situadas em uma fábrica de papel e celulose localizada na cidade de Limeira/SP.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que a chaminé B está em melhores condições, pois foi construída 13 anos depois da primeira, estando a sua estrutura mais conservada.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentaremos as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas para a elaboração desse trabalho.

1.4.1. Tecnológicas

Com o surgimento de diversos materiais, técnicas de construção, novos insumos, a fim de reduzir custos e prazos, muitos construtores utilizam dessas novas técnicas e/ou produtos em suas obras ou reformas. Porém, não utilizam a aplicação correta, não fazem a pesquisa sobre compatibilização de materiais, e até mesmo se o produto é adequado para o ambiente em que será destinado.

1.4.2. Econômicas

Quando se executa uma obra, temos o investimento de projeto, viabilidades, estudos, e investimento financeiro. Mas não há investimento no acompanhamento adequado, com um profissional habilitado. E com essa falta de acompanhamento, aparecem as patologias, que surgem após o término da construção, com o tempo de uso da edificação. Esse fato ocorre devido aos fatores externos, onde inicia-se o processo de degradação, afetando a estética, a segurança, durabilidade e a vida útil da edificação. Por esse motivo, é de extrema importância a manutenção da edificação.

Segundo Sitter (1984) a manutenção corretiva, pode sair até 25 vezes mais cara, do que a correção do problema durante a execução da obra.

1.4.3. Sociais

Do ponto de vista social o responsável deve manter a estrutura com sua manutenção em dia, pois por sua vez uma estrutura desse porte, traz segurança e

tranquilidade aos colaboradores e funcionários que ali estão, assim como também pode trazer preocupação em função da sua grandeza.

1.4.4. Ecológicas

Na parte ambiental, a construção civil é um dos grandes responsáveis pelo entulho, nas cidades brasileiras. Quando executamos uma demolição, a quantidade de entulho gerada significa um grande impacto ecológico, se não administrada a sua reciclagem, de maneira correta. Dessa forma, mantendo a edificação com sua manutenção em dia, também reduzimos o impacto ambiental que essa construção poderia produzir.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização do trabalho, sua estrutura foi baseada em teses, livros, dissertações e normas técnicas. Além das inspeções visuais, e os registros fotográficos, também foram feitos ensaios em campo, conforme veremos a seguir.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

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

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e desenvolve a durabilidade das estruturas de concreto, aborda as manifestações patológicas, vemos os diferentes tipos de mecanismos de degradação, em relação ao concreto e a armadura. Enunciamos os tipos de ensaios que foram aplicados nesse estudo.

O **Capítulo 3** trata sobre o estudo de caso deste trabalho, apresentando a história de ambas as chaminés, e as manifestações encontradas.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados com base nos dados e testes realizados durante a inspeção das chaminés.

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

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica, apresentando objetos de pesquisa, para que o objetivo do trabalho fosse atingido. Abordaremos temas como: durabilidade das estruturas de concreto, manifestações patológicas em estruturas de concreto, mecanismos de degradação relativos ao concreto e mecanismos de degradação relativos à armadura.

2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.1.1. Definição

Segundo a NBR 15575, durabilidade é a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção. É o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente, e as condições de uso, operação e manutenção (HELENE, et al., 2020). Tem como requisito conservar a segurança, estabilidade, e aptidão em serviço, durante o período correspondente a sua vida útil. Portanto, a durabilidade de um produto se encerra, quando ele deixa de atender as funções que lhe foram atribuídas, seja pela degradação, que o leva a um estado insuficiente de desempenho, ou quer seja por redução gradual da funcionalidade.

Para a durabilidade das estruturas de concreto, (HELENE, 1997) descreve que devem ser considerados os seguintes aspectos:

- ✓ Agressividade do meio;
- ✓ Classificação da resistência do concreto a um determinado tipo de agente agressivo;

- ✓ Modelos de deterioração e envelhecimento das estruturas de concreto;
- ✓ Correspondência entre agressividade do meio e a resistência à deterioração da estrutura de concreto;
- ✓ A vida útil desejada.

A durabilidade de uma construção, depende da cooperação de todos os profissionais envolvidos, como os projetistas, definindo detalhes, materiais, e manutenções preventivas. Os responsáveis pelo concreto, definindo características dos materiais, traços, e metodologia de execução. A equipe responsável pela execução, garantindo os detalhes especificados em projeto, e o usuário da estrutura, garantindo que ela seja usada para o fim a que se foi projetada, e mantendo em dia as manutenções preventivas especificadas.

2.1.2. Vida Útil

De acordo com a NBR 6118, vida útil de projeto é o período de tempo, onde se mantém as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas. O conceito de vida útil pode ser aplicado a estrutura como um todo, ou às suas partes. (HELENE, et al., 2020) apresentaram alguns conceitos de vida útil, tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras, como veremos a seguir:

- ✓ Vida útil de projeto: Período de tempo que vai até a despassivação da armadura, normalmente denominado de período de iniciação. É correspondente ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação, ou a frente de cloretos, atinja a armadura.
- ✓ Vida útil de serviço: Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície de concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o deslocamento do concreto de cobrimento.

- ✓ Vida útil última ou total: Período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. É correspondente ao período de tempo no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura, ou uma perda importante da aderência da armadura/concreto, podendo acarretar o colapso parcial ou total da estrutura.
- ✓ Vida útil residual: Corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda é capaz de desempenhar suas funções, contado nesse caso, a partir de uma data qualquer, correspondente a uma vistoria. O prazo final, nesse caso, tanto pode ser o limite de projeto, o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura, dando origem a três possíveis vidas uteis residuais. Uma mais curta, contada até a despassivação da armadura, outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto, e outra longa contada até a perda significativa da capacidade resistente do concreto, ou seu colapso.

As circunstâncias que limitam a vida útil de uma estrutura podem ser técnicos, funcionais ou econômicos. As circunstâncias técnicas são aquelas não relacionadas com o uso da estrutura. Os funcionais são referentes a capacidade de uma estrutura cumprir as funções para o qual foi projetada. E os econômicos são relativos aos custos de manutenção necessários para que a estrutura siga em uso.

A aplicação prática dos conceitos de durabilidade e de vida útil (introduzidos há mais de 40 anos na construção civil), ainda fica sujeita a particularidade de cada um dos interventores.

2.2. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.2.1. Definição

Patologia, é a ciência que estuda as doenças. Manifestação patológica é a doença. Portanto, não se diz que uma estrutura tem patologias, e sim manifestações patológicas. As manifestações patológicas podem ser entendidas, fazendo uma analogia à ciência médica, como o ramo da engenharia que estuda os sintomas, formas de manifestação, origens e causas das doenças ou defeitos que ocorrem nas edificações.

2.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO, RELATIVOS AO CONCRETO

2.3.1. Lixiviação

É o mecanismo responsável por dissolver e carregar os compostos hidratados da pasta de cimento, por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. É causada basicamente pelo contato da estrutura com a água.

Durante o processo de hidratação do cimento, é formado um composto chamado hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Essa substância, quando em contato com a água, pode ser dissolvida e carregada para fora da superfície de concreto. Essa remoção do hidróxido de cálcio, recebe o nome de lixiviação (Foto 1).



Foto 1 – Sinais de lixiviação e impregnações de sais na mureta.

Para prevenir sua ocorrência, recomenda-se restringir a fissuração, de forma a minimizar ou cessar a infiltração de água, e proteger as superfícies expostas com produtos específicos.

2.3.2. Expansão por Sulfatos

O sulfato está presente na natureza, em água do mar, de rios, lençol freático, água de pântanos, decomposição de matéria orgânica, além de ambientes poluídos, como esgotos, ambientes industriais, ou ainda no próprio agregado, utilizado no concreto. A forma mais comum de ataque por sulfatos é o ingresso de íons sulfato de alguma fonte externa para o interior da pasta de cimento hidratada.

Os sulfatos difundem-se no concreto, e demais materiais de base cimentícia, através da rede de poros dos mesmos. Dentro da pasta de cimento hidratada, os sulfatos reagem com o cálcio para formar gipsita e com as fontes de cálcio e alumínio para formar etringita. Esses compostos formados são nocivos a estrutura.

A presença de sulfatos pode acarretar reações deletérias de expansão, com formação de gipsita e/ou de etringita, acarretando fissuras que reduzem a proteção naturalmente fornecida à armadura pelo concreto de cobrimento (HELENE, 1993).

