

**GISELLE CHRISTINE DA GRAÇA BAZZAN**

**ANÁLISE DO COBRIMENTO E CARBONATAÇÃO EM OBRAS DE ARTE  
ESPECIAIS NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para Conclusão do curso de pós graduação.

**SÃO PAULO  
2014**

**GISELLE CHRISTINE DA GRAÇA BAZZAN**

**ANÁLISE DO COBRIMENTO E CARBONATAÇÃO EM OBRAS DE ARTE  
ESPECIAIS NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para Conclusão do curso de pós graduação.

Área de concentração:  
Engenharia de Construção Civil

Orientador:  
Professor Dr. Paulo Helene

**SÃO PAULO  
2014**

Bazzan, Giselle Christine da Graça  
Análise do revestimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo / G. C. G. Bazzan – São Paulo, 2014.  
150p  
Monografia (Pós Graduação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
1. Revestimento. 2. Corrosão. 3. Carbonatação. 4. Durabilidade 5. Previsão da vida útil  
I. Análise do revestimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais Elaine e Dirceu e meu amado marido Leonardo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus

Aos meus pais, por serem um exemplo de vida e sempre me incentivarem em todos os momentos.

Ao meu marido Leonardo, pela paciência, compreensão e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Helene, a quem serei eternamente grata pelos ensinamentos, dedicação e disponibilidade e também ao Prof. Dr. Carlos Britez.

À Beltrame Engenharia S/S Ltda, em especial ao Eng.º Alexandre Beltrame, pelo apoio, incentivo, materiais cedidos e disponibilidade de horário.

Aos amigos Eng.º Marcos Mitre, Eng.ª Carolina Varandas e Eng.º Eloy Viegas, que muito me ajudaram.

Enfim, a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, ajudaram a tornar este sonho uma realidade.

**BAZZAN, G. C. G.** Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

## **RESUMO**

A vida útil é um período no qual o concreto deve desempenhar as funções para as quais foi projetado sem necessidade de intervenção durante um tempo pré estabelecido no projeto. Sendo assim, as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas de modo que conservem sua segurança, estabilidade e aparência aceitável, durante um período de tempo estabelecido, sob as condições ambientais previstas e respeitadas as condições de manutenção preventivas especificadas no projeto. A corrosão de armaduras é o mecanismo de deterioração das estruturas de concreto de maior incidência. O objetivo deste trabalho é discutir os fatores e mecanismos que determinam a corrosão e carbonatação, investigando assim o processo de corrosão induzida pela carbonatação. Neste trabalho foram apresentados conceitos teóricos, as espessuras de cobrimento e de carbonatação obtidos em inspeções especiais em Obras de Arte Especiais de idades variadas, e o cálculo do tempo de vida residual do concreto de cada elemento estrutural ensaiado.

Palavras chave: Carbonatação, cobrimento e corrosão.

**BAZZAN, G. C. G.** Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

## **ABSTRACT**

The service life is a period in which the concrete has to perform the functions for which it was designed without the need of intervention during projected period. Thus, the concrete structures must be designed, constructed and used in a manner that they maintain their, stability and acceptable appearance for a set period of time, under the expected environmental conditions and compliance with the conditions of preventive maintenance specified in the project. The reinforcement corrosion is the most common mechanism of deterioration of concrete structures. The objective of this work is to discuss the factors and mechanisms that determine the corrosion and carbonation, investigating the process of corrosion induced by carbonation. This essay presents theoretical concepts, the calculation of the residual service life of each structural concrete element tested, the concrete covers and carbonation depths obtained in special inspections in the bridges of different ages.

Keywords: Carbonation, coatings and corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Fluxograma das etapas de uma inspeção preliminar e detalhada/especial (Helene, 2007 apud Tutikian e Pacheco, 2013).....	25
<b>Figura 2.1:</b> Representação esquemática do processo de carbonatação (Casculo, 1997).....	29
<b>Figura 2.2:</b> Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armadura (Helene, 1993).....	31
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama de equilíbrio termodinâmico, do metal ferro em meio aquoso a 25°C (Pourbaix, 1974 apud Casculo, 1997).....	32
<b>Figura 2.4:</b> Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação (Tula, 2000).....	33
<b>Figura 2.5:</b> Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto saturado com água (Casculo, 1997).....	36
<b>Figura 2.6:</b> Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto, com poros totalmente secos (Casculo, 1997).....	36
<b>Figura 2.7:</b> Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto, com poros parcialmente preenchidos com água (concreto com U.R. normal do ambiente (Casculo, 1997).....	37
<b>Figura 2.8:</b> Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (Verbeck, 1950, apud Figueiredo, Andrade e Helene, 1993).....	37
<b>Figura 2.9:</b> Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação (Vénuat, 1977 apud Figueiredo, Helene e Andrade, 1993).....	39
<b>Figura 4.1:</b> Ponto de viragem da fenolftaleína (Castro, 2003).....	47
<b>Figura 4.2:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....	49
<b>Figura 4.3:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2009).....	51
<b>Figura 4.4:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longarina VL1 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,25m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....	51
<b>Figura 4.5:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos	

<i>tempos. Ponto 2 – Viga longarina VL2 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,40m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>52</i>
<b>Figura 4.6:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Viga longarina VL3 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,45m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>52</i>
<b>Figura 4.7:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga travessa TR1 – face RB a 2,95m do muro de ala AL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>53</i>
<b>Figura 4.8:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Tubulão T4 – face RPM a 1,00m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>53</i>
<b>Figura 4.9:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Viga longarina VL7 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,85m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>54</i>
<b>Figura 4.10:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 7 – Viga longarina VL6 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,20m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>54</i>
<b>Figura 4.11:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 8 – Viga longarina VL5 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,25m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....</i>	<i>55</i>
<b>Figura 4.12:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2013).....</i>	<i>56</i>
<b>Figura 4.13:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga longarina VL1 - face Capital (acervo Beltrame Engenharia, 2013). .....</i>	<i>56</i>
<b>Figura 4.14:</b> <i>SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do</i>	

tempo. Ponto 2 – Viga travessa TR1 - face RB (acervo Beltrame Engenharia, 2013). .	57
<b>Figura 4.15:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P1 do apoio AP2 - face Capital (acervo Beltrame Engenharia, 2013).	57
<b>Figura 4.16:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Pilar P6 do apoio AP3 - face Interior (acervo Beltrame Engenharia, 2013).	58
<b>Figura 4.17:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 5 – Viga travessa TR2 - face RPM (acervo Beltrame Engenharia, 2013).	58
<b>Figura 4.18:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB - RPM): Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009).	59
<b>Figura 4.19:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2009).	61
<b>Figura 4.20:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).	61
<b>Figura 4.21:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Alma da seção celular VL2, face Interior a 1,55m do apoio 5 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).	62
<b>Figura 4.22:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da longarina VL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).	62
<b>Figura 4.23:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).	63

<b>Figura 4.24:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,55m do apoio 1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....	63
<b>Figura 4.25:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Alma da seção celular VL2 – face Interior – a 1,20m do apoio 1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....	64
<b>Figura 4.26:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009).....	65
<b>Figura 4.27:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2014).....	66
<b>Figura 4.28:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Borda de laje, vão 1 - face Leste a 0,40m da viga travessa TR1 (acervo Beltrame Engenharia, 2014).....	66
<b>Figura 4.29:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014). ....	67
<b>Figura 4.30:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Pilar P2 face Norte a 0,90m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2014). ....	67
<b>Figura 4.31:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014). ....	68
<b>Figura 4.32:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P3 - face Norte a 0,90m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2014). ....	68
<b>Figura 4.33:</b> Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014). ....	69
<b>Figura 4.34:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Borda de	

<i>laje, vão 3 - face Leste a 0,10m da viga travessa TR4 (acervo Beltrame Engenharia, 2014).</i>	69
<b>Figura 4.35:</b> <i>SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014).</i>	70
<b>Figura 4.36:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	71
<b>Figura 4.37:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Croqui de posicionamento do ensaio 201 (elaboração própria, 2012).</i>	72
<b>Figura 4.38:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	72
<b>Figura 4.39:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	73
<b>Figura 4.40:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR2 - face Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	73
<b>Figura 4.41:</b> <i>SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL6 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	74
<b>Figura 4.42:</b> <i>SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2013).</i>	75
<b>Figura 4.43:</b> <i>SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2013).</i>	76
<b>Figura 4.44:</b> <i>SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2013).</i>	76
<b>Figura 4.45:</b> <i>SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).</i>	77
<b>Figura 4.46:</b> <i>SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR3 - face Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).</i>	77

<b>Figura 4.47:</b>	SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL5 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2013).....	78
<b>Figura 4.48:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2013).....	79
<b>Figura 4.49:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Croqui de posicionamento do ensaio 2013 (elaboração própria, 2013).....	80
<b>Figura 4.50:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).....	80
<b>Figura 4.51:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longarina VL5 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2013).....	81
<b>Figura 4.52:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P2 do apoio AP2 - face Oeste. Notar ponto com região carbonatada (acervo Beltrame Engenharia, 2013).....	81
<b>Figura 4.53:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2013). ....	82
<b>Figura 4.54:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2012).....	83
<b>Figura 4.55:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2012).....	84
<b>Figura 4.56:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).....	84
<b>Figura 4.57:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2012). ....	85
<b>Figura 4.58:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR2 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).....	85

<b>Figura 4.59:</b>	<i>SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL7 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2012).</i>	86
<b>Figura 4.60:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2007).</i>	87
<b>Figura 4.61:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Croqui de posicionamento do ensaio 2007 (elaboração própria, 2007).</i>	88
<b>Figura 4.62:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga Longarina VL8, face Sul a 1,75m da cortina do encontro Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2007).</i>	88
<b>Figura 4.63:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Viga Travessa do encontro Oeste, face Leste a 2,20m da face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2007).</i>	89
<b>Figura 4.64:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Viga Longarina VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2007).</i>	89
<b>Figura 4.65:</b>	<i>SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga Travessa do encontro Leste, face Oeste a 2,40m da face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2007).</i>	90
<b>Figura 4.66:</b>	<i>SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2011).</i>	91
<b>Figura 4.67:</b>	<i>SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Croqui de posicionamento do ensaio 2011 (elaboração própria, 2011).</i>	92
<b>Figura 4.68:</b>	<i>SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longarina VL1, face Norte, a 1,60m do encontro Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2011).</i>	92
<b>Figura 4.69:</b>	<i>SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4</i>	

– Viga longarina VL4, face Sul, a 0,95m do apoio AP3 (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	93
<b>Figura 4.70:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP3 (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	93
<b>Figura 4.71:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Apoio AP2, face Sul a 0,85m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	94
<b>Figura 4.72:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Apoio AP4A, face Sul a 0,70m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	94
<b>Figura 4.73:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Apoio AP2A, face Norte a 0,75m do solo. (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	95
<b>Figura 4.74:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP2A. (acervo Beltrame Engenharia, 2011).	95
<b>Figura 4.75:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2010).	96
<b>Figura 4.76:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Croqui de posicionamento do ensaio 2010 (elaboração própria, 2010).	97
<b>Figura 4.77:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longarina VL1 – face Norte a 0,90m da transversina VT14 (acervo Beltrame Engenharia, 2010).	98
<b>Figura 4.78:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Pilar P3 – face Leste a 0,95m de altura do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2010).	98
<b>Figura 4.79:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos	

tempos. Ponto 3 – Pilar P2 – face Leste a 1,00m de altura do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2010).....	99
<b>Figura 4.80:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga longarina VL2 – face Sul a 0,85m da transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2010).....	99
<b>Figura 5.1:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	124
<b>Figura 5.2:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	124
<b>Figura 5.3:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	126
<b>Figura 5.4:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	126
<b>Figura 5.5:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	128
<b>Figura 5.6:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	128
<b>Figura 5.7:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	130
<b>Figura 5.8:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	130
<b>Figura 5.9:</b> SP SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	132

<b>Figura 5.10:</b>	SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	132
<b>Figura 5.11:</b>	SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	134
<b>Figura 5.12:</b>	SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	134
<b>Figura 5.13:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	136
<b>Figura 5.14:</b>	SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	136
<b>Figura 5.15:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	138
<b>Figura 5.16:</b>	SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	138
<b>Figura 5.17:</b>	SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	140
<b>Figura 5.18:</b>	SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	140
<b>Figura 5.19:</b>	SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).....	142
<b>Figura 5.20:</b>	SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).....	142

**Figura 5.21:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NB1:1960 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014). ..... 144

**Figura 5.22:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014). ..... 144

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (Kazmierczak, 1995 apud Figueiredo, 2005).	34
<b>Tabela 2.2:</b> Classificação da agressividade ambiental (adaptado da NBR 6118:2014).	35
<b>Tabela 2.3:</b> Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras (Helene, 1995 apud Figueiredo, 2005).	35
<b>Tabela 2.4:</b> Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ (ABNT NBR 6118:2014).	41
<b>Tabela 4.1:</b> Obras estudadas (elaboração própria, 2014).	48
<b>Tabela 4.2:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Ensaio de carbonatação 2009 (elaboração própria, 2009).	50
<b>Tabela 4.3:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).	55
<b>Tabela 4.4:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio de carbonatação 2009 (elaboração própria, 2009).	60
<b>Tabela 4.5:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio de carbonatação 2014 (elaboração própria, 2014).	65
<b>Tabela 4.6:</b> SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio de carbonatação 2012 (elaboração própria, 2012).	71
<b>Tabela 4.7:</b> SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).	75
<b>Tabela 4.8:</b> SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).	79
<b>Tabela 4.9:</b> SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio de carbonatação 2012 (elaboração própria, 2012).	83
<b>Tabela 4.10:</b> SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio de carbonatação 2007 (elaboração própria, 2007).	87
<b>Tabela 4.11:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio de carbonatação 2011 (elaboração própria, 2011).	91
<b>Tabela 4.12:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio de carbonatação 2010 (elaboração própria, 2010).	97