Segundo (NEVILLE, 1997), o concreto atacado por sulfato tem uma aparência esbranquiçada característica. A deterioração geralmente começa nos cantos e arestas, seguida de uma fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole. Neville (1997) também aponta que as consequências do ataque por sulfatos não compreendem somente a desagregação por expansão e fissuração, mas também a perda de resistência do concreto devido a perda de coesão na pasta de cimento e à perda de aderência entre a pasta e as partículas do agregado.

A expansão pode ocorrer inicialmente sem qualquer dano ao concreto, mas com o aumento das tensões internas, ocasiona fechamento das juntas de expansão,

deformações, deslocamentos em várias partes da estrutura, fissuração e lascamento. Quando o concreto fissura, sua permeabilidade aumenta e a água agressiva penetra mais facilmente em seu interior, acelerando, portanto, o problema da deterioração (MEHTA, et al., 2008).

2.3.3. Eflorescência

Em química, eflorescência (do francês, "bloom out"), é a perda de água (ou solvente), por cristalização da atmosfera na exposição ao ar formando sal hidratado. Eflorescências são depósitos cristalinos de cor branca que surgem na superfície externa do elemento, por meio de reações químicas (Foto 2).



Foto 2 – Fissura com manchas de percolação de água e eflorescência.

Esses depósitos são formados quando os sais solúveis são transportados pela água utilizada na construção ou até vinda por infiltração que, em contato com o ar, solidifica-se e formam-se os depósitos esbranquiçados. O sulfato de cálcio e carbonato de cálcio são elementos que normalmente resultam em eflorescências nos elementos do concreto.

2.4. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO, RELATIVOS À ARMADURA

2.4.1. Corrosão por Carbonatação

Carbonatação é o processo de transformação do gás carbônico (CO_2), dos compostos do cimento hidratado em carbonatos, denominado carbonatação do concreto. A carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto expostas à ação do dióxido de carbono, este difunde na superfície do concreto e, em presença da umidade dos poros, forma a frente de carbonatação.

A carbonatação não prejudica o concreto por si só. Pelo contrário, concretos carbonatados são mais resistentes e mais impermeáveis à penetração de agentes agressivos, que os mesmos concretos, não carbonatados (HELENE, 1993).

O problema ocorre quando se reduz a alcalinidade da solução presente nos poros ao redor das armaduras. O concreto possui um pH da ordem de 12,5, principalmente por causa do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio. O desaparecimento do hidróxido de cálcio do interior dos poros da pasta de cimento hidratado e sua transformação em carbonato de cálcio faz baixar o pH da solução em equilíbrio de 12,5 para 9,4, fator importante para o início de corrosão das armaduras (LAPA, 2008).

O CO_2 -dióxido de carbono penetra da superfície para o interior, pelo que a carbonatação inicia-se na superfície do concreto e penetra lentamente para seu interior. Em concreto de mediana qualidade, observa-se que a velocidade da carbonatação varia entre 1 a 3mm por ano. (SILVA, 1995 *apud* LAPA, 2008).

Na Figura 1, constatou-se que a carbonatação, inicia da superfície, e avança para o interior do concreto. E como reduz o pH, acaba alterando a alcalinidade, e a porosidade do material, devido a entrada dos carbonatos. Com o avanço da frente da carbonatação, identificou-se uma zona não carbonatada, uma parcialmente carbonatada, e uma zona já carbonatada. No início, a zona não carbonatada, está com seu pH integro. Conforme o CO_2 vai ingressando na estrutura, há reação com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e é formado o carbonato de cálcio (CaCO_3), e o pH do concreto é reduzido. Quando esse processo chega próximo da armadura,

diz-se que a mesma está despassivada, e fica suscetível à corrosão. Nesse último estágio, a estrutura atingiu a vida útil de projeto (HELENE, 1993). Na Figura 2 há um demonstrativo simplificado da ação da carbonatação perante o concreto e a armadura, e na Foto 3, pode-se ver um exemplo de ensaio, onde foi identificada a frente de carbonatação.

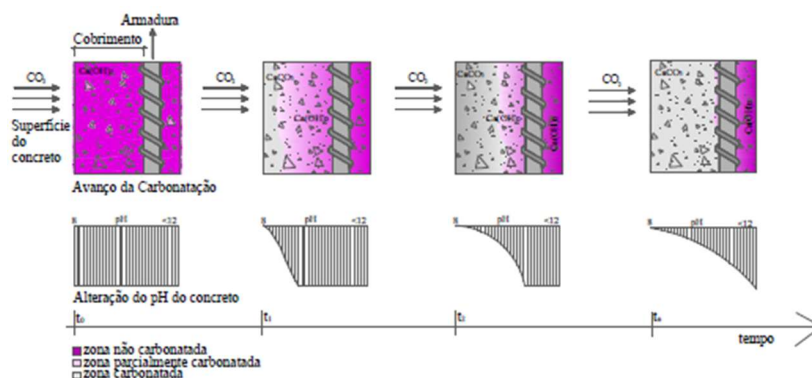


Figura 1 - Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo. Fonte: POSSAN, 2010

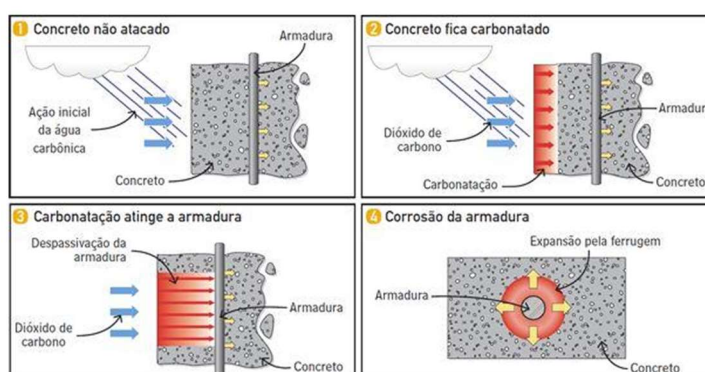


Figura 2 - Esquema simplificado de corrosão de armadura por carbonatação. Fonte: (HELENE, 2013)

Há a opção de proteger a superfície, a fim de prevenir a carbonatação, aplicando barreiras espessas como reboco, revestimentos com pedras ou cerâmicas, além de pinturas, que evitam a entrada do CO_2 (LAPA, 2008).

Segundo (HELENE, 2013), essa estratégia tem uma boa relação custo x benefício, além de ser eficiente.



Foto 3 - Ensaio para identificar a frente de carbonatação.

2.4.2. Corrosão por Cloreto (Alto Teor de Íon Cloro)

É a ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon-cloro. (HELENE, 1993) a define como “uma interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação química, física, eletroquímica, ou a combinação destas”. A corrosão das armaduras é um processo eletroquímico que tem como consequência a deterioração do aço, causando a perda de funcionalidade (TORRES, 2011).

O cobrimento das armaduras e o controle de fissuração minimizam esse efeito, sendo recomendável o uso de um concreto de pequena porosidade (NBR 6118, 2014).

Na natureza, a situação mais agressiva ao concreto armado e protendido é a região de variação e respingos de maré sujeita a molhagens e secagens (Figura 3). Já do ponto de vista de produtos e substâncias industriais, são os ácidos os mais agressivos. Os cloretos, por exemplo, penetram nos poros do concreto e despavam as armaduras promovendo a corrosão. Esse fenômeno é muito mais rápido do que a ação dos sulfatos da água do mar ou de esgoto sobre o concreto (HELENE, 2013).

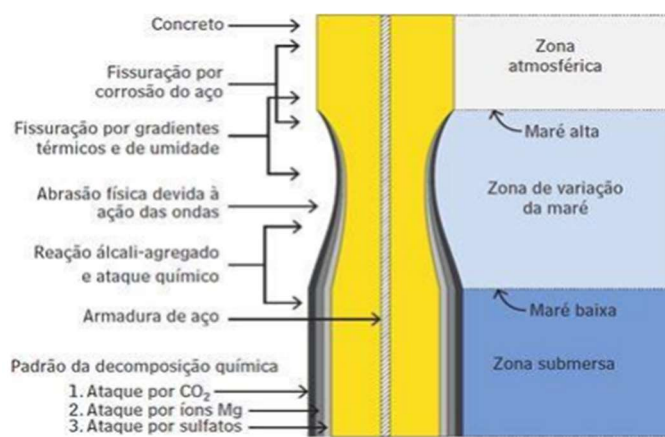


Figura 3 - Representação das estruturas em contato com o mar têm maior vulnerabilidade nas zonas de variação da maré. Fonte: (HELENE, 2013)

A concentração de cloretos necessária para promover a corrosão é fortemente afetada pelo pH do concreto. Portanto, os efeitos da interação da carbonatação com os íons cloretos levam a uma aceleração da velocidade da corrosão, quando comparada com a ocorrência dos ataques de forma independente (LAPA, 2008).

2.5. ENSAIOS

2.5.1. Ensaio de Detecção Eletromagnética de Armaduras

Esse é um ensaio não destrutivo, e seu objetivo é identificar as armaduras existentes no seu interior, suas posições, espaçamentos, para verificar se estão de acordo com o projeto (quando esses existem), e auxiliar na escolha da localização do ponto para extração dos corpos de prova, sem que haja danos às armaduras, para não haver interferência na realização de outros possíveis ensaios.

Há duas tecnologias dentre os detectores de materiais. A mais simples, funciona através da leitura eletromagnética de barras de aço. Mais conhecida como pacômetro. A mais avançada, é capaz de identificar outros materiais além do aço, utiliza o escaneamento por radar, mais conhecido como georadar. É um método de

ensaio geofísico que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência. No que diz respeito a precisão, ambos os sistemas são eficientes, porém, o sucesso da leitura depende da preparação correta do local a ser ensaiado, da calibração dos equipamentos, e da interpretação correta dos dados.

Esse ensaio segue o método da norma ACI 228 2R-13.

2.5.2. Ensaio de Alcalinidade do Concreto

A alcalinidade do concreto é obtida a partir do ensaio colorimétrico, que identifica até qual região ou camada do concreto está carbonatada, e que não oferece mais a proteção às armaduras, permitindo a despassivação das mesmas.

Para a realização desse ensaio, é preparada a solução de fenolftaleína, contendo a fenolftaleína, o álcool etílico, e água potável. É feita uma abertura manual do concreto, em determinados pontos das peças/elementos a serem analisados, e em espessuras equivalentes aos cobrimentos. É feita uma limpeza do local com pincel limpo, para deixar o local isento de pó, ou outro material que possa interferir no resultado, e pulverizada a solução indicada.

Para interpretar o resultado da solução aplicada, nas áreas onde não houve carbonatação, ou seja, quando o pH está alcalino, o concreto fica com a coloração rosada. Já quando a solução entra em contato com as regiões onde há sinal de carbonatação, com o pH abaixo de 10, o concreto fica incolor, indicando a presença de carbonatação. O fenômeno de carbonatação dá-se pela ação dos gases ácidos da atmosfera, que penetram no concreto pela sua porosidade, e reagem com o hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. O resultado dessa reação é a formação de carbonatos e água, que provocam a queda do pH, dando início à frente da carbonatação.

Segundo (POSSAN, 2010), o ingresso de CO_2 através do concreto depende de inúmeros fatores. Os fatores estão diretamente relacionados aos materiais de

construção, ao processo construtivo, e às condições ambientais em que a estrutura está inserida.

2.5.3. Ensaio de Ultrassonografia

O ensaio de ultrassom, tem como objetivo avaliar a qualidade das estruturas de concreto, no que diz respeito às falhas internas da estrutura, identificando descontinuidade. É obtido através desse resultado, medindo o tempo que o pulso ultrassônico leva para atravessar a seção do concreto. Para esse ensaio, é utilizado um equipamento ultrassônico, onde possui uma fonte, onde são conectados dois transdutores, sendo um transmissor, e outro receptor (Figura 4). O transmissor emite para dentro da estrutura ondas acústicas com frequência ultrassônica, que são recebidas pelo receptor. Com essa transmissão, é registrado a velocidade de propagação das ondas, onde podemos dizer que a velocidade de propagação é maior, nos elementos mais íntegros. A velocidade do pulso é tanto maior, quanto mais denso for o meio (CAVALCANTI, 2010 *apud* CHIES, 2014).

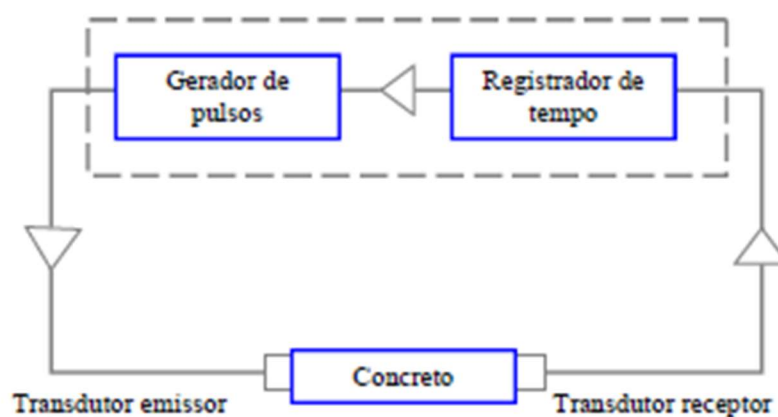


Figura 4 - Princípio de funcionamento de ensaio de VPU.

Fonte: LORENZI, 2009 *apud* CHIES, 2014

Segundo (CANOVAS, 1988) , observa-se na Tabela 1, quais são os parâmetros usados na análise do ensaio, a fim de interpretar os resultados obtidos.

Velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade de concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Tabela 1 – Interpretação de resultado. Fonte: CANOVAS, 1988

2.5.4. Ensaio de Esclerometria

O ensaio de esclerometria é utilizado para determinar o valor aproximado da resistência superficial do concreto e da sua uniformidade (Figura 5). Para esse ensaio, utilizamos um aparelho chamado esclerômetro, que mede a dureza superficial do concreto e a correlaciona com a resistência à compressão desse concreto. A realização desse ensaio consiste em uma massa martelo, que é impulsionada por mola, e choca-se com a área a ser ensaiada.

Quanto maior a dureza da superfície, menor a parcela da energia que se converte em deformação permanente, e maior deve ser o recuo, ou a reflexão da massa martelo.

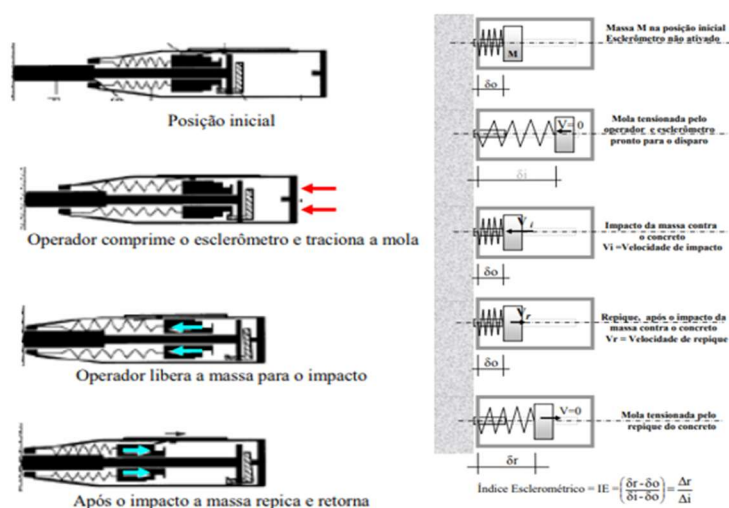


Figura 5 - Modelo simplificado de funcionamento de um esclerômetro. Fonte: (THOMAZ, 2020).

2.5.5. Ensaio de Resistência a Compressão

Um dos ensaios essenciais, quando se trata de obras com elementos de concreto. Ele indica a resistência à compressão, uma propriedade ligada diretamente à estabilidade e segurança estrutural, nos informando sobre a qualidade da estrutura.

A resistência é medida em megapascal (MPa), e cada 1 MPa, é correspondente a uma resistência aproximada de 10 kgf/cm².

O fck indica a tensão a qual o concreto tem capacidade de resistir. Dessa forma, os ensaios de resistência no concreto possibilitam confirmar a tensão máxima a que ele irá resistir, antes de sofrer ruptura.

Portanto, cada caminhão betoneira que chega na obra, o funcionário responsável pelo controle tecnológico deve prosseguir com a moldagem dos corpos de prova, identificando a data, hora, número da nota fiscal, e identificação do elemento concretado.

2.5.6. Extração de Testemunho

Diretamente interligado ao ensaio de resistência a compressão, citado anteriormente, a extração de testemunho é feita quando não é possível saber ao certo, sobre o estado da estrutura, quanto à sua resistência e/ou desempenho, seja por resultados de ensaios laboratoriais abaixo do esperado, ou devido a deterioração da estrutura. Uma amostra do elemento estrutural (após análise do local a ser ensaiado, pela equipe responsável), através da perfuratriz, e essa amostra é levada ao laboratório para o rompimento, e obtenção da resistência.