<b>Tabela 5.1:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	105
<b>Tabela 5.2:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	106
<b>Tabela 5.3:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	107
<b>Tabela 5.4:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	108
<b>Tabela 5.5:</b> SP-270 – km 088+800 – Pista Leste/Oeste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	109
<b>Tabela 5.6:</b> SP-270 – km 098+350 – Marginal Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	110
<b>Tabela 5.7:</b> SP-270 – km 098+350 – Pista Oeste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	111
<b>Tabela 5.8:</b> SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	112
<b>Tabela 5.9:</b> SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	113
<b>Tabela 5.10:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	114
<b>Tabela 5.11:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a NB1:1960 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).	115

<b>Tabela 5.12:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	123
<b>Tabela 5.13:</b> SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	125
<b>Tabela 5.14:</b> SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	127
<b>Tabela 5.15:</b> SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	129
<b>Tabela 5.16:</b> SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	131
<b>Tabela 5.17:</b> SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	133
<b>Tabela 5.18:</b> SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	135
<b>Tabela 5.19:</b> SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	137
<b>Tabela 5.20:</b> SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	139
<b>Tabela 5.21:</b> SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	141
<b>Tabela 5.22:</b> SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).	143

## SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1.	Considerações iniciais.....	22
1.2.	Tipos de inspeção de pontes e viadutos de concreto.....	23
1.3.	Importância das inspeções.....	26
1.4.	Objetivos .....	27
<b>2.</b>	<b>CORROSÃO DA ARMADURA E CARBONATAÇÃO .....</b>	<b>28</b>
2.1.	Definições e Terminologia.....	28
2.2.	Passivação das armaduras.....	31
2.3.	Despassivação das armaduras / Carbonatação .....	32
2.4.	Fatores que influenciam na velocidade de carbonatação .....	34
<b>3.</b>	<b>VIDA ÚTIL X CARBONATAÇÃO.....</b>	<b>42</b>
3.1.	Modelo clássico de previsão da carbonatação.....	42
3.2.	Importância da qualidade do concreto e da espessura de cobrimento.....	43
3.3.	Normalização .....	44
<b>4.</b>	<b>PLANO DE INSPEÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>46</b>
4.1.	Método usado para determinação da profundidade de carbonatação.....	46
4.2.	Obras estudadas .....	48
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>100</b>
5.1.	Cobrimentos .....	100
5.2.	Profundidade de carbonatação .....	116
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>145</b>
6.1.	Conclusão propriamente dita .....	145
6.2.	Sugestões para continuidade da pesquisa .....	146
6.3.	Transferência de conhecimento à sociedade .....	146
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>147</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Introduzindo o tema dessa pesquisa, apresenta-se a seguir breves conceituações sobre o processo de carbonatação nas estruturas de concreto, bem como sobre a importância das inspeções em obras de arte especiais (OAE).

### **1.1. Considerações iniciais**

As pontes e viadutos de concreto são basicamente estruturas viárias de transposição de obstáculos naturais ou artificiais que mantêm o fluxo contínuo de cargas e pessoas com menor trajeto.

Estima-se um patrimônio de 30 a 50 mil pontes no Brasil e não há conhecimento profundo do estado geral dessas obras, segundo Helene (1998).

As Obras de Arte Especiais perdem ao longo do tempo sua capacidade de atender aos requisitos de utilização, ou seja, segurança e adequação funcional, resistência e estabilidade estrutural e, por fim, durabilidade, por estarem sujeitas a processos de deterioração devido à exposição direta aos agentes agressivos do ambiente e às solicitações estruturais de distintas naturezas e magnitudes.

Dentre os vários tipos de deterioração está a corrosão das armaduras que é o de maior incidência e de grande prejuízo econômico. Segundo Carmona e Marega (1988), Dal Molin (1988) e Nince (1996) em 30% das edificações foram encontrados problemas de corrosão de armaduras.

No interior do concreto as armaduras estão protegidas da corrosão por estarem em um pH alcalino, em torno de 13 (Carmona, 2005). Porém essa condição de passivação pode ser modificada pela ação de agentes externos como a presença de íons cloreto e gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

Carbonatação é o nome que recebem as reações químicas entre o CO<sub>2</sub> e os componentes do cimento hidratado, que reduzem o pH do concreto, possibilitando o processo de corrosão quando atinge a armadura.

## 1.2. Tipos de inspeção de pontes e viadutos de concreto

Em função do uso contínuo e da falta de programas preventivos de manutenção em grande parte dos casos, as pontes e viadutos estão sujeitas à ação de diversas manifestações patológicas.

No sentido de preservar a funcionalidade da estrutura e aumentar a vida útil, são necessários cuidados especiais que refletem na existência de uma proposta de manutenção eficiente, que inclua os procedimentos necessários à conservação do bom estado das pontes e viadutos.

Os processos de inspeção constituem uma etapa indispensável da manutenção de uma estrutura e devem levar em consideração as particularidades da construção, sendo assim, o conhecimento e a descrição das diferentes regiões da ponte tornam-se fundamentais à medida que há diferentes incidências de problemas patológicos ao longo de uma estrutura.

Segundo a ABNT NBR 9452:2012 existem 3 tipos de inspeção: cadastral, rotineira e especial.

Para o DNIT (Norma DNIT 010/2004 – PRO) a inspeção é uma atividade técnica especializada que abrange a coleta de elementos, de projeto e de construção, o exame minucioso da ponte, a elaboração de relatórios, a avaliação do estado da obra e as recomendações, que podem ser de nova vistoria, de obras de manutenção, de obras de recuperação, de reforço ou de reabilitação. E distingue as inspeções em: inspeção cadastral, Inspeção rotineira, inspeção especial, inspeção extraordinária e inspeção intermediária.

A seguir é apresentada uma breve definição dos tipos de inspeção ou vistoria de obras de arte especiais:

### ***Inspeção Cadastral***

A Inspeção Cadastral é o primeiro levantamento realizado em uma ponte ou viaduto, sua abordagem é geral e pouco minuciosa. O objetivo é coletar as características geométricas, as condições de implantação e o estado funcional, estrutural e de durabilidade da Obra de Arte Especial (OAE).

Como se trata de uma inspeção não muito aprofundada, pode-se apontar a necessidade de uma inspeção mais detalhada ou a necessidade de intervenções emergenciais.

Uma nova Inspeção Cadastral deve ser realizada sempre que houver relevantes mudanças na configuração estrutural da OAE, como por exemplo: reforços para mudança de classe, alargamento, bloqueio de articulações etc.

### ***Inspeção Rotineira***

As Inspeções Rotineiras são periódicas e devem apontar o aparecimento de novas anomalias ou a evolução das anomalias já existentes e mencionadas na inspeção anterior. Esta inspeção permite também a alteração da classificação do estado da obra e aponta a necessidade de uma inspeção mais detalhada ou a necessidade de intervenções emergenciais.

### ***Inspeção Extraordinária***

A Inspeção Extraordinária tem a finalidade de avaliar um dano estrutural excepcional, portanto, não se trata de uma inspeção programada.

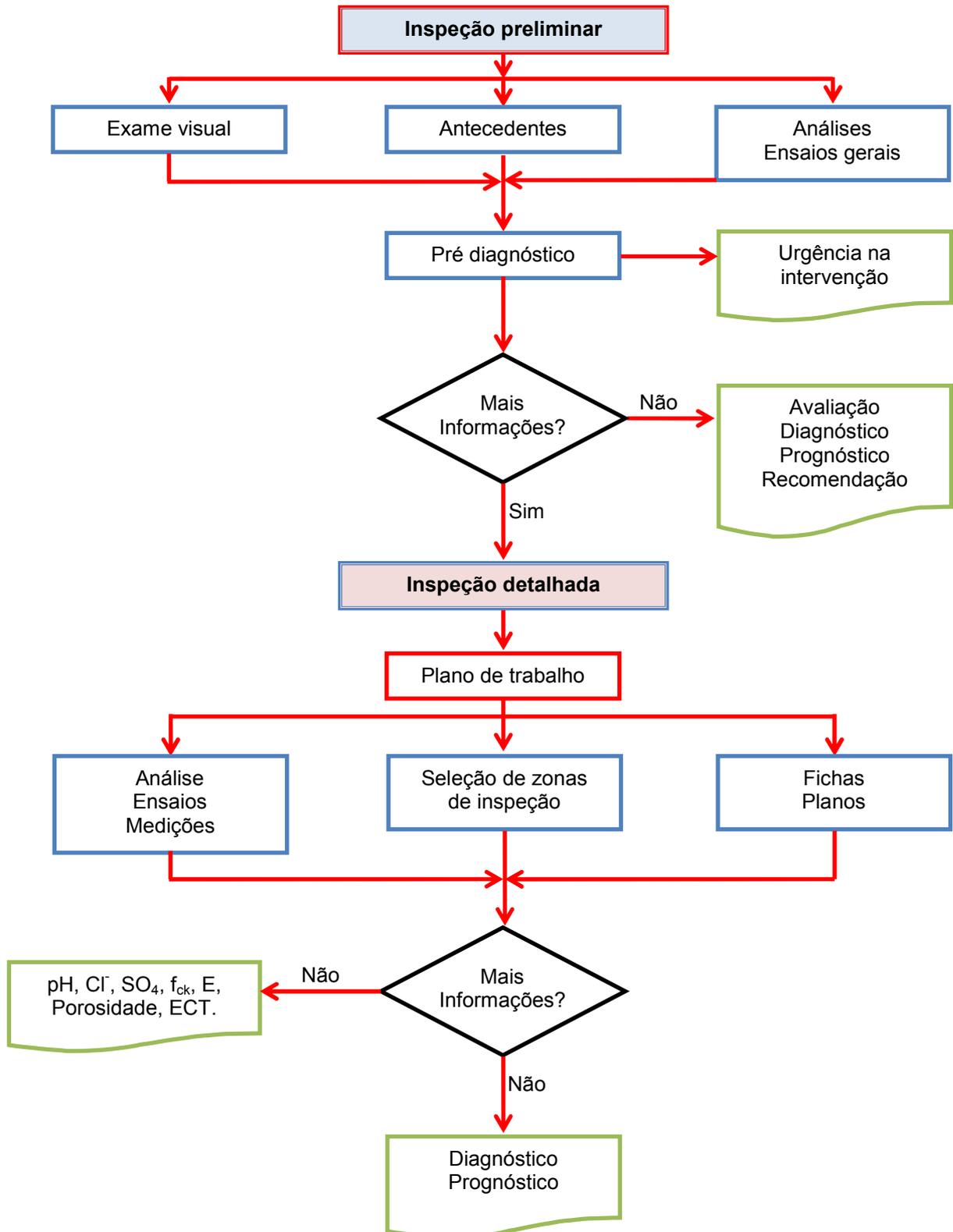
### ***Inspeção Especial***

As Inspeções Especiais são inspeções visuais detalhadas, realizadas em intervalos não superiores a cinco anos, e geralmente com a realização de ensaios. São realizadas também quando as Inspeções Cadastral ou Rotineira apontam problemas graves ou críticos na estrutura da obra e em ocasiões especiais, como antes e durante a passagem de cargas excepcionais.

### ***Inspeção Intermediária***

A Inspeção Intermediária é recomendada para monitorar uma deficiência suspeitada ou já detectada, tal como um pequeno recalque de fundação, uma erosão incipiente, um encontro parcialmente descalçado, o estado de um determinado elemento estrutural etc.

A figura 1.1 apresenta um fluxograma com a sequência básica de inspeção de estruturas:



**Figura 1.1:** Fluxograma das etapas de uma inspeção preliminar e detalhada/especial (Helene, 2007 apud Tutikian e Pacheco, 2013).

### **1.3. Importância das inspeções**

Como se sabe, as pontes e viadutos estão expostos a diversos mecanismos de deterioração e, por este motivo, cuidados especiais devem ser tomados para a preservação da funcionalidade da estrutura e do aumento da vida útil.

A contratação de profissionais capacitados para a execução das inspeções das estruturas permite que se faça um serviço adequado, possibilitando identificar a real situação da estrutura que irá refletir numa proposta de manutenção eficiente, conforme a ABNT NBR 5674:2012, manutenção significa “conjunto de atividades a serem realizadas para conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e de suas partes constituintes para atender às necessidades e segurança dos usuários”, incluindo um diagnóstico concreto e a definição de uma metodologia de reabilitação necessária ao bom estado da ponte. Porém, muitas vezes o processo de manutenção é inadequado, insuficiente ou até mesmo inexistente, não sendo possível evitar a ocorrência de problemas patológicos. Quando isso acontece é necessária uma recuperação emergencial para que a estrutura não seja inutilizada.