Essa amostra deve ser homogênea, e sem barras de aço. Por isso é importante a realização dos ensaios citados anteriormente, para que a amostra seja retirada do local correto, e não tenha que realizar outro ensaio destrutivo a estrutura.

3. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado o caso que foi utilizado para o estudo comparativo. Serão estudadas as condições das estruturas de ambas as chaminés, para analisar suas condições, em relação a diferença de idade, e sua deterioração.

Com diferença de 13 anos de idade, nenhuma das chaminés passaram por manutenções, ao longo desses anos, desde a construção. Dessa forma, deve ser feito um plano de manutenção do imóvel, seguindo a norma NBR 16747:2020 Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento, assim como a NBR 5674:2012 Manutenção de edificações - Requisitos para o sistema de gestão de manutenção.

3.1. SISTEMATIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O caso estudado, trata-se de duas chaminés que ficam localizadas em uma fábrica de papel e celulose, situada na cidade de Limeira/SP. A fábrica está instalada na zona rural, porém, com trânsito intenso de veículos leves, médios e pesados.

Este trabalho foi dividido em quatro etapas, sendo a primeira, a inspeção preliminar, a segunda foi a inspeção visual e relatório fotográfico, seguido da realização de ensaios, e análise dos resultados de ensaios.

Ambas as chaminés, denominadas nesse estudo como A e B, possuem uma altura de 125 m, e foram construídas no formato circular, em concreto armado, sendo a chaminé A com resistência de concreto em projeto de 18 MPa, e a chaminé B por sua vez possui resistência em projeto de 20 MPa. A chaminé A possui uma área externa de 4250 m², e a chaminé B possui uma área externa de 4400 m².

As chaminés foram construídas em anos distintos. A chaminé A, foi construída em 1988 e possui 32 anos de idade, e a chaminé B, construída em 2001,

possui 19 anos. Nota-se pela inspeção visual, que a chaminé A está mais degradada externamente do que a chaminé B.

As manifestações patológicas vistas, são resultados do envelhecimento natural do elemento, porém, devido à falta de manutenção, e a exposição ao ambiente agressivo, esse processo de degradação é acelerado, devido aos pontos em que a estrutura se encontra vulnerável. Segundo a NBR 6118:2014, a classe de agressividade nesta fábrica está avaliada como Classe IV – Muito Forte. Porém, sua concepção foi baseada na NBR 6118:1978, quando ainda não existia os capítulos 6 e 7 que permitem uma previsão da evolução da deterioração das estruturas de concreto armado.

Na foto abaixo (Foto 4), podemos ver a fábrica, assim como a localização das chaminés.

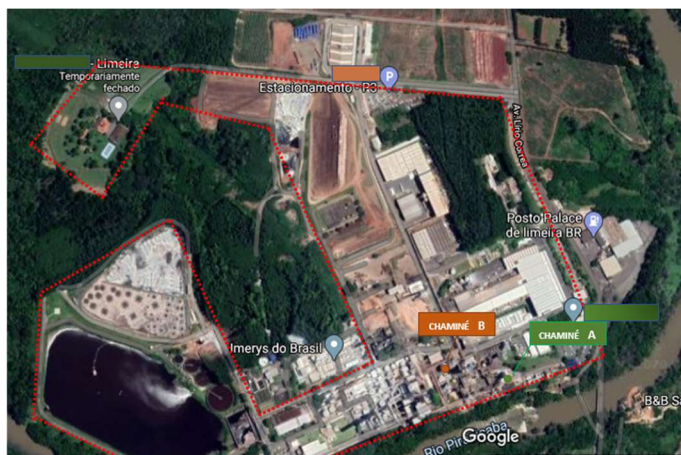


Foto 4 - Vista aérea da fábrica, e a localização das chaminés

3.2. INSPEÇÃO VISUAL COM REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CHAMINÉ A

No interior da chaminé encontram-se sinais de deslocamento do concreto ocasionados pela corrosão das armaduras, onde nota-se eflorescência e contaminação da superfície (Foto 5) por fuligem originadas do processo fabril.

Na laje de teto nota-se o processo de lixiviação do concreto, já com manchas esbranquiçadas (Foto 6).



Foto 5 - Deslocamento do concreto e corrosão das armaduras.



Foto 6 – Processo de lixiviação do concreto.

Registra-se que a laje está com sinais de vazamentos originados de águas de chuva, e eflorescências devido a fissuras e falta de impermeabilização. Observa-se a degradação das instalações elétricas (Foto 7).

Parede interna em nível intermediário armaduras com baixo cobrimento e em estado avançado de corrosão nas janelas de passagem das tubulações de gás (Foto 8).



Foto 7 – Evidência de umidade e eflorescência.



Foto 8 – Parede interna com armaduras com baixo cobrimento.

Vista geral das paredes externas da Chaminé A, sem proteção e exposta às agressões químicas do ambiente e ao intemperismo. Verifica-se a degradação superficial generalizada do concreto com deslocamentos e corrosão de armaduras que têm baixo cobrimento (Foto 9).

Na parede externa, em maior detalhe os danos do concreto devido a expansão da armadura. Verifica-se estrutura de concreto com deslocamentos e com armaduras corroídas (Foto 10).



3.1. INSPEÇÃO VISUAL COM REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CHAMINÉ B

Na porta de acesso a chaminé, há sinais de escoamento dos subprodutos oriundos da exaustão dos dutos da chaminé (Foto 11).

Na parede externa, a área inferior apresenta degradação da pasta de cimento do concreto, com os agregados expostos. Há contaminação do concreto (Foto 12).



No nível 75,00m, a parede interna encontra-se com deslocamento do concreto, proveniente da expansão das armaduras gerada pela corrosão da mesma (Foto 13).

Encontra-se pontos de segregação no concreto da laje teto no nível 125,00m (Foto 14).



Foto 13 - Parede interna com deslocamento do concreto.



Foto 14 - Pontos de segregação no concreto da laje teto.

Evidencia-se sinais de eflorescência na laje do teto da chaminé (Foto 15).

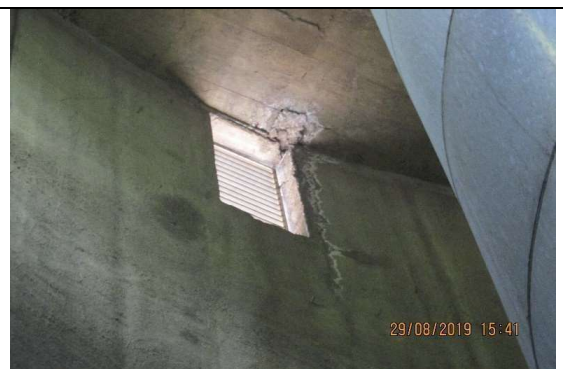


Foto 15 - Laje de teto com sinais de eflorescência.

3.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ENSAIADOS

Abaixo (Figura 6) apresenta-se o croqui, com a localização dos pontos, a que foram submetidos aos ensaios:

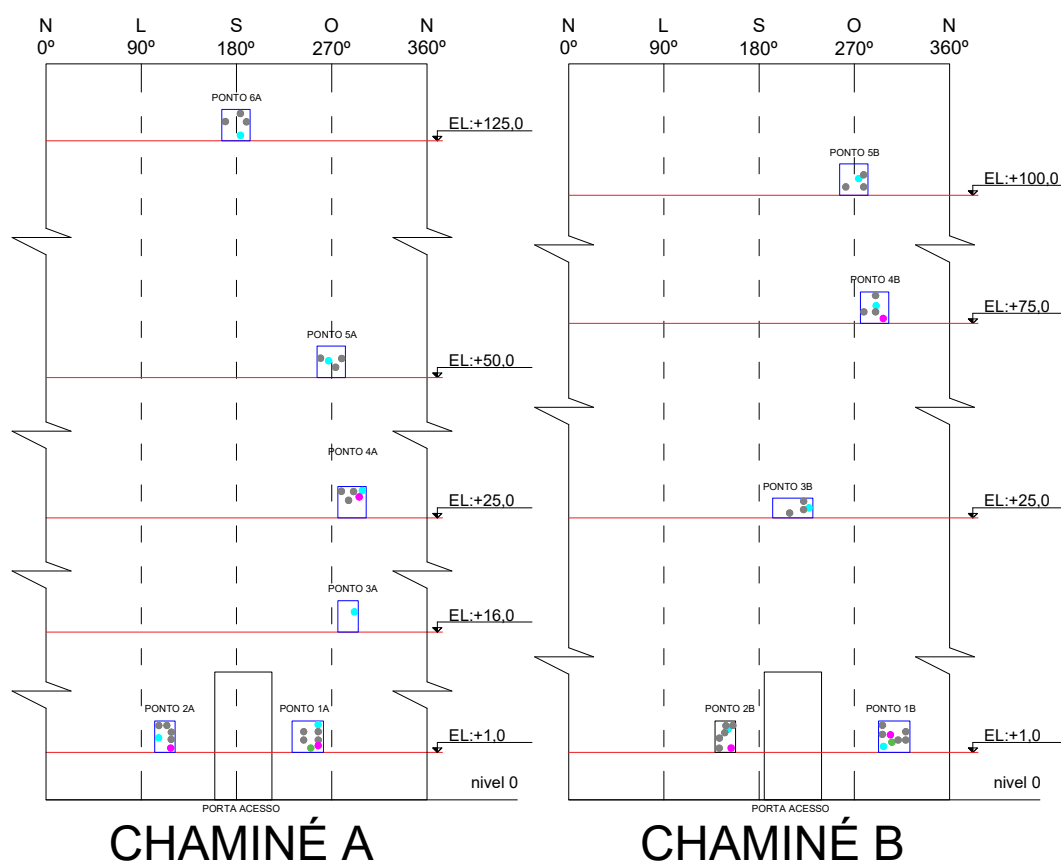


Figura 6 – Croqui de localização dos ensaios.

3.3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Abaixo serão apresentados os ensaios que foram realizados no presente estudo de caso. Os registros fotográficos foram realizados pela empresa Petra Consultoria, em contribuição ao presente estudo de caso.

3.3.1. Ensaio de Detecção Eletromagnética de Armaduras

Na foto abaixo (Foto 16), temos a realização do ensaio de detecção eletromagnética de armaduras, onde foi possível verificar o cobrimento das armaduras.



Foto 16 - Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.

3.3.2. Ensaio de Alcalinidade do Concreto

Na foto abaixo (Foto 17), temos a realização do ensaio de alcalinidade, onde podemos ver a frente de carbonatação presente no concreto.



Foto 17 – Ensaio de alcalinidade do concreto.

3.3.3. Ensaio de Ultrassonografia

O ensaio de ultrassonografia tem como objetivo avaliar a homogeneidade do concreto, como podemos ver no ensaio abaixo (Foto 18).



Foto 18 - Realização do ensaio de ultrassonografia.

3.3.4. Ensaio de Esclerometria

O objetivo desse ensaio é determinar o valor aproximado da resistência do concreto através do esclerômetro, sem que haja danos a estrutura de concreto (Foto 19).



Foto 19 - Realização do ensaio de esclerometria

3.3.5. Extração de Testemunho

A extração de testemunho é feita utilizando uma perfuratriz, para obter uma amostra do concreto (Foto 20). Não é necessariamente um ensaio, mas é indispensável para a realização do ensaio que veremos a seguir, o ensaio de resistência a compressão.



Foto 20 - Extração de testemunho.

3.3.6. Ensaio de resistência a compressão

No ensaio de resistência a compressão, ensaiamos a amostra/testemunho, nesse caso obtida através da extração do local a ser ensaiado. O mesmo é comprimido (Foto 21), e nos indica a tensão a qual o concreto tem capacidade de resistir, antes de sofrer sua ruptura.



Foto 21 – Ensaio de Resistência a compressão.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado os resultados dos ensaios já feitos no presente estudo de caso, com suas respectivas análises.

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Abaixo encontram-se os ensaios realizados, a fim de comparar a saúde das estruturas das chaminés A e B.

4.1.1. Resultados da Espessura Média dos Cobrimentos

Na Tabela 2 alguns pontos, como os pontos 01, 02 e 06-A estão com o cobrimento inadequado, assim como várias regiões de concreto, observadas nas inspeções visuais. Conforme a leitura feita no ensaio citado, em 50% dos pontos, os cobrimentos estão de acordo com a NBR 6118:2014.

	Cobrimento médio (mm)		Cobrimento aferido (mm)
Ponto 01-A	46,1	39,4	43,0
Ponto 02-A	44,6	43,8	40,7
Ponto 03-A	80,3	70,7	75,5
Ponto 04-A	68,0	62,7	65,4
Ponto 05-A	64,8	59,0	61,9
Ponto 06-A	39,0	38,0	38,5

Tabela 2 – Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.

A chaminé A possui cobrimentos que vão de 39 a 80,3 mm, possuindo uma média de cobrimento de 54,7 mm, dessa forma, possui pontos que não atendem a norma NBR 6118:2014, devendo ter cobrimentos superiores a 45 mm em lajes, e acima de 50 mm em vigas e pilares.

Os pontos 03 e 05-B da Tabela 3 estão com o cobrimento inadequado. Conforme a leitura feita no ensaio citado, em 60% dos pontos, os cobrimentos estão de acordo com a NBR 6118:2014. A chaminé B possui cobrimentos que vão

de 24,1 a 52,9 mm, possuindo uma média de cobrimento de 44,3 mm, dessa forma, possui pontos que não atendem a norma NBR 6118:2014, devendo ter cobrimentos superiores a 45 mm em lajes, e acima de 50mm em vigas e pilares.

	Cobrimento médio (mm)		Cobrimento aferido (mm)
Ponto 01-B	50,5	52,0	52,2
Ponto 02-B	52,9	49,5	56,5
Ponto 03-B	41,1	43,7	42,4
Ponto 04-B	48,8	51,0	49,9
Ponto 05-B	29,6	24,1	26,9

Tabela 3 – Ensaio de detecção eletromagnética de armaduras.

Em ambas as chaminés, a maioria dos pontos estão com cobrimento acima de 45 mm nos pontos inspecionados, atendendo o cobrimento mínimo da norma.

Porém, ambas também possuem pontos com baixo cobrimento, conforme inspeção visual, caracterizando falhas no processo construtivo. Esses pontos com baixo cobrimento podem ser portas de entrada do avanço da carbonatação, onde o pH do concreto é reduzido, despассивando a armadura e dando início a corrosão. Lembrando que na época da construção, a versão da NBR 6118 vigente era de 1978.

Nota-se no gráfico abaixo (Figura 7), que a chaminé A possui pontos com maiores cobrimentos, em relação a chaminé B.

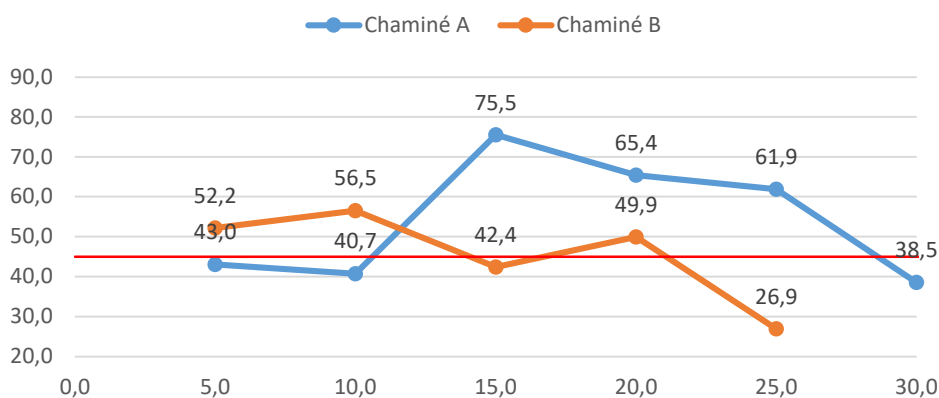


Figura 7 – Espessura média de cobrimento.

4.1.2. Ensaio de Alcalinidade do Concreto

O ensaio de alcalinidade nos proporciona saber a região que já sofreu carbonatação, e que devido à baixa do pH, acaba por expor as armaduras ao processo de corrosão. A Tabela 4 apresenta os resultados do ensaio de alcalinidade das chaminés A e B.

Resultados – Chaminé A		Resultados – Chaminé B	
Local	Profundidade	Local	Profundidade
<i>Ponto 01A</i>	30 mm	<i>Ponto 01B</i>	30 mm
<i>Ponto 02A</i>	27 mm	<i>Ponto 02B</i>	22,3 mm
<i>Ponto 04A</i>	16 mm	<i>Ponto 04B</i>	31,7 mm
		<i>Ponto 05B</i>	32,2 mm

Tabela 4 – Ensaio de alcalinidade do concreto.