Para se manter as condições de segurança e estabilidade necessárias em obras de artes especiais (OAE's), são indispensáveis as inspeções periódicas, pois elas caracterizam o estado estrutural, funcional e de durabilidade das pontes e viadutos, visando identificar processos de deterioração existentes e potenciais, devido à exposição direta aos agentes agressivos do ambiente e às solicitações estruturais de naturezas e magnitude distintas, possibilitando assim a avaliação contínua de suas condições, um acompanhamento do comportamento durante a vida útil destes e, ainda, prevenir e corrigir problemas em tempo hábil e de forma econômica.

Como exposto, a forma mais econômica de prolongar a vida útil de uma estrutura é submetê-la a uma sistemática de manutenção, que pode ser de natureza preventiva ou corretiva.

Assim, é evidenciada a importância dos procedimentos de inspeção na manutenção do bom estado das obras de arte especiais, e essa manutenção representa importância econômica e papel estratégico, devido aos altos custos de investimentos envolvidos na implantação ou recuperação destas estruturas.

#### **1.4. Objetivos**

Este trabalho visa contribuir com o conhecimento sobre a variabilidade da carbonatação e dos cobrimentos de armaduras em Obras de Arte Especiais de concreto no Estado de São Paulo, incluindo a descrição das estruturas estudadas, o plano de amostragem e a metodologia empregada nos dados coletados.

Para isso foram obtidas as espessuras de cobertura e de carbonatação, através de prospecção e ensaio de carbonatação, respectivamente, em 10 (dez) obras de arte especiais no estado de São Paulo.

A obtenção de parâmetros estatísticos da carbonatação e também do cobrimento de armadura permitem uma melhor análise do problema de deterioração de pontes de concreto, entendendo assim o processo de corrosão, quando e como fazer os reparos necessários otimizando custos e minimizando riscos.

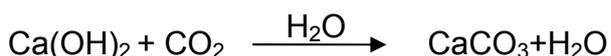
## 2. CORROSÃO DA ARMADURA E CARBONATAÇÃO

O processo de corrosão em pontes e viadutos depende do tipo e da composição da estrutura. No presente caso, considerando o estudo de pontes e viadutos de concreto armado e protendido cabe destacar que, estas Obras de Artes Especiais estão mais sujeitas à corrosão por ação de cloretos e também por carbonatação, sendo a última o foco deste trabalho.

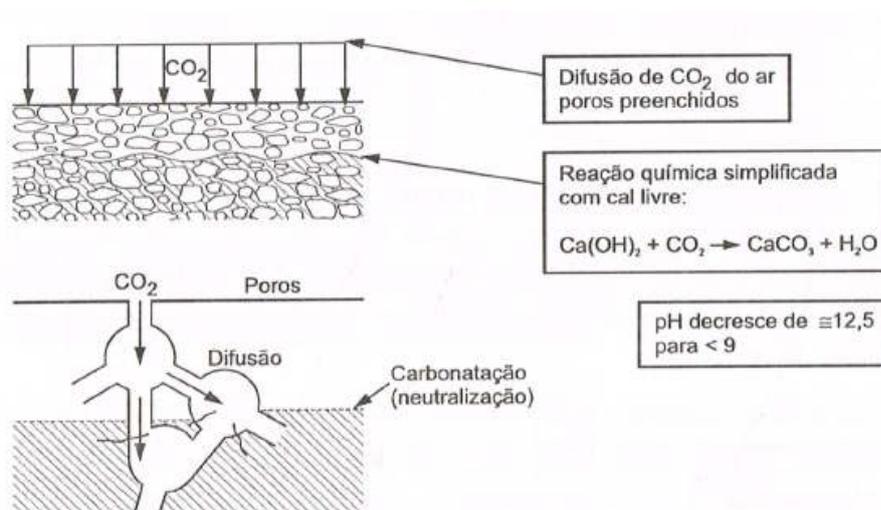
### 2.1. Definições e Terminologia

#### *Carbonatação*

A carbonatação consiste na redução da alcalinidade do concreto, em função da reação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) com compostos do meio, produzindo principalmente sais de cálcio. A alta alcalinidade do concreto é obtida principalmente as custas da presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado das reações de hidratação do cimento. Segundo Cascudo (1997), essa alcalinidade pode ser reduzida com o passar do tempo essencialmente pela ação do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) do ar, além de outros gases ácidos tais como dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). A reação básica é a seguinte:



A carbonatação acontece gradualmente, a uma velocidade lenta e atenuando-se com o tempo. A figura 2.1 mostra um esquema simplificado do processo de carbonatação.



**Figura 2.1:** Representação esquemática do processo de carbonatação (Cascudo, 1997).

Esse processo se mostra altamente prejudicial às estruturas de concreto, pois expõe as armaduras à corrosão.

### **Corrosão das armaduras**

A corrosão pode ser definida como um processo espontâneo de deterioração de um material, na maioria das vezes metálico, por ação química ou físico-química do meio, podendo estar associada a esforços mecânicos.

Uma das principais causas de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras. De acordo com Helene (1986), a corrosão é um ataque de natureza preponderantemente eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, quando é formada uma película de eletrólito sobre a superfície do aço, causada pela presença de umidade no concreto, com exceção dos casos em que é submetida à ação de alta temperatura ( $> 80\text{ }^\circ\text{C}$ ) ou baixa umidade relativa (U.R.  $< 50\%$ ). Para Neville (1997), para que ocorra a corrosão, a umidade relativa ótima se dá entre 70% e 80%. Este fenômeno provoca a ferrugem, que é a formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos avermelhados, pulverulentos e porosos. O volume do aço original é menor do que o volume originados dos produtos de corrosão, o que produz tensões internas que podem superar a resistência à tração do concreto, que causam lascamentos no cobrimento e fissuras, além de expor a armadura.

A corrosão de armaduras em concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, na qual o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica mais alta que a dos eletrólitos típicos, segundo Cascudo (1997).

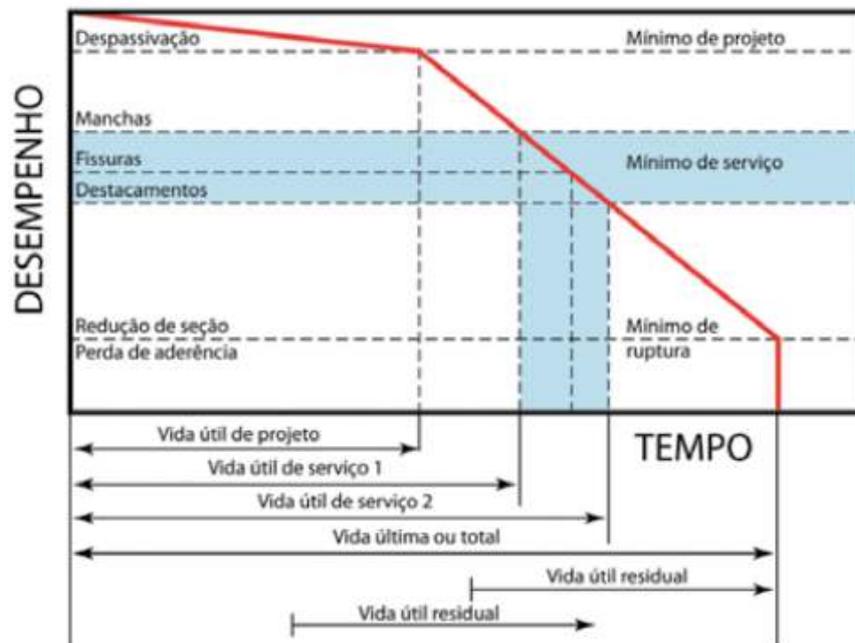
### ***Durabilidade***

Neville (1997) aponta que a durabilidade das estruturas em concreto armado está intimamente ligada às condições de exposição nas quais estão submetidas. Ainda de acordo com o autor, os fatores que levam o concreto armado a se deteriorar – destituindo, dessa forma, seu conceito de “eterno” – ocorrem por causas externas ou internas.

Dentre os principais aspectos externos que podem influenciar na forma de interação com a microestrutura do concreto armado, devem-se destacar a umidade relativa, a periodicidade das chuvas, a orientação dos ventos, a temperatura e as substâncias que estão presentes nesse meio. Essas substâncias, que podem ser agressivas tanto para a armadura quanto para o concreto, penetram neste através da rede de poros existente em sua microestrutura. Destaca-se como substâncias agressivas a água, sendo ela pura ou contendo íons dissolvidos, o oxigênio e o dióxido de carbono. As forças motrizes dessas substâncias pelo concreto podem ser originadas por diferença de concentração, de pressão, de temperatura, de densidade, de potencial elétrico e por sucção capilar (Neponceno, 2005).

### ***Vida útil***

A vida útil é um período no qual o concreto deve desempenhar as funções para as quais foi projetado sem necessidade de intervenção durante um tempo pré estabelecido no projeto. Sendo assim, as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas de modo que conservem sua segurança, estabilidade e aparência aceitável, durante um período de tempo estabelecido sob as condições ambientais previstas e respeitadas as condições de manutenção preventivas especificadas no projeto. Tomando como referência a corrosão das armaduras, vida útil pode ser esquematizada conforme a figura 2.2 segundo Helene (1993).



**Figura 2.2:** Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armadura (Helene, 1993).

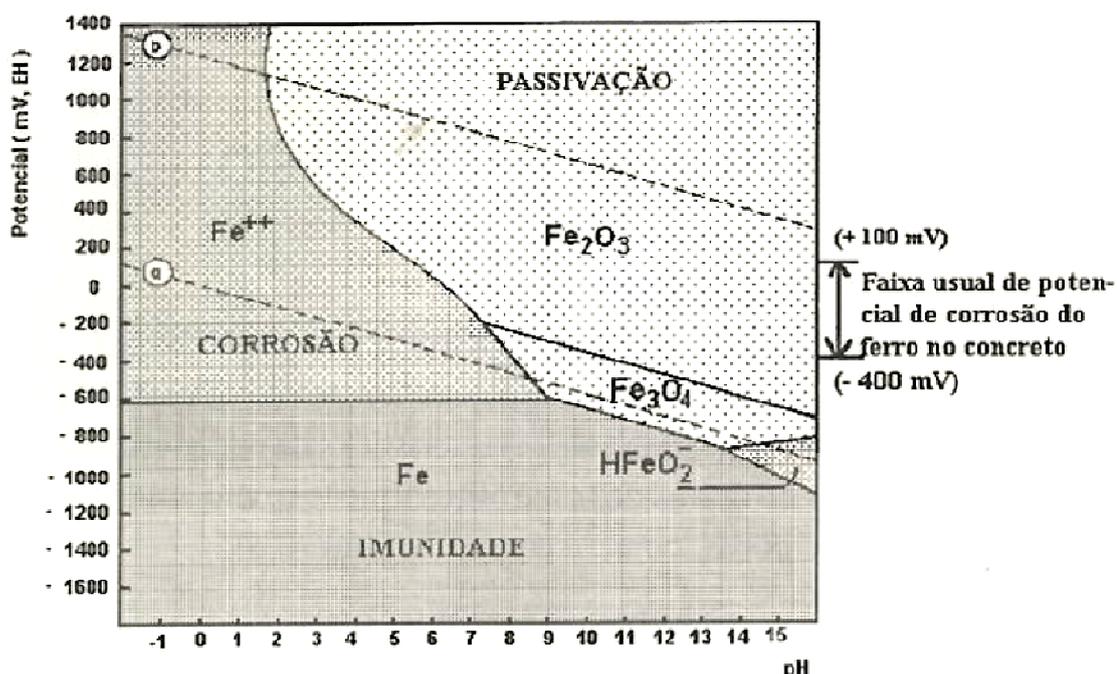
## 2.2. Passivação das armaduras

O concreto protege o aço de maneira física, pois separa o aço do contato direto com o meio externo e de maneira química, devido ao meio altamente alcalino que forma uma capa ou película protetora de caráter passivo que envolve a armadura.

O elevado pH da solução dos poros do concreto se deve principalmente aos hidróxidos de Sódio (NaOH) e de potássio (KOH), conferindo pHs da ordem de 13 a 14 à fase líquida do concreto (Longuet *et al.*, 1973; Andrade; Page, 1986 *apud* Figueiredo e Meira, 2013).

A película passivadora protetora do aço trata-se de uma fina camada de óxidos, transparente e aderente ao aço, que é gerada a partir de uma reação eletroquímica.

Na figura 2.3 apresenta-se o diagrama de equilíbrio termodinâmico proposto por Pourbaix (1974) para o ferro em meio aquoso, onde se pode melhor visualizar as três zonas distintas: corrosão, passivação ou imunidade em que o aço pode se encontrar.



**Figura 2.3:** Diagrama de equilíbrio termodinâmico, do metal ferro em meio aquoso a 25°C (Pourbaix, 1974 apud Cascudo, 1997).