Nas chaminés A e B, podemos ver que nos locais ensaiados, já temos a frente de carbonatação ocorrendo em ambas as estruturas. Com frentes de carbonatação que atingem a profundidade de 16 mm a 30 mm na chaminé A, e profundidades de 22,3 mm a 32,2 mm na chaminé B, conforme demonstrado no gráfico abaixo (Figura 8):

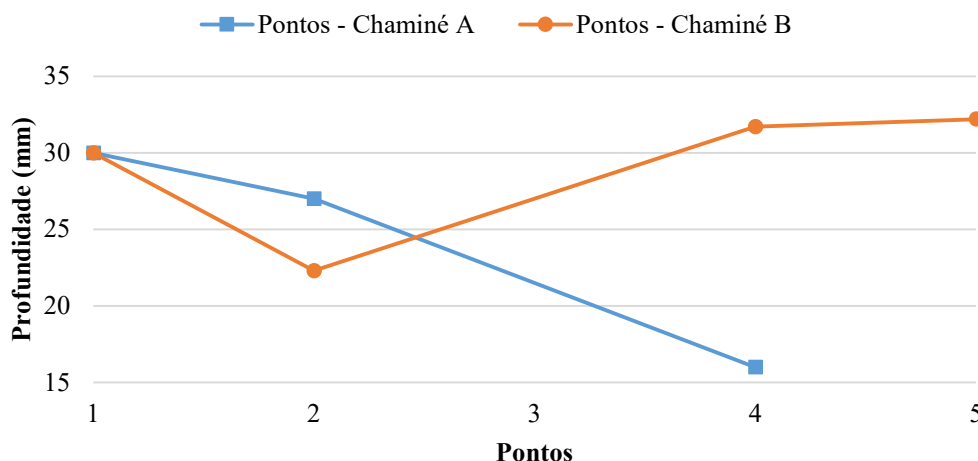


Figura 8 – Ensaio de alcalinidade.

No ensaio de alcalinidade, ambas as chaminés possuem frentes de carbonatação com profundidades acima de 20 mm.

Na chaminé A, houve o avanço da carbonatação de 30 mm, em 31 anos de construção, sendo aproximadamente 0,97 mm/ano. Como nesse mesmo ponto, a média de cobrimento foi de 42,8 mm, então pela projeção do avanço da carbonatação, a estrutura encontra-se protegida por mais 12 anos. Porém, no ponto 06-A, cuja média de cobrimento foi de 38,5 mm, a armadura está protegida por mais 8 anos. Dessa maneira, os pontos ensaiados na chaminé A, encontram-se com as armaduras passivadas.

Na chaminé B, visualizou-se que há carbonatação nos pontos ensaiados, com profundidades de 22,3 mm a 32,2 mm. No ponto 01-B, podemos ver a profundidade da carbonatação de 30 mm, em 18 anos de construção, obtendo um avanço de aproximadamente 1,66 mm/ano. Nesse mesmo ponto, a média de cobrimento foi de 51,3 mm, as armaduras estão passivadas, e a estrutura mantém-se protegida, pela projeção, por mais 12 anos. Já no ponto 05-B, o cobrimento médio foi de 26,9 mm, e o ensaio de alcalinidade nos apontou a frente de carbonatação instalada no local, com 32,2 mm, mantendo as armaduras despassivadas. Dessa maneira, a estrutura perde a sua capacidade de suportar cargas.

Ao analisar os resultados das chaminés A e B, foi visto que a carbonatação na chaminé A ainda não atingiu as armaduras, estando aparentemente íntegra, diferente da chaminé B, cuja carbonatação está avançando mais rapidamente com o passar dos anos, e já despassivou as armaduras, tendo o processo de corrosão instalado.

Segundo (SILVA 1995, *apud* LAPA, 2008), o avanço da carbonatação varia de 1 a 3 mm/ano. Esse processo pode ser mais acelerado para concretos mais porosos, e com menores resistências. Como foi constatado em projeto, a chaminé A possui uma resistência de 18 MPa, e a chaminé B é de 20 MPa.

Apesar de ser mais resistente, o concreto da chaminé B permite um avanço de 0,69 mm/ano mais rápido, da frente da carbonatação, devido a um provável traço inadequado do concreto e falhas na execução, permitindo a segregação do

concreto. Com o ingresso de agentes agressivos devido ao ambiente em que se encontra, seu processo de degradação aumenta, ocasionando o aumento da porosidade, e diminuição da resistência.

4.1.3. Ensaio de Ultrassonografia

No ensaio de ultrassonografia, podemos analisar a qualidade da estrutura, cujos defeitos não são visíveis a olho nu, de acordo com o tempo que o pulso ultrassônico demora para atravessar a seção do concreto.

Para análise dos resultados, apresenta-se a tabela abaixo (Tabela 5), onde pode-se constatar a velocidade do pulso ultrassônico nos pontos analisados:

PONTO	Ponto 01 -A			Ponto 02 - A			Ponto 04 - A		
	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med
Transmissão	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta
Distância (mm)	240	260	360	170	400	290	200	330	410
Medição 1 (μs)	98,2	114,0	104,0	73,2	165,3	114,6	78,0	144,8	224,2
Medição 2 (μs)	98,6	112,7	104,3	71,3	158,4	115,5	77,4	144,7	226,4
Medição 3 (μs)	98,2	112,5	104,1	71,2	158,0	114,2	76,9	144,5	225,0
Velocidade 2 (m/s)	2444	2281	3462	2322	2420	2531	2564	2279	1829
Velocidade 3 (m/s)	2434	2307	3452	2384	2525	2511	2584	2281	1811
Velocidade 1 (m/s)	2444	2311	3458	2388	2532	2539	2601	2284	1822
Velocidade média (m/s)	2441	2300	3457	2365	2492	2527	2583	2281	1821
Homogeneidade/ compacidade do concreto	Regular	Regular	Bom	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Ruim

PONTO	Ponto 05 - A			Ponto 06 - A		
	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med
Transmissão	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta
Distância (mm)	230	390	475	320	400	510
Medição 1 (μs)	99,9	181,3	233,0	138,4	163,2	243,8
Medição 2 (μs)	90,3	180,8	233,5	139,2	162,7	251,0
Medição 3 (μs)	95,3	179,3	233,9	139,8	146,0	250,0
Velocidade 2 (m/s)	2302	2151	2039	2312	2451	2092
Velocidade 3 (m/s)	2547	2157	2034	2299	2459	2032
Velocidade 1 (m/s)	2413	2175	2031	2289	2740	2040
Velocidade média (m/s)	2421	2161	2035	2300	2550	2055
Homogeneidade/ compacidade do concreto	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular

Tabela 5 – Ensaio de ultrassonografia - Chaminé A

Pode-se observar que o ponto 01-A, a velocidade média tem uma boa homogeneidade, indicando que o concreto foi bem vibrado, sem nichos de

concretagem, em relação a terceira medição no ponto 04-A, onde a velocidade foi abaixo do esperado, tendo uma homogeneidade ruim.

No ensaio de ultrassonografia, a chaminé A encontra-se em melhor estado, de modo geral, em relação a homogeneidade e compacidade do concreto, indicando que o concreto foi bem vibrado, sem nichos de concretagem no trecho ensaiado. Na chaminé B (Tabela 6), a leitura indica níveis regulares e ruins no quesito de homogeneidade, indicando altos índices de vazios, o que auxilia na degradação, em relação ao avanço da carbonatação na estrutura.

PONTO	Ponto 01 -B			Ponto 02 - B			Ponto 03 - B		
	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med
Transmissão	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta
Distância (mm)	310	210	290	290	230	430	295	190	435
Medição 1 (μ s)	102,0	86,6	158,6	94,3	75,8	133,4	181,4	80,4	288,9
Medição 2 (μ s)	113,3	87,2	144,3	92,6	75,7	133,6	179,7	68,9	289,1
Medição 3 (μ s)	103,6	87,1	154,0	91,6	76,0	133,3	179,8	68,1	291,7
Velocidade 2 (m/s)	3039	2425	1828	3075	3034	3223	1626	2363	1506
Velocidade 3 (m/s)	2736	2408	2010	3132	3038	3219	1642	2758	1505
Velocidade 1 (m/s)	2992	2411	1883	3166	3026	3226	1641	2790	1491
Velocidade média (m/s)	2923	2415	1907	3124	3033	3223	1636	2637	1501
Homogeneidade/ compacidade do concreto	Regular	Regular	Ruim	Bom	Bom	Bom	Ruim	Regular	Bom

PONTO	Ponto 04 - B			Ponto 05 - B		
	1° Med	2° Med	3° Med	1° Med	2° Med	3° Med
Transmissão	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta	Indireta
Distância (mm)	230	225	315	420	210	495
Medição 1 (μ s)	132,3	124,7	164,6	265,5	117,2	295,2
Medição 2 (μ s)	132,9	125,5	163,4	268,6	118,9	318,1
Medição 3 (μ s)	134,2	124,5	180,7	268,8	118,7	350,0
Velocidade 2 (m/s)	1738	1804	1914	1582	1792	1677
Velocidade 3 (m/s)	1731	1793	1928	1564	1766	1556
Velocidade 1 (m/s)	1714	1807	1743	1563	1769	1414
Velocidade média (m/s)	1728	1801	1862	1569	1776	1549
Homogeneidade/ compacidade do concreto	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim

Tabela 6 – Ensaio de ultrassonografia - Chaminé B

No gráfico abaixo (Figura 9), pode-se constatar que a chaminé A possui pontos uniformes, com leitura de 86% dos pontos classificados como “Regular”, enquanto que a chaminé B possui 60% dos pontos classificados como “Ruins”, demonstrando mais consistência na chaminé A. Desse modo pode-se dizer que a análise de ultrassom esclarece o motivo do ensaio anterior, onde lê-se que a

chaminé B possui um avanço mais rápido da frente da carbonatação, pois o seu concreto demonstra grande índice de vazios.

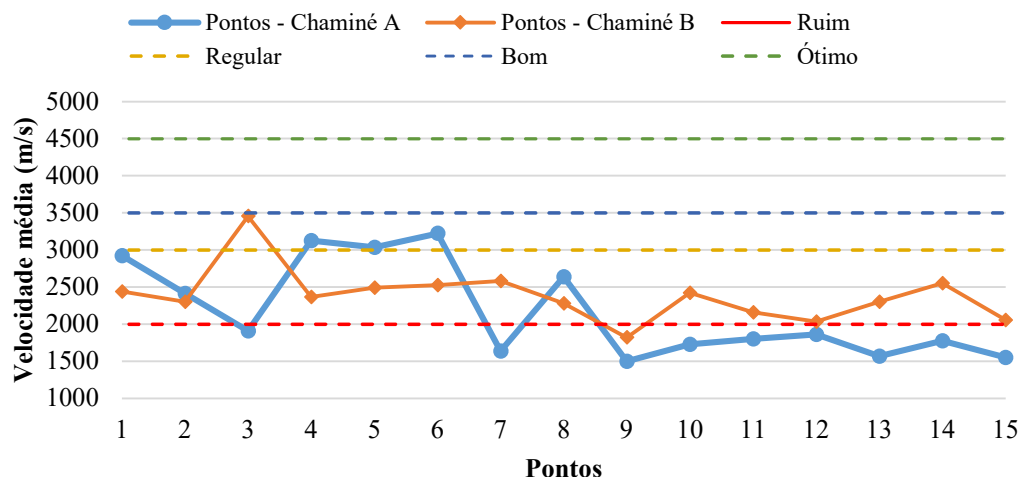


Figura 9 – Ensaio de ultrassonografia.

4.1.4. Extração de Testemunho e Ensaio de Resistência a Compressão

Ensaio destrutivo necessário (Tabela 7), para obtermos os resultados de resistência do concreto, a fim de avaliar a tensão máxima antes de sofrer ruptura.

	Chaminé A	Chaminé B
Ponto de extração	Ponto 01 - A	Ponto 01 - B
Ø1 mm	66,07	66,64
Ø2 mm	66,01	66,56
Altura 1 mm (retificada)	90,78	95,04
Altura 2 mm (retificada)	90,67	94,98
Altura 3 mm (retificada)	90,80	95,00
Ø médio	66,04	66,60
Altura média (retificada)	90,75	95,01

Tabela 7 - Extração de testemunho.

No ensaio de resistência a compressão (Tabela 8), podemos observar que na chaminé A, tivemos um resultado de 31,53 MPa enquanto que no projeto, sua resistência foi determinada como 18 MPa, Já na chaminé B, obtivemos um resultado de 28,31 MPa, porém, no projeto sua resistência determinada foi de 20 MPa.

	Ponto de extração	Chaminé A	Chaminé B
		Ponto 01 - A	Ponto 01 - B
Dimensões (mm)	Ø médio	66,04	66,60
	Altura média	90,75	95,01
	Relação h/d	1,37	1,43
Cargas	(Tnf)	10,43	9,47
	(Newton)	102.283,36	92.868,98
Área da seção do testemunho (mm²)		3423,61	3481,91
fci, ext. inicial (MPa)		29,88	26,67
Coeficientes ABNT NBR 7680-1	K1	-0,0555	-0,0487
	K2	0,1007	0,1001
	K3	0,05	0,05
	K4	-0,04	-0,04
fci, ext (Mpa)		31,53	28,31

Tabela 8 – Ensaio de resistência a compressão.

Apesar do bom resultado de resistência da chaminé A, ambas as chaminés estão atendendo aos projetos, em relação a resistência do concreto.

4.1.5. Esclerometria

O ensaio de esclerometria, é um ensaio não destrutivo, que nos permite avaliar a resistência do concreto, sem a necessidade de danos a estrutura.

Neste ensaio (Tabela 9), constatou-se nas duas chaminés, que há regiões em que o concreto apresenta homogeneidade e uniformidade.

A resistência superficial média de ambas as chaminés está bem próxima, sendo 40 MPa na chaminé A, e 39 MPa na chaminé B.

A atmosfera do ambiente da fábrica, contribui muito para a degradação da estrutura. Há uso de sulfatos, produtos à base de enxofre, cloro, produtos esses que já possuem uma ação corrosiva, e devido a emissão de gases, poeira, a alta temperatura, e a umidade do ar, esses gases se depositam na superfície das edificações próximas, propiciando uma atmosfera corrosiva e agressiva às armaduras.

Abaixo encontram-se as tabelas com os resultados dos ensaios de esclerometria (Tabela 9 e Tabela 10). Os valores destacados em cinza foram excluídos da amostragem por estarem fora do intervalo ($\pm 10\%$).

Pontos	01 - A	02 - A	03 - A	04 - A	05 - A	06 - A
1	58,2	55,0	43,0	52,0	56,0	32,0
2	68,0	66,0	46,0	53,5	64,0	43,5
3	65,0	64,0	46,0	50,0	51,5	43,5
4	55,5	57,5	45,5	44,5	46,5	43,0
5	67,5	58,5	44,0	45,0	46,0	46,5
6	53,0	66,0	38,0	47,0	54,0	48,5
7	66,0	61,0	37,5	46,5	44,0	44,5
8	65,0	52,0	42,5	51,5	45,0	53,0
9	47,5	59,5	47,0	50,5	49,0	53,0
10	60,5	57,0	39,5	46,5	48,0	47,5
11	63,0	54,5	41,5	52,0	47,0	38,0
12	59,0	49,0	46,0	42,0	47,0	45,5
13	53,0	63,0	44,0	54,0	43,5	44,5
14	65,0	56,0	42,5	47,5	46,5	46,5
15	68,5	54,5	44,0	54,5	46,0	48,5
16	63,0	53,0	48,5	43,5	43,5	47,0
A	0	0	0	0	0	0
1º média	61,1	57,9	43,5	48,8	48,6	45,3
+10%	67,0	63,5	47,5	53,5	53,5	49,5
-0,1	55,0	52,0	39,0	43,5	43,5	40,5
nº de impactos válidos	10,0	12,0	13,0	13,0	13,0	12,0
IE	62,0	56,8	44,0	48,5	46,4	45,8
Iee	62,0	56,8	44,0	48,5	46,4	45,8
Desvio padrão	3,38	3,15	2,06	3,15	2,16	1,87
Aplicando os fatores de correção, temos a resistência média de 40 MPa.						

Tabela 9 - Ensaio de esclerometria – Chaminé A

Após aplicar os fatores de correção, obtivemos uma resistência média de 40 MPa. Um bom resultado, comparando-se a resistência especificada em projeto, de 18 MPa. Porém, lembrando que a esclerometria é um ensaio de resistência superficial.