O diagrama acima mostra as condições de pH e potencial nas quais o aço pode se encontrar. A zona de imunidade é aquela onde o aço não se corrói e para qualquer valor de pH permanece estável. Na zona de passivação existe uma fina camada de óxidos e hidróxidos recobrando o aço, e esta camada age como uma barreira que protege o aço do processo de corrosão. E, por fim, a zona de corrosão, onde as condições de pH e potencial eletroquímico são favoráveis ao processo de corrosão, não sendo mais estável a camada de passivação.

A ação de proteção exercida pela película passivadora é garantida pela alta alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico.

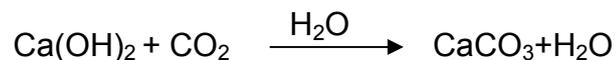
### 2.3. Despassivação das armaduras / Carbonatação

Como discutido no item anterior a passivação do aço é garantida pelo pH elevado do concreto, entre 12 e 13, e a perda de estabilidade da camada passivadora é que leva o aço ao processo de corrosão, que acontece devido a penetração de substâncias agressivas.

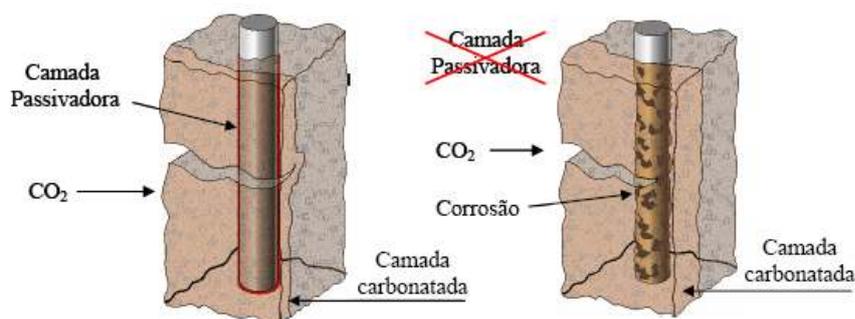
Existem dois agentes agressivos principais que promovem a despassivação das armaduras no interior do concreto: a presença de cloretos e a carbonatação, sendo este último o foco deste trabalho.

A presença de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) liberado das reações de hidratação é o principal responsável pela alta alcalinidade do concreto, e este pH elevado pode ser reduzido com o tempo pela ação do  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera e outros gases ácidos, tais como  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ .

De acordo com Mitre, Barbosa e Helene (2002), o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) forma o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), em meio aquoso, que ao penetrar nos poros do concreto diminui o pH da solução intersticial, reagindo com os hidróxidos dissolvidos e provocando a precipitação dos carbonatos (carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e carbonato de potássio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ )). Esse processo, denominado carbonatação do concreto, ocorre lentamente, segundo a reação principal:



Ocorre então uma redução do pH do concreto já que o pH do carbonato de cálcio está em torno de 9. A carbonatação acontece gradualmente, a uma velocidade lenta e atenuando-se com o tempo. Essa camada carbonatada cuja espessura aumenta no decorrer do tempo chama-se frente de carbonatação, que avança progressivamente a partir da superfície para o interior do concreto e ao atingir a armadura gera sua despassivação. Esse processo de acordo é melhor representado por Tula (2000) conforme figura 2.4 a seguir:



**Figura 2.4:** Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação (Tula, 2000).

## 2.4. Fatores que influenciam na velocidade de carbonatação

A velocidade e a profundidade de carbonatação do concreto armado dependem de fatores relacionados com o meio ambiente e as características finais do concreto endurecido, conforme tabela 2.1.

Fatores Condicionantes		Características Influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO <sub>2</sub>	Mecanismos físico-químico Velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ar	Grau de saturação dos poros Velocidade de carbonatação
	Temperatura	Velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento:	
	- Característica do clínquer	Porosidade da pasta carbonatada
	- Teor de adições	Reserva alcalina
	Traço	Porosidade
	Qualidade de execução	
	- Defeitos	Porosidade
- Cuidados com a cura	Grau de hidratação	

**Tabela 2.1:** Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (Kazmierczak, 1995 apud Figueiredo, 2005).

### 2.4.1. Condições de exposição

#### a) Concentração de CO<sub>2</sub>

Quando o ambiente possui elevada concentração de CO<sub>2</sub> a velocidade de carbonatação aumenta, principalmente em concretos com elevada relação a/c.

Segundo Helene (1993), a atmosfera e o macro clima que envolve a estrutura influenciam conjuntamente na taxa de carbonatação. A agressividade ambiental pode ser avaliada segundo a durabilidade da armadura e do próprio concreto, conforme especificado na NBR 6118:2014 e reproduzido na tabela 2.2.

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

**Tabela 2.2:** Classificação da agressividade ambiental (adaptado da NBR 6118:2014).

Pode-se verificar alteração significativa da concentração de CO<sub>2</sub> quando comparados ambientes fechados e abertos, sendo a taxa de carbonatação maior em ambientes fechados do que em ambientes abertos.

A tabela 2.3, a seguir, mostra a correlação entre a concentração de gás carbonico no ambiente e a agressividade do meio. Considera-se que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode variar de 0,03 a 0,05% em ambientes rurais, de 0,1 a 1,2% em ambientes de urbanos e até 1,8 em atmosferas viciadas (Helene, 1986).

Classificação da agressividade do ambiente sobre armaduras		
Classe de agressividade	Macro-clima	Gás carbônico no ambiente
I	atmosfera rural	≤ 0,3%
II	urbana	≤ 0,3%
III	marinha ou industrial	≥ 0,3%
IV	pólos industriais	> 0,3%

**Tabela .2.3:** Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras (Helene, 1995 apud Figueiredo, 2005).

## b) Umidade relativa do ar

A velocidade com que a frente de carbonatação avança do exterior para o interior do concreto depende, além da concentração de dióxido de carbono, da estrutura da rede de poros do material, bem como das suas condições de umidade.

Segundo Bakker (1988) quando o concreto não apresenta água nos poros a difusão do  $\text{CO}_2$  ocorre normalmente, porém ele permanece na forma de gás e não reage.

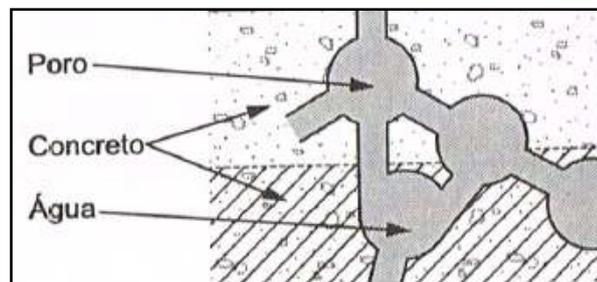
A umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$  nos espaços intersticiais através dos poros do concreto.

Têm-se então situações diferentes de carbonatação de acordo com a umidade presente nos poros de concreto:

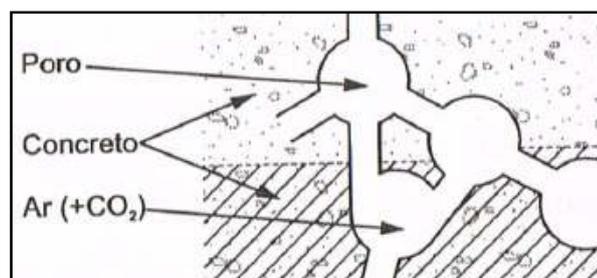
1 – Concreto muito úmido e poros saturados = taxa de carbonatação muito lenta (figura 2.5).

2 – Concreto muito seco e poros secos = não ocorre dissociação do  $\text{CO}_2$  nem reação do cimento hidratado (figura 2.6).

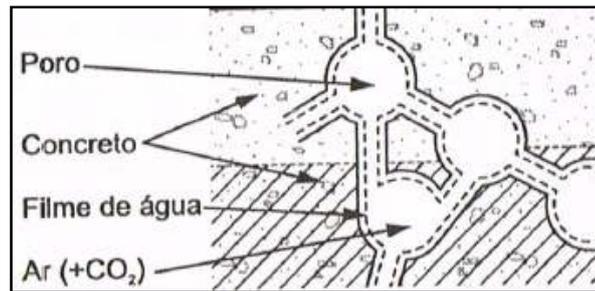
3 – Poros parcialmente preenchidos pela água = carbonatação avança até onde a rede de poros apresenta uma condição favorável (figura 2.7).



**Figura 2.5:** Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto saturado com água (Cascardo, 1997).



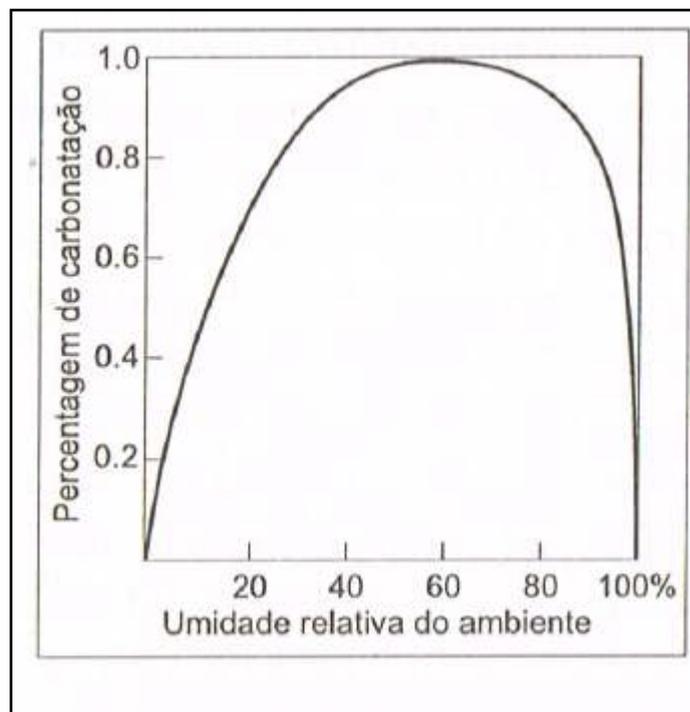
**Figura 2.6:** Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto, com poros totalmente secos (Cascardo, 1997).



**Figura 2.7:** Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto, com poros parcialmente preenchidos com água (concreto com U.R. normal do ambiente (Cascudo, 1997).

De acordo com Figueiredo, Helene e Andrade (1993), a CEB/BI 148 (1982) aponta que em um intervalo de umidade relativa entre 50 e 60% ocorrem as maiores taxas de carbonatação.

A figura 2.8, a seguir mostra a variação da carbonatação com a alteração da umidade relativa do ar, e é possível constatar que em um intervalo de umidade relativa entre 50 e 70% ocorrem as maiores taxas de carbonatação e que a carbonatação ocorre lentamente ou simplesmente não ocorre para umidades inferiores a 20% ou superiores a 95%.



**Figura 2.8:** Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (Verbeck, 1950, apud Figueiredo, Andrade e Helene, 1993).

A influência da umidade relativa com a profundidade de carbonatação em função do tempo é bastante complexa devido aos ciclos aleatórios de umedecimento e secagem a que as estruturas de concreto armado podem estar expostas. Por esta razão, a carbonatação de peças estruturais abrigadas do tempo tende a apresentar velocidade de carbonatação mais elevada do que as expostas a intempéries.

### **c) Temperatura**

O aumento da temperatura estimula a mobilidade das moléculas, favorecendo seu transporte através da microestrutura do concreto. Por outro lado, quando a temperatura diminui, pode ocorrer condensação no concreto, ocasionando um aumento da umidade do material (Helene, 1993).

No entanto nos ensaios de carbonatação acelerada as temperaturas usuais não apresentam efeitos. Variações de temperatura entre 20° C e 45°C não exercem influencia significativa na velocidade de carbonatação, já que o processo é controlado pela difusão (Papadakis, Vayenas e Fardis *apud* Carmona, 2005).

## **2.4.2. Características do concreto**

### **a) Composição química do cimento**

A quantidade disponível de compostos alcalinos para reagir com o CO<sub>2</sub> depende do tipo de cimento empregado na produção do concreto.

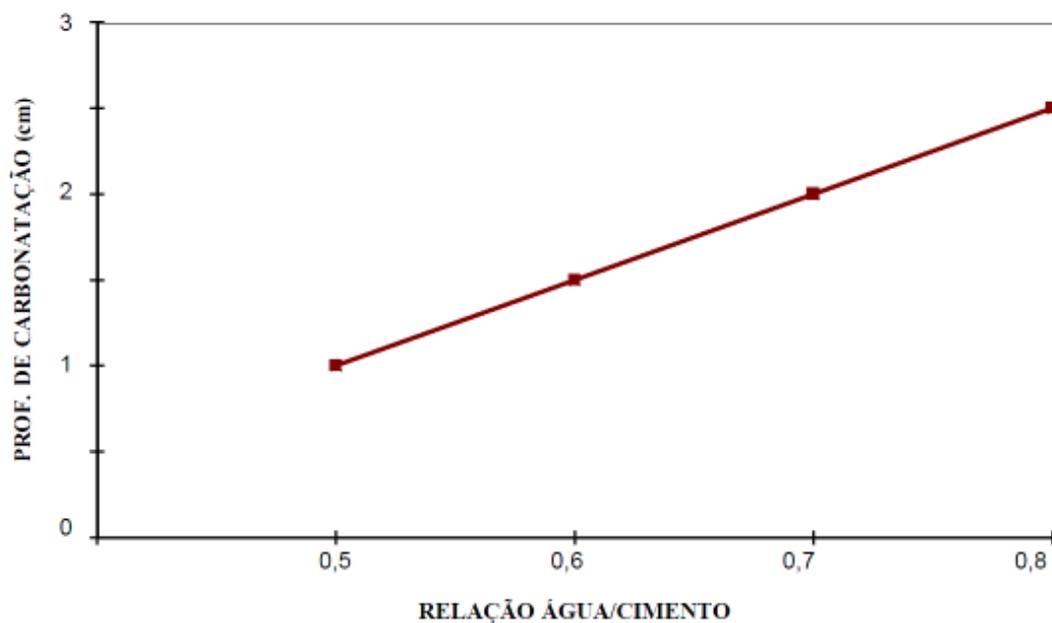
De acordo com Figueiredo, Helene e Andrade (1993), a bibliografia é praticamente unanime em concluir que os cimentos com adições apresentam um desempenho inferior aos cimentos Portland puros no que se refere a resistência a carbonatação.

A profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto.

## b) Traço

A composição do concreto define a porosidade, a difusividade, a absorção e a permeabilidade da pasta endurecida e se reflete na velocidade de penetração da frente de carbonatação. A relação água/cimento (a/c) esta diretamente ligada à quantidade e ao tamanho dos poros do concreto endurecido, e com as propriedades mecânicas finais do material.

Quanto maior a relação a/c, maior a porosidade e permeabilidade do concreto que, por sua vez, aumenta a capacidade de difusão do CO<sub>2</sub>, resultando maior velocidade de carbonatação, conforme demonstra a figura 2.9 (Vénuat, 1977 apud Figueiredo, Helene e Andrade, 1993).



**Figura 2.9:** Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação (Vénuat, 1977 apud Figueiredo, Helene e Andrade, 1993).

### **c) Qualidade da execução**

A qualidade de execução está diretamente ligada às etapas de lançamento, adensamento e, principalmente, cura do concreto. Falhas executivas podem causar alterações na estrutura física do concreto, como por exemplo fissuras, segregação do concreto, perda da pasta de cimento, etc, provocando assim a aceleração da frente de carbonatação, devido a heterogeneidade do concreto.

O intervalo de tempo necessário para que se produzam as reações iniciais de hidratação e endurecimento do cimento corresponde a cura do concreto. Este período depende da temperatura, umidade e concentração da exposição e as condições.

Segundo Helene (1993), a cura do concreto afeta majoritariamente as condições de hidratação dos primeiros milímetros.

Quanto maior o tempo e a qualidade do processo de cura, maior será o ganho das propriedades do concreto, apresentado uma menor porosidade e conseqüentemente uma menor permeabilidade e carbonatação.

Em relação ao cobrimento, quanto maior este for, maior será o intervalo de tempo para que agentes ambientais cheguem a armadura, o que permitiria o início da corrosão.

A norma brasileira ABNT 6118 (2014) especifica cobrimentos mínimos, em função da classe de agressividade ambiental, como se percebe na tabela 2.4.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal  $\geq 15\text{mm}$ .

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45\text{mm}$ .

**Tabela 2.4:** Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10\text{mm}$  (ABNT NBR 6118:2014).

### 3. VIDA ÚTIL X CARBONATAÇÃO

Apresenta-se a seguir o modelo clássico de previsão da carbonatação, a importância da qualidade do concreto e da espessura de cobrimento e as normas existentes.

#### 3.1. Modelo clássico de previsão da carbonatação

De acordo com Bauer (1995), existem muitos modelos de como equacionar a velocidade de carbonatação do concreto. Observa-se o uso de um grande número de fatores e coeficientes específicos para determinados materiais, dispostos em certas condições climáticas, o que torna difícil a obtenção de modelos com utilização geral.

Os modelos que descrevem a carbonatação do concreto podem ser separados em dois grupos: os que estimam a profundidade de carbonatação média e os que estimam um valor máximo de carbonatação, levando em conta uma certa probabilidade de ser alcançado (Silva, 1998).

O modelo matemático clássico que tem sido adotado para a estimativa da profundidade de carbonatação dos concretos pode ser efetuada utilizando a equação (Helene, 1993):

$$e = k * \sqrt{t}$$

Onde:

e = profundidade encontrada da carbonatação, em milímetros.

k = coeficiente de carbonatação, dependente da difusividade do CO<sub>2</sub>, em mm.ano<sup>1/2</sup>

t = tempo de vida do concreto armado, em anos.

Nota: k é uma variável de difícil determinação, pois dependente da qualidade do concreto, em função da:

- porosidade do concreto,
- consumo de cimento,
- espessura de recobrimento,
- velocidade da difusão dos gases através do concreto,
- atmosfera agressiva que envolve o concreto, etc.

A constante  $k$  pode ser determinada em uma primeira medida da profundidade de carbonatação, conhecendo-se o tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ . Em uma segunda medida da profundidade de carbonatação, para o mesmo material, pode-se utilizar o valor obtido de  $k$  e determinar qual o tempo para a carbonatação atingir a armadura.

$$k = \frac{e}{\sqrt{t}} \rightarrow t = \left(\frac{e}{k}\right)^2$$

Onde:

$e$  = profundidade encontrada da carbonatação, em milímetros.

$k$  = coeficiente de carbonatação, dependente da difusividade do  $\text{CO}_2$ , em  $\text{mm.ano}^{1/2}$

$t$  = tempo de vida do concreto armado, em anos.

É importante ressaltar que este modelo não deve ser aplicado em estruturas de concreto com pequenas idades.

### **3.2. Importância da qualidade do concreto e da espessura de cobrimento**

Como é sabido uma das vantagens do concreto armado é que, se o mesmo for bem executado, protege a armadura contra a corrosão.

A camada de cobrimento desempenha um importante papel porque, além de ser uma barreira química, devido ao pH elevado que promove uma película passivadora que envolve o aço, também se constitui em uma barreira física. Um cobrimento de boa qualidade, com baixa porosidade, além de dificultar a penetração dos agentes agressivos, constitui-se em uma barreira adicional, reduzindo a presença da água e do oxigênio, elementos necessários à existência da corrosão eletroquímica.

Sendo assim o cobrimento das armaduras tem fundamental importância no que se refere a vida útil das estruturas e os procedimentos de execução tem consequências fundamentais na qualidade desta camada. Por este motivo é extremamente importante que o cobrimento seja projetado e executado corretamente, garantido assim o desempenho planejado para a estrutura.

### 3.3. Normalização

Cita-se normas ou especificações referentes a inspeção de pontes e viadutos, a NBR-9452 (ABNT, 2012), DNIT (DNER, 1994 revisada por DNIT, 2004), o manual da *American Association of State and Highway Transportation Officials* (AASHTO, 1998) e a ET-00.000.000-0-C21/002 revisão 1 da ARTESP (2007) que apresentam uma lista dos elementos a serem inspecionados com maior detalhe em uma OAE.

A norma ABNT NBR-9452 (2012) cita elementos a serem inspecionados, não apresenta uma ficha de campo padronizada, porém apresenta nos anexos um roteiro com os dados a serem levantados na inspeção, permitindo a elaboração de um check list. A norma do DNIT e a especificação da ARTESP dispõem de fichas de inspeção de campo padronizadas e pré-formatadas para atender à demanda dos dados sobre as OAEs em cada tipo de inspeção. O manual da AASHTO apresenta um breve roteiro de verificação de cada item da obra.

São mencionados nas normas ABNT NBR-9452 e DNIT 010/2004 e o manual da AASHTO a possibilidade e algumas vantagens da realização de ensaios que complementam à inspeção visual, porém não existe um aprofundamento, apenas fazem uma breve referência a alguns ensaios possíveis.

Para a determinação da profundidade de carbonatação, que é o tema estudado nesse trabalho, tem-se European Standard EN 14630:2006: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods: Determination of carbonation depth in hardened concrete by phenolphthalein method, 2006.

Em relação ao concreto armado, no pós guerra foram desenvolvidos novos modelos construtivos e de cálculo que permitiram maior produtividade e menores custos, que tiveram em parte uma influência negativa nas construções, reduzindo as dimensões e o cobrimento das peças estruturais, aumentando a esbeltez das estruturas e as tensões de trabalho. Isso influenciou diretamente a durabilidade das estruturas de concreto principalmente por reduzir a proteção das armaduras. Porém, houve também um aumento dos danos causados pela deterioração das estruturas de concreto armado e enormes gastos envolvidos para recuperá-las, na segunda metade do século XX.

No Brasil, essa conscientização começou a tomar impulso a partir dos anos 90, com o crescente número de estruturas deterioradas (Andrade, 2005).

Com a revisão da norma ABNT NBR 6118:2003, que menciona itens relativos à durabilidade, um grande avanço foi dado. Também foram definidos parâmetros de projeto em função da agressividade do meio no qual está inserida a estrutura, entrando em harmonia com as principais normas internacionais relacionadas ao assunto.

Com um maior conhecimento dos mecanismos de transporte de fluidos em meios porosos foi possível evoluir o estudo da durabilidade. É notório que o ingresso de agente agressivo no concreto armado, como o dióxido de carbono, por exemplo, reduz a vida útil desse material por provocar seu comprometimento químico e, conseqüentemente, mecânico (Carmona, 2005).

A Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho), prescreve as construtoras a conceberem e executarem as obras para que o nível de desempenho especificado em projeto seja atendido ao longo de uma vida útil. Esta norma além de focar a tecnologia das construções e fazer boas práticas e cuidados executivos, define as propriedades fundamentais dos diferentes elementos da construção, independentemente do material utilizado, define também a responsabilidade dos construtores, incorporadores, projetistas e usuários e inclui um mecanismo de rastreabilidade para a construção, que permite, em casos de falhas de materiais ou estruturas, indicar e determinar incumbências.

#### **4. PLANO DE INSPEÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS**

Visando a determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo, realizou-se, em 10 (dez) Obras de Arte Especiais (OAE's) no estado de São Paulo, o ensaio de determinação da profundidade de carbonatação através de indicadores de pH – método colorimétrico (solução de fenolftaleína) em diversos pontos da estrutura de Obras de Arte Especiais de variadas idades, concepções estruturais e localizações. A medição do cobrimento foi realizada por prospecção *in loco*.

A seguir, apresenta-se o método utilizado para determinar as profundidades de carbonatação, bem como os resultados obtidos nas inspeções deste trabalho.

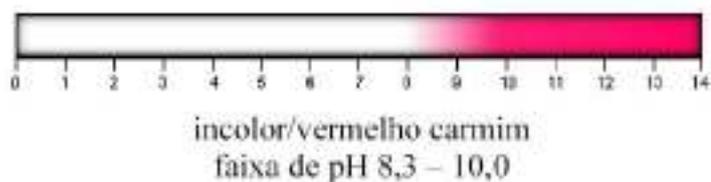
##### **4.1. Método usado para determinação da profundidade de carbonatação**

Inicialmente, fratura-se o concreto com o auxílio de marreta e talhadeira a uma profundidade mínima igual ao cobrimento da armadura, para que seja possível verificar se a frente de carbonatação atingiu a barra de aço e dimensões aproximadas de 0,10 x 0,10m. Em seguida, a superfície fraturada deve ser limpa com um pincel, para evitar erro na leitura.

Logo após deve-se aspergir a solução indicadora no concreto fraturado, principalmente nas laterais do corte, evitando que a solução aspergida escorra pela superfície, no presente trabalho foi utilizada a solução alcoólica de fenolftaleína preparada de acordo com a norma DIN EN 14630:2006.

Foi seguida a seguinte proporção para dosagem de fenolftaleína: 1 grama de fenolftaleína, 70ml de álcool etílico, 100ml de água destilada.

A profundidade de carbonatação então é verificada visualmente pela diferença de coloração do chamado ponto de viragem da fenolftaleína, como se observa na figura 4.1.



**Figura 4.1:** Ponto de viragem da fenolftaleína (Castro, 2003).

Em contato com a solução alcalina dos poros do concreto, o indicador de pH à base de solução de fenolftaleína, adquire coloração típica a partir de um determinado valor de pH da solução. Para valores abaixo desses pHs, não há alteração de cor do material.

Após a aspersão, forma-se então, uma linha divisória entre a região incolor e a de coloração típica, a qual depende do tipo de indicador, evidenciando o avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto da camada de cobrimento. A região carbonatada é aquela que apresenta-se incolor, após aspersão, no caso de apresentar coloração específica, denomina-se região não-carbonatada.

Observa-se a mudança de coloração, e com o auxílio do paquímetro, deve-se realizar a medida da espessura mínima e máxima de carbonatação em cada lateral do corte.

#### 4.2. Obras estudadas

Realizou-se o estudo em 10 (dez) obras no estado de São Paulo com idade, localização e concepção estrutural variadas, listadas abaixo:

Nº	OAE	Ano de construção	Ano de realização do ensaio	Idade da OAE
1	SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa	2002	2009 / 2013	7 / 11
2	SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)	2000	2009	9
3	SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte	2005	2014	9
4	SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste	2005	2012	7
5	SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste	2009	2013	4
6	SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste	2006	2013	7
7	SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste	2001	2012	11
8	SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste	1998	2007	9
9	SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste	2009	2011	2
10	SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínia - Pista Transversal	1973	2010	37

**Tabela 4.1:** Obras estudadas (elaboração própria, 2014).

A seguir apresenta-se uma sucinta descrição de cada OAE estudada e os resultados obtidos.