Pontos	01 - B	02 - B	03 - B	04 - B	05 - B
1	43,5	55,5	41,5	51,0	39,5
2	52,5	53,5	57,0	44,0	48,0
3	50,0	51,5	52,0	44,5	49,5
4	60,5	52,5	46,5	51,0	44,0
5	57,5	48,5	51,0	49,5	42,5
6	48,0	57,0	45,0	51,5	47,0
7	45,5	53,5	42,5	44,5	42,0
8	45,0	44,5	43,5	48,5	42,5
9	56,0	42,5	56,0	43,0	47,5
10	48,0	62,0	49,0	48,0	46,0

Pontos	01 - B	02 - B	03 - B	04 - B	05 - B
11	50,0	61,0	58,0	38,5	49,0
12	49,5	37,0	52,0	43,0	43,0
13	57,5	36,0	58,0	49,0	43,5
14	58,0	46,5	54,0	51,0	50,5
15	45,5	51,5	30,5	52,5	50,5
16	53,5	49,0	54,5	49,5	41,5
A	0	0	0	0	0
1º média	51,3	50,1	50,1	47,4	45,4
+10%	56,0	55,0	55,0	52,0	49,5
-0,1	46,0	45,0	45,0	42,5	40,5
nº de impactos válidos	8,0	8,0	7,0	14,0	13,0
IE	50,9	50,8	50,7	47,7	45,1
Iee	50,9	50,8	50,7	47,7	45,1
Desvio padrão	2,64	2,38	3,36	3,10	2,74
Aplicando os fatores de correção, temos a resistência média de 39 MPa.					

Tabela 10 - Ensaio de esclerometria – Chaminé B

Após aplicar os fatores de correção, obtivemos uma resistência média de 39 MPa. Um bom resultado, comparando-se a resistência especificada em projeto, de 20 MPa. Porém, lembrando que a esclerometria é um ensaio de resistência superficial.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo será apresentado as considerações finais desse trabalho, assim como as sugestões para novos estudos na área.

Baseado nos ensaios apresentados no capítulo anterior, considera-se que os objetivos propostos nesse trabalho foram atingidos, e constatou-se que a hipótese de que a chaminé B estaria em melhores condições foi validada.

Internamente, a chaminé A está com uma área degradada, na profundidade de 5 cm, que corresponde a 15% de sua área, enquanto por sua vez, a degradação na profundidade de 5 a 15 cm é correspondente a 5%.

Já a chaminé B está com uma área degradada, na profundidade de 5 cm, que corresponde a um total de 10% de sua área, já a degradação na profundidade de 5 a 15 cm é correspondente a 5% de sua área, assim como a chaminé A.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desse trabalho, foi comparar as condições atuais das chaminés A e B, situadas na fábrica de papel e celulose, na cidade de Limeira/SP.

Conforme ensaios realizados, análise dos resultados e as bibliografias verificadas, ao avaliar as condições das chaminés A e B, constatamos as seguintes manifestações patológicas:

- ✓ Corrosão de armaduras – Encontrada em ambas as chaminés, porém, em estado mais avançado na chaminé A.
- ✓ Carbonatação – Nos pontos ensaiados, registrou-se que há carbonatação presente em ambas as chaminés, porém na Chaminé B está avançando mais rapidamente com o passar dos anos, como constatou-se na análise de resultados.
- ✓ Falhas no cobrimento - Como visto nos ensaios, a Chaminé B possui uma linearidade em relação ao seu cobrimento, quando

comparada com a Chaminé A, que mostrou-se com um cobrimento irregular nos pontos ensaiados;

- ✓ Desplacamento das camadas de concreto – Manifestação presente em ambas as chaminés, tanto na parte interna, quanto na parte externa da estrutura;
- ✓ Eflorescências e lixiviação – Ambas as chaminés apresentam essa manifestação, porém, nota-se mais presente, na chaminé A;
- ✓ Concreto segregado, com exposição de agregados – Falha construtiva localizada em ambas as chaminés;
- ✓ Falhas de execução/projeto, pois as características construtivas da época da construção, não correspondem com as características solicitadas atualmente, para ambientes agressivos;
- ✓ Fissuras – Manifestação presente em ambas as chaminés;
- ✓ Infiltração devido as fissuras – Manifestação presente em ambas as chaminés.

Com base nos ensaios laboratoriais, inspeções visuais e bibliografia consultada, foi concluído que ambas as estruturas estão sofrendo desgastes, devido ao seu envelhecimento natural, cujo processo torna-se acelerado, devido ao ambiente agressivo a que se encontram, onde foi possível verificar:

- ✓ Falta de impermeabilização, permitindo assim o surgimento da lixiviação com a passagem constante da água, que ocasiona por sua vez a eflorescência. A falta de impermeabilização ocasiona o ingresso da água, que penetra o concreto, carregando consigo o carbonato de cálcio, baixando a alcalinidade da estrutura, deixando o ambiente adequado, para que se instale o processo de corrosão;
- ✓ Delaminação do concreto, provocado pela expansão da armadura, devido a corrosão em estado avançado;
- ✓ Corrosão de armadura, provocado pela baixa alcalinidade do concreto, permitindo a despassivação das armaduras, relacionado com a umidade, alta temperatura, e a ação de cloretos e sulfatos;

- ✓ Deficiência no cobrimento das armaduras, denotando falhas no processo construtivo, causando nichos de concretagem, e exposição das armaduras ao ambiente agressivo, permitindo o início da corrosão, provocando sua degradação;

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos, a fim de dar continuidade na análise comparativa em estruturas em fabricas de papel e celulose, fazemos as seguintes sugestões:

Análise comparativa de estruturas de concreto, com a mesma idade de construção, sendo uma em ambiente agressivo, e a outra em ambiente urbano, a fim de avaliar as intervenções e manifestações.

Análise de sistemas de proteção, a fim de manter a durabilidade das estruturas de concreto.

Ensaio do avanço da frente da carbonatação, comparando o avanço da manifestação em uma estrutura localizada em ambiente agressivo, e outra estrutura localizada em ambiente urbano.

Estudo sobre o impacto do mesoclima em relação ao avanço da carbonatação nas estruturas de concreto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANOVAS, M. F. 1988. *Patologia e terapia do concreto armado*. São Paulo : PINI, 1988.

CHIES, J. A. 2014. *Ensaio não destrutivo em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom*. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

GROSZEWICZ, Bernardo Zanin. 2014. *Patologias em pisos de concreto sob baixas temperaturas*. Curitiba : s.n., 2014.

HASPARYK, N. P. 2005. *Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado*. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HELENE, PAULO. 1997. *Introdução da Durabilidade no projeto das estruturas de concreto - Como projetar para a durabilidade*. São Paulo : s.n., 1997.

HELENE, Paulo R. L. 2013. Ambientes Agressivos. [Online] Julho de 2013. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/05/pini.pdf>.

—. **1993.** *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. São Paulo : Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, 1993.

—. **1986.** *Corrosão em armaduras para concreto armado*. São Paulo : Pini, 1986.

HELENE, Paulo R. L., ANDRADE, Jairo J. O. e MEDEIROS, Marcelo H. F. 2020. <https://www.phd.eng.br>. *PHD Engenharia*. [Online] 2020. [Citado em: 01 de Maio de 2020 de 2020.] <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>.

LAPA, J. S. 2008. *Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto*. Belo Horizonte : Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

Matos, Luís F. de e Mota, Ricardo G.S. 2008. *Levantamento de manifestações patológicas em estrutura de concreto da Indústria Klabin S/A em Telêmaco Borba-PR*. Curitiba/PR : s.n., 2008.

MEHTA, P. KUMAR e MONTEIRO, PAULO J.M. 2008. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo : Ibracon, 2008.

NBR 6118. 2014. *NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. s.l. : ABNT, 2014.

NEVES, A. Souza Filho Impermeabilizantes. *Blok*. [Online] [Citado em: 02 de maio de 2020 de 2020.] <https://www.blok.com.br/>.

NEVILLE, A. M. 1997. *Propriedades do concreto*. São Paulo : Pini, 1997.

POSSAN, EDNA. 2010. *Modelagem de Carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. Porto Alegre : Escola de Engenharia, Programa de pós Graduação em Engenharia Civil, 2010.

SILVA, V. M. 2007. *Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida*. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

THOMAZ, E. C.S. 2020. <http://www.ime.eb.mil.br/pt/>. *Instituto Militar de Engenharia*. [Online] 13 de Maio de 2020. <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/esclerometro01.pdf>.

TORRES, Ariela da Silva. 2011. *Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta análise*. Porto Alegre : Universidade Feredal do Rio Grande do Sul, 2011.