#### **4.2.1. SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa**

A Ponte, situada na rodovia Mário Covas, SP-021 – km 013+000, Pista Externa, encontra-se na cidade de Osasco no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial, com extensão de 50,00m e largura total de 19,30m. Possui superestrutura com arranjo estrutural tipo grelha e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobrimento de 3,00cm para a super, meso e infraestrutura,  $f_{ck}$  igual a 27,00MPa para superestrutura e 18,00MPa para mesoestrutura e 15,00MPa para infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A figura 4.2 expõe a referida OAE.



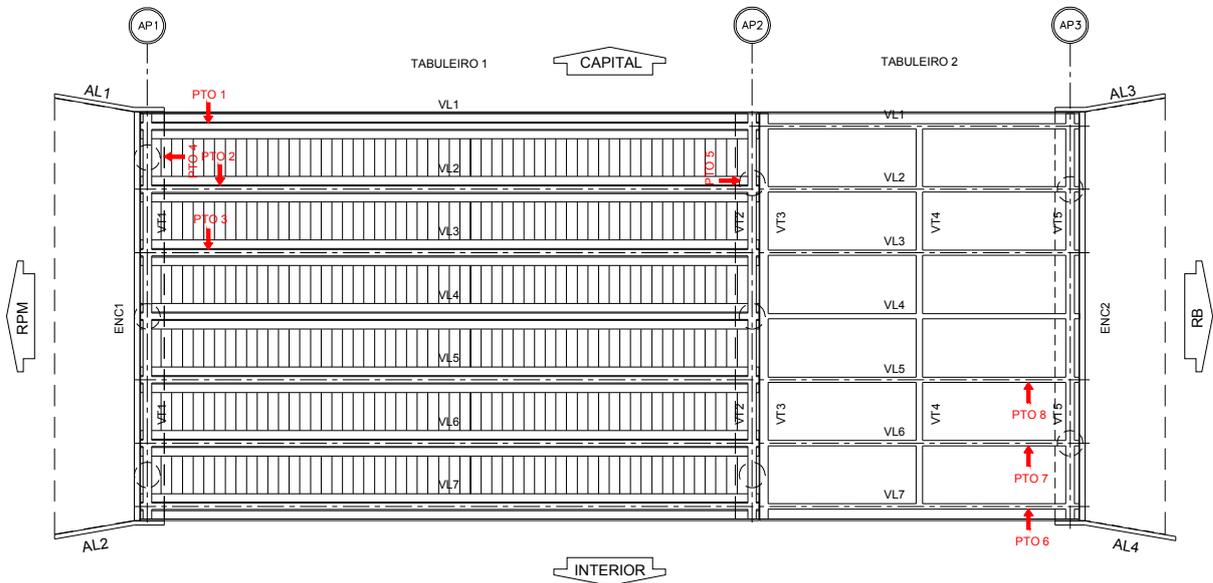
**Figura 4.2:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009)

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, nas tabelas 4.2 e 4.3 e nas figuras 4.3 a 4.17.

<b>Ano de construção:</b>		2002	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	7 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2009		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga longarina VL1 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,25m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	12	30	
2	Viga longarina VL2 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,40m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	11	40	
3	Viga longarina VL3 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,45m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	12	25	
4	Viga travessa TR1 – face RB a 2,95m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	24	25	
5	Tubulão T4 – face RPM a 1,00m do solo (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	13	40	
6	Viga longarina VL7 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,85m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	15	30	
7	Viga longarina VL6 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,20m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	14	35	
8	Viga longarina VL5 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,25m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	9	20	

**Tabela 4.2:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Ensaio de carbonatação 2009 (elaboração própria, 2009).

SP-021- km 013+000 - PONTE - PISTA EXTERNA (2009)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.3:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2009).



**Figura 4.4:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longitudinal VL1 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,25m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.5:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Viga longarina VL2 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,40m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.6:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Viga longarina VL3 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,45m da viga transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.7:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga travessa TR1 – face RB a 2,95m do muro de ala AL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.8:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Tubulão T4 – face RPM a 1,00m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.9:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Viga longarina VL7 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,85m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.10:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 7 – Viga longarina VL6 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,20m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

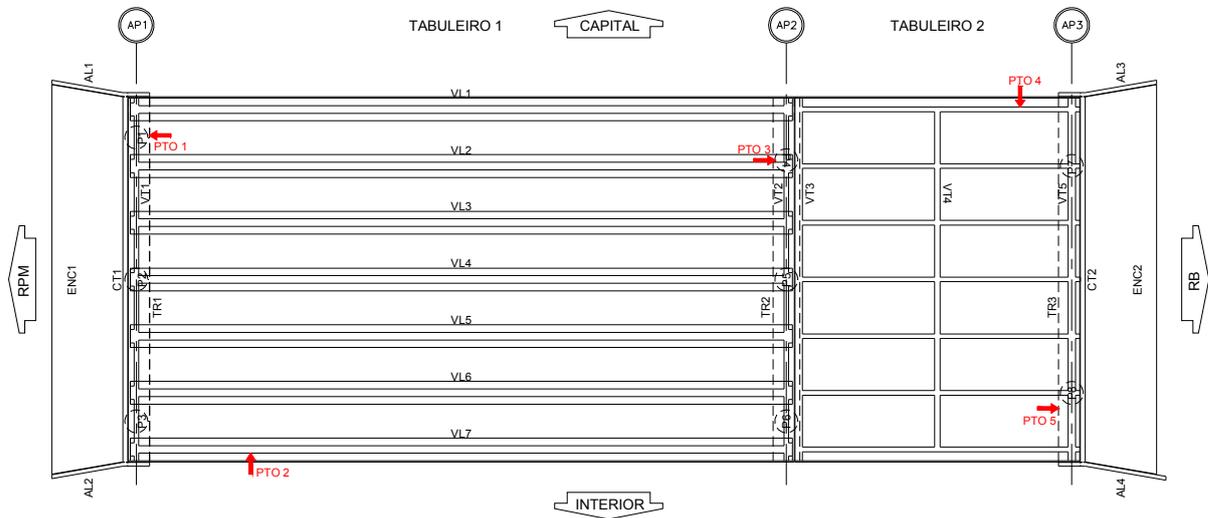


**Figura 4.11:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 8 – Viga longarina VL5 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,25m da viga transversina VT4 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

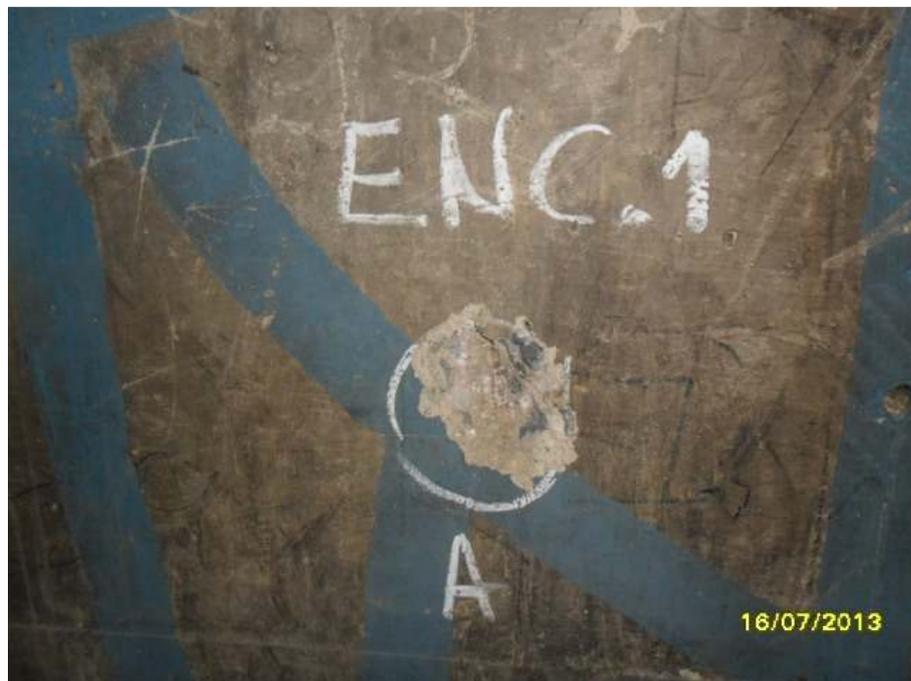
<b>Ano de construção:</b>		2002	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	11 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2013		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga travessa TR1 - face RB, a 1,45m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	24	23	
2	Viga longarina VL7 - face Interior, a 5,70m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	18	22	
3	Pilar P4 do apoio AP2 - face RPM, a 0,70m do piso (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	18	43	
4	Viga longarina VL1 - face Capital, a 1,30m da viga transversina VT5 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	40	
5	Viga travessa TR3 - face RPM, a 2,60m do muro de ala AL4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	26	36	

**Tabela 4.3:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).

SP-021- km 013+000 - PONTE - PISTA EXTERNA (2013)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.12:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2013).



**Figura 4.13:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga longitudinal VL1 - face Capital (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



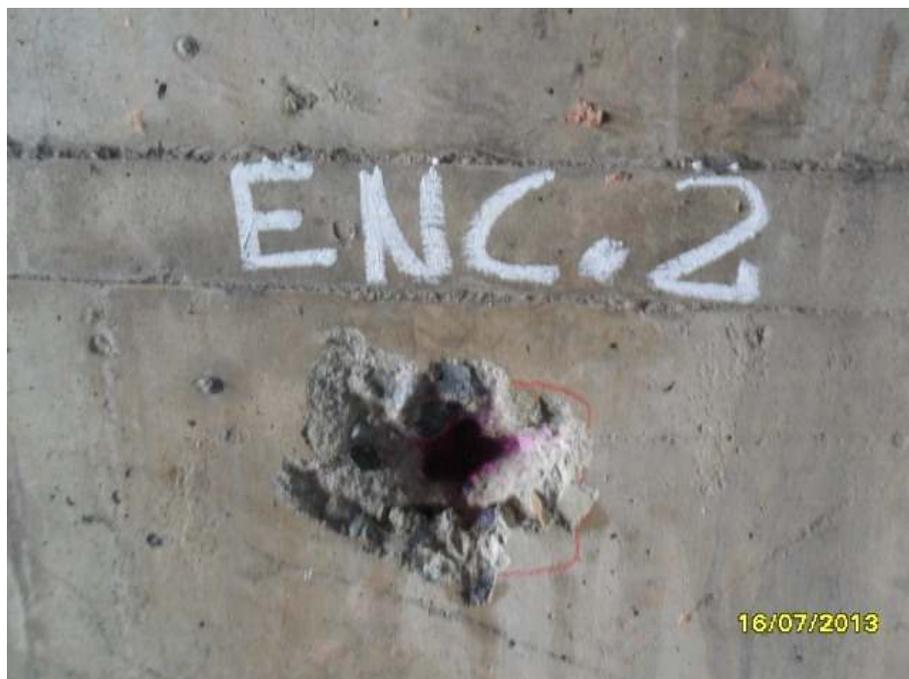
**Figura 4.14:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga travessa TR1 - face RB (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.15:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P1 do apoio AP2 - face Capital (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.16:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Pilar P6 do apoio AP3 - face Interior (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.17:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 5 – Viga travessa TR2 - face RPM (acervo Beltrame Engenharia, 2013).

#### **4.2.2. SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)**

A Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 situada na Rodovia Mário Covas - SP 021 – km 029+300, encontra-se na cidade de Embu da Artes no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 197,17m e largura de 12,00m. Possui superestrutura do tipo caixão unicelular e mesoestrutura constituída por 05 (cinco) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 2,50cm para a superestrutura e 3,00cm para a meso e infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 30,00MPa para a superestrutura, 27,00MPa para a mesoestrutura e 15,00MPa para a infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A figura 4.18 expõe a referida OAE.



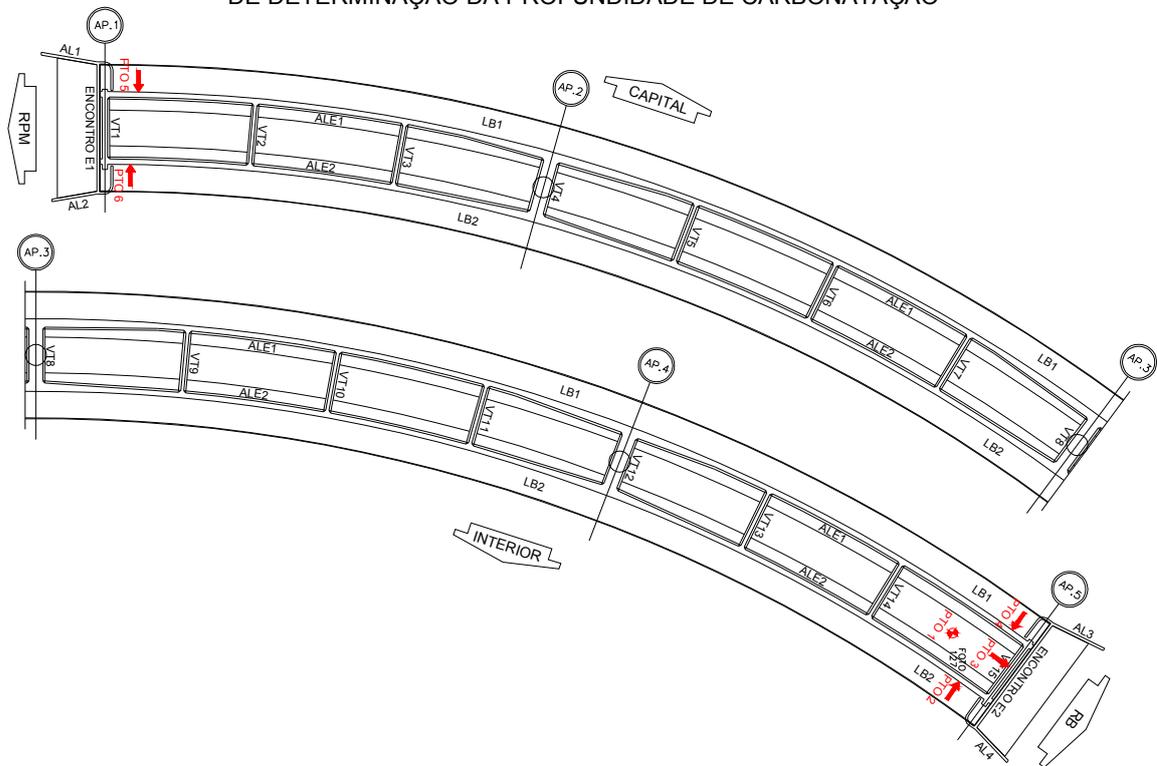
**Figura 4.18:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB - RPM): Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.4 e nas figuras 4.19 a 4.25.

<b>Ano de construção:</b>		2000	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	9 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2009		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	11,00	30,00	
2	Alma da seção celular ALE1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	12,00	42,00	
3	Pilar P3 – face RB – a 1,20m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	19,00	25,00	
4	Alma da seção celular ALE1 – face Capital – a 2,95m do apoio 4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	12,00	40,00	
5	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	11,00	30,00	
6	Alma da seção celular ALE1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	12,00	42,00	

**Tabela 4.4:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio de carbonatação 2009 (elaboração própria, 2009).

SP-021- km 029+300 - PASSAGEM INFERIOR SOBRE A BR-116 - ALÇA 04 - PISTA INTERNA (2009)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.19:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2009).



**Figura 4.20:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longitudinal VL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.21:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Alma da seção celular VL2, face Interior a 1,55m do apoio 5 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.22:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da longarina VL1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.23:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).



**Figura 4.24:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,55m do apoio 1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.



**Figura 4.25:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Alma da seção celular VL2 – face Interior – a 1,20m do apoio 1 (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.

#### **4.2.3. SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte**

O Viaduto Riacho Grande, situado na Rodovia Anchieta, SP-150 – km 029+422, encontra-se na cidade de São Bernardo do Campo, no Estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 44,70m e largura total de 13,00m. Possui superestrutura formada por laje protendida e mesoestrutura formada por 4 (quatro) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobrimento de 3,00cm para a superestrutura, 4,00cm para a mesoestrutura e 5,00cm para a infraestrutura, com  $f_{ck}$  igual a 30,00MPa para a super e mesoestrutura e 20,00MPa para a infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A referida OAE pode ser observada na figura 4.26.



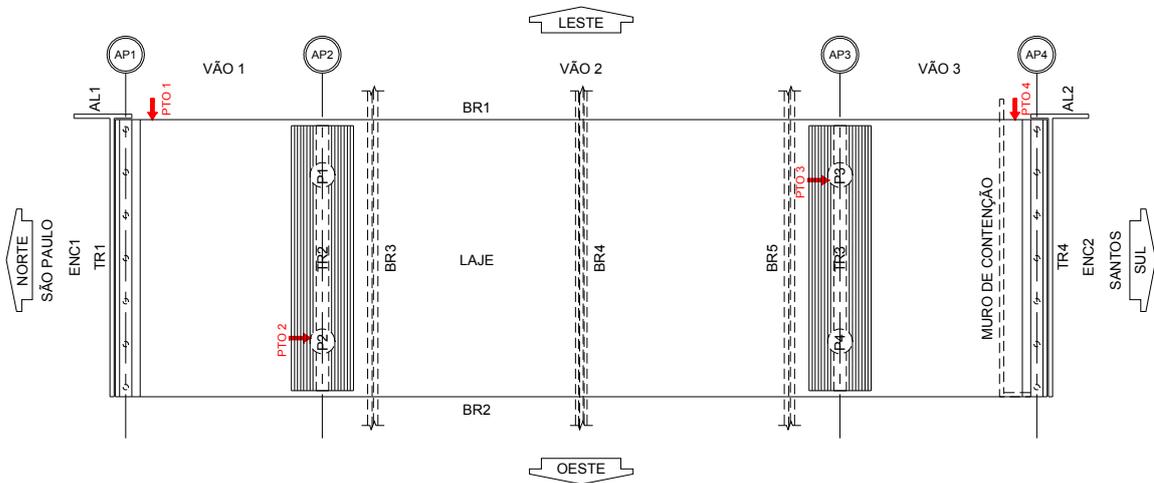
**Figura 4.26:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2009).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.5 e nas figuras 4.27 a 4.35.

<b>Ano de construção:</b>		2005	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	9 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2014		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Borda de laje, vão 1 - face Leste a 0,40m da TR1 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	59	70	
2	Pilar P2, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	44	51	
3	Pilar P3, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	41	50	
4	Borda de laje, vão 3 - face Leste a 0,10m da TR4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	34	48	

**Tabela 4.5:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio de carbonatação 2014 (elaboração própria, 2014).

SP-150 - km 029+422 - VIADUTO RIACHO GRANDE - PISTA NORTE  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



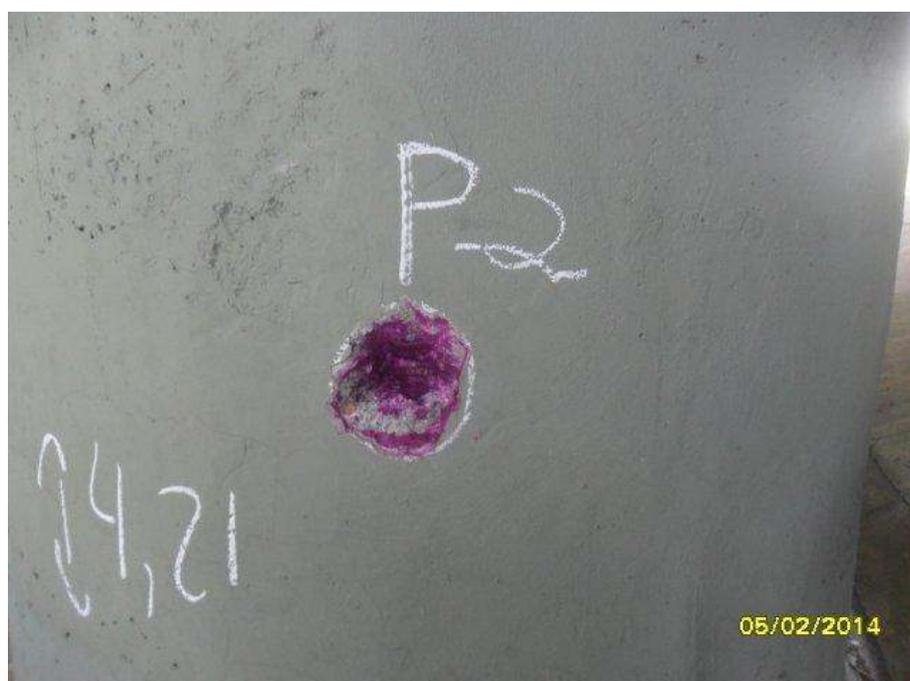
**Figura 4.27:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2014).



**Figura 4.28:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Borda de laje, vão 1 - face Leste a 0,40m da viga travessa TR1 (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



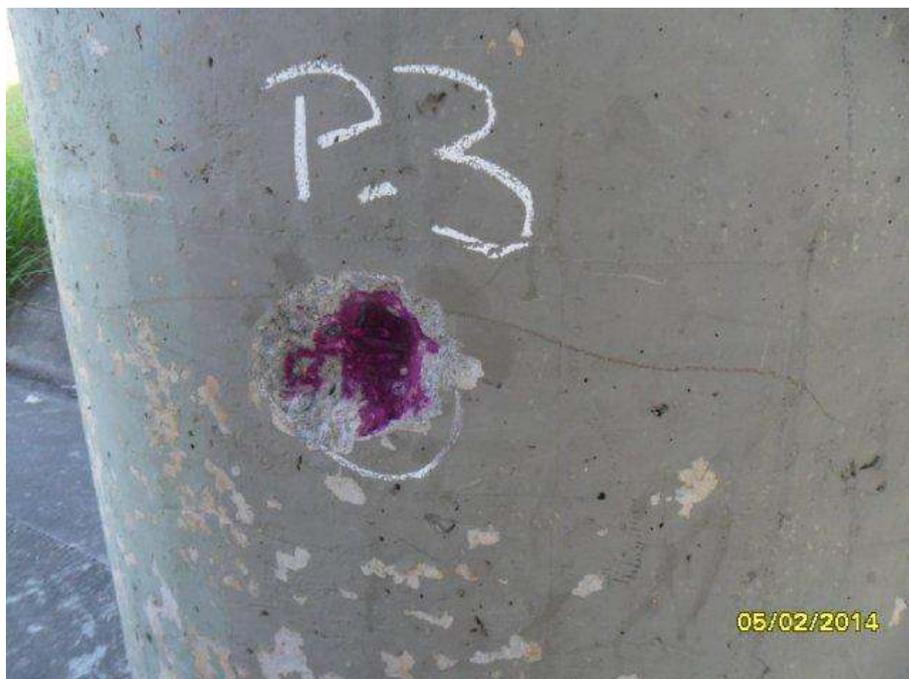
**Figura 4.29:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



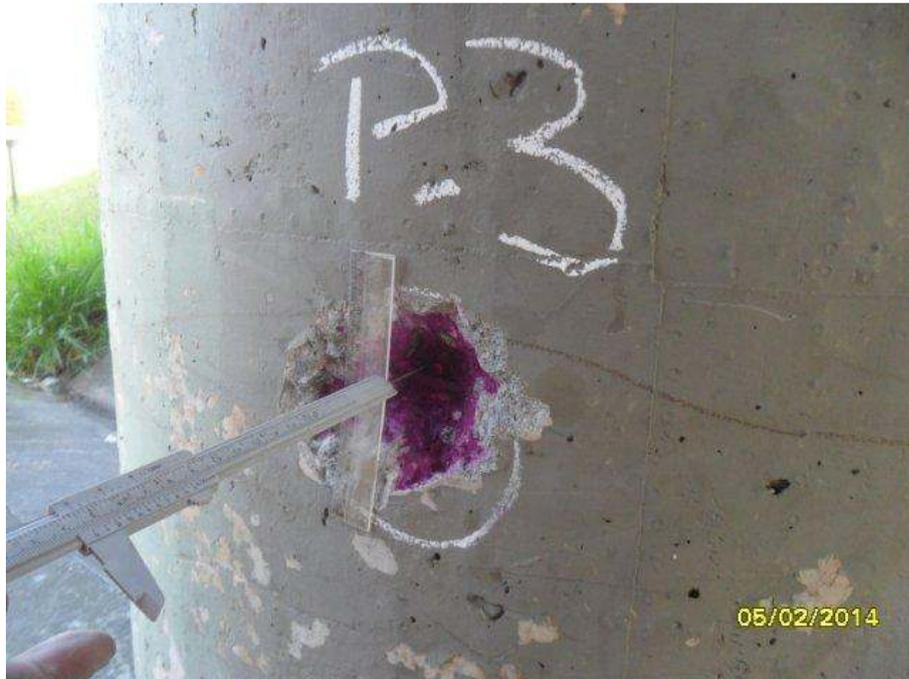
**Figura 4.30:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Pilar P2 face Norte a 0,90m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



**Figura 4.31:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



**Figura 4.32:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P3 - face Norte a 0,90m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



**Figura 4.33:** Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



**Figura 4.34:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Borda de laje, vão 3 - face Leste a 0,10m da viga travessa TR4 (acervo Beltrame Engenharia, 2014).



**Figura 4.35:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Detalhe para a coleta de medidas (acervo Beltrame Engenharia, 2014).

#### **4.2.4. SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste**

A Passagem Inferior – Pista Leste/Oeste, situada na Rodovia Raposo Tavares, SP-270 – km 088+800, encontra-se na cidade de Sorocaba no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 24,30m e largura variando de 13,78 a 13,88m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 2 (duas) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 3,50cm para a meso e superestrutura e 5,00cm para infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 40,00MPa para a superestrutura, 20,00MPa para a infraestrutura e 25,00MPa para a mesoestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A figura 4.36 expõe a referida OAE.



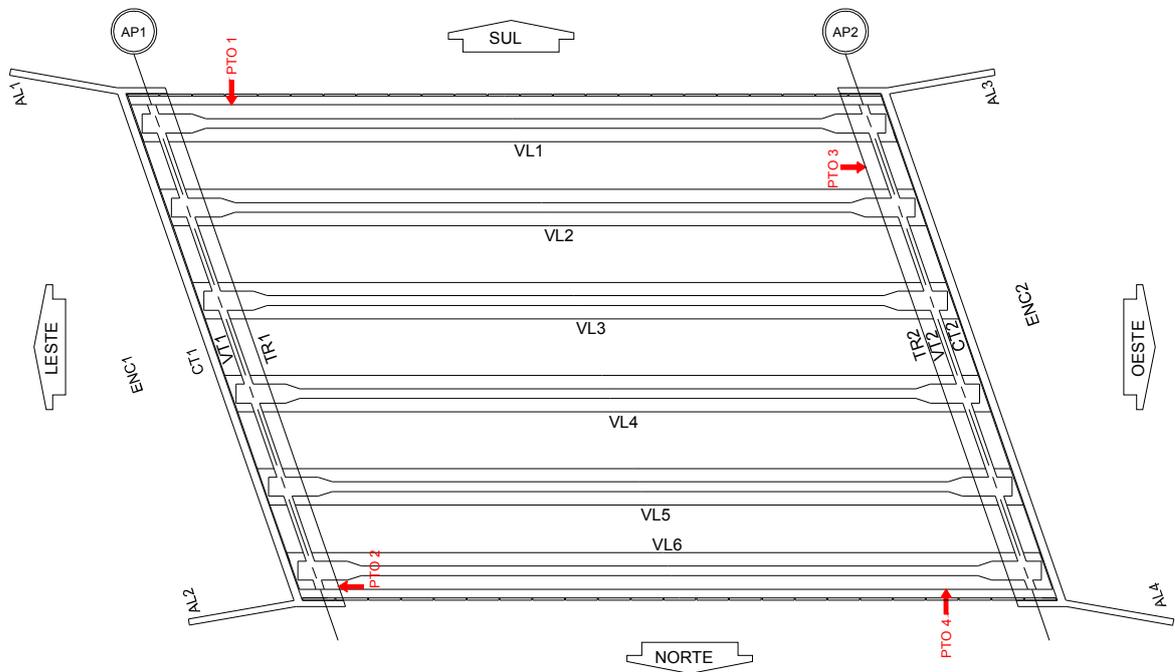
**Figura 4.36:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2012).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.6 e nas figuras 4.37 a 4.41.

<b>Ano de construção:</b>		2005	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	7 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2012		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 1,00m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	10	25	
2	Viga longitudinal VL1 - face Sul, a 1,15m da viga travessa TR1 (concreto protendido pré-moldado).	15	30	
3	Viga travessa TR2 - face Leste, a 2,25m do muro de ala AL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	15	30	
4	Viga longitudinal VL6 - face Norte, a 0,80m da viga travessa TR2 (concreto protendido pré-moldado).	20	30	

**Tabela 4.6:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio de carbonatação 201 (elaboração própria, 2012).

SP-270 - km 088+800 - PASSAGEM INFERIOR - PISTA LESTE/OESTE  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.37:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Croqui de posicionamento do ensaio 201 (elaboração própria, 2012).



**Figura 4.38:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.39:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longitudinal VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.40:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR2 - face Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.41:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longitudinal VL6 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2012).

#### **4.2.5. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste**

O Viaduto – Pista Marginal Leste, situado na Rodovia Raposo Tavares, SP-270 – km 098+350, encontra-se na cidade de Sorocaba no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 74,69m e largura total de 10,75m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 3,50cm para a meso e superestrutura e 5,00cm para infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 40,00MPa para a superestrutura e 25,00MPa para a meso e infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

O referido viaduto pode ser observado na figura 4.42.



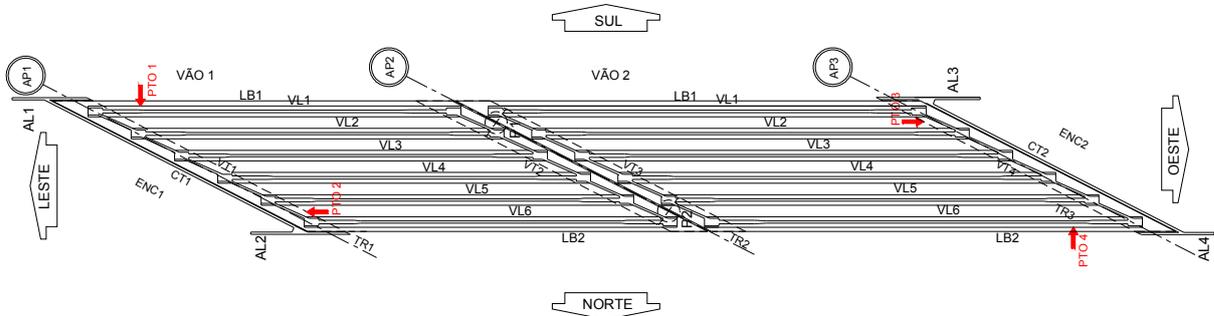
**Figura 4.42:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2013).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.7 e nas figuras 4.43 a 4.47.

<b>Ano de construção:</b>		2009	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	4 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2013		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga longitudinal VL1 – face Sul, a 1,50m da cortina CT1 (concreto protendido pré-moldado).	10	38	
2	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,80m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	15	38	
3	Viga travessa TR3 – face Leste, a 0,70m do talude do encontro ENC2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	7	25	
4	Viga longitudinal VL5 – face Norte, a 1,50m da cortina CT2 (concreto protendido pré-moldado).	8	22	

**Tabela 4.7:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).

SP-270 - km 098+350 - VIADUTO SOBRE A LINHA FÉRREA E ESTRADA MUNICIPAL - MARGINAL LESTE  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.43:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2013).



**Figura 4.44:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.45:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.46:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR3 - face Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.47:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longitudinal VL5 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2013).

#### **4.2.6. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste**

O Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste, situado na Rodovia Raposo Tavares, SP-270 – km 098+350, encontra-se na cidade de Sorocaba no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 74,69m e largura total de 11,96m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 3,50cm para a meso e superestrutura e 5,00cm para infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 40,00MPa para a superestrutura e 25,00MPa para a meso e infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

O referido viaduto pode ser observado na figura 4.48.



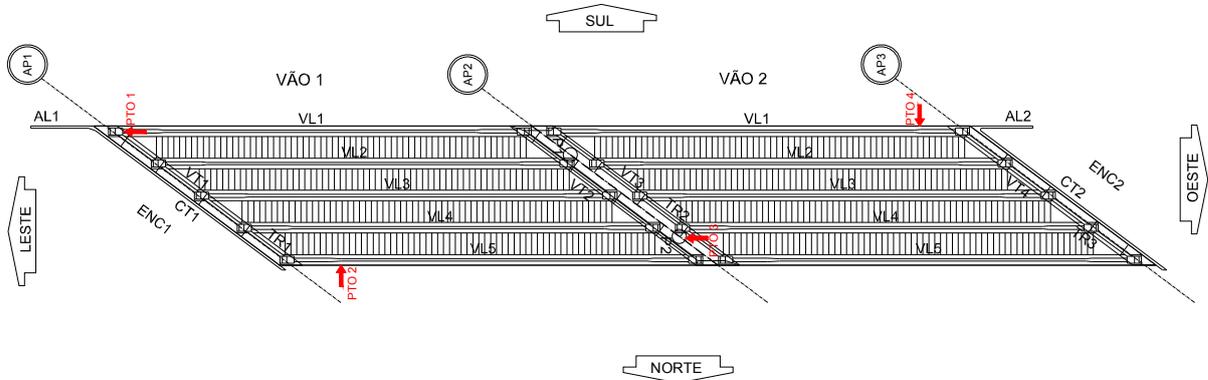
**Figura 4.48:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2013).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.8 e nas figuras 4.49 a 4.53.

<b>Ano de construção:</b>		2006	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	7 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2013		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,83m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	30	
2	Viga longarina VL5 – face Norte, a 2,50m da viga transversina VT1 (concreto protendido pré-moldado).	15	31	
3	Pilar P2 do apoio AP2 - face Oeste, a 1,00m do piso (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	27	26	
4	Viga longarina VL1 - face Sul, a 6,00m da viga transversina VT4 (concreto protendido pré-moldado).	12	30	

**Tabela 4.8:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio de carbonatação 2013 (elaboração própria, 2013).

SP-270 - km 098+350 - VIADUTO SOBRE A LINHA FÉRREA E ESTRADA MUNICIPAL - PISTA OESTE  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.49:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Croqui de posicionamento do ensaio 2013 (elaboração própria, 2013).



**Figura 4.50:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.51:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longarina VL5 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.52:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Pilar P2 do apoio AP2 - face Oeste. Notar ponto com região carbonatada (acervo Beltrame Engenharia, 2013).



**Figura 4.53:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2013).

#### **4.2.7. SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste**

O Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste, situado na Rodovia Presidente Castello Branco, SP-280 – km 019+280, encontra-se na cidade de Osasco no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 70,00m e largura total de 16,10m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobrimento de 2,50cm para a superestrutura e 3,00cm para a meso e infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 27,00MPa e 18,00MPa respectivamente. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A figura 4.54 expõe a referida OAE.



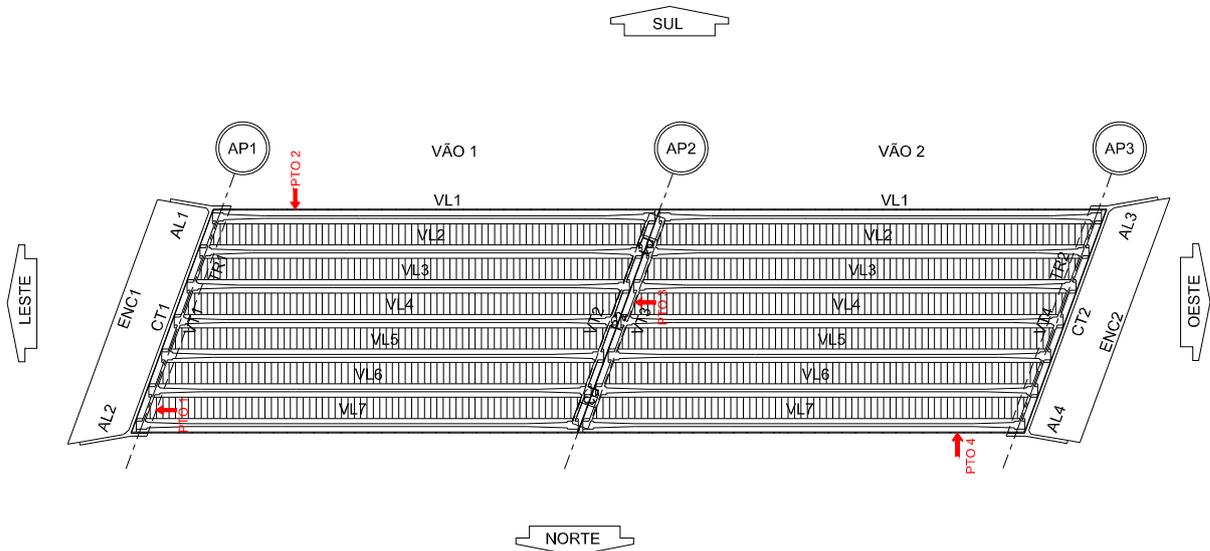
**Figura 4.54:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2012).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.9 e nas figuras 4.55 a 4.59.

<b>Ano de construção:</b>		2001	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	11 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2012		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 2,15m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	15	35	
2	Viga longitudinal VL1 - face Sul, a 5,10m do apoio AP1 (concreto protendido, pré-moldado).	20	17	
3	Viga travessa TR2 - face Oeste, a 0,45m da viga longitudinal VL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	27	
4	Viga longitudinal VL7 - face Norte, a 7,50m do apoio AP3 (concreto protendido, pré-moldado).	15	22	

**Tabela 4.9:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio de carbonatação 2012 (elaboração própria, 2012).

SP-280 - km 019+280 - VIADUTO SOBRE RAMOS DO RODOANEL - PISTA LESTE (2012)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.55:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Croqui de posicionamento do ensaio (elaboração própria, 2012).



**Figura 4.56:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 1 – Viga travessa TR1 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.57:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 2 – Viga longitudinal VL1 - face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.58:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 3 – Viga travessa TR2 - face Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2012).



**Figura 4.59:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo do tempo. Ponto 4 – Viga longarina VL7 - face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2012).

#### **4.2.8. SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste**

O Viaduto de acesso a Tamboré – Pista Marginal Leste, situado na Rodovia Presidente Castello Branco, SP-280 – km 021+860, encontra-se na cidade de Barueri no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com extensão de 36,90m e largura total de 19,30m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 2 (duas) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 3,00cm para a meso e superestrutura e 5,00cm para infraestrutura e  $f_{ck}$  igual a 30,00MPa para laje e vigas transversinas, 35,00MPa para vigas longarinas e 20,00MPa para vigas travessas, cortinas e muros de ala. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

A figura 4.60 ilustra o referido viaduto.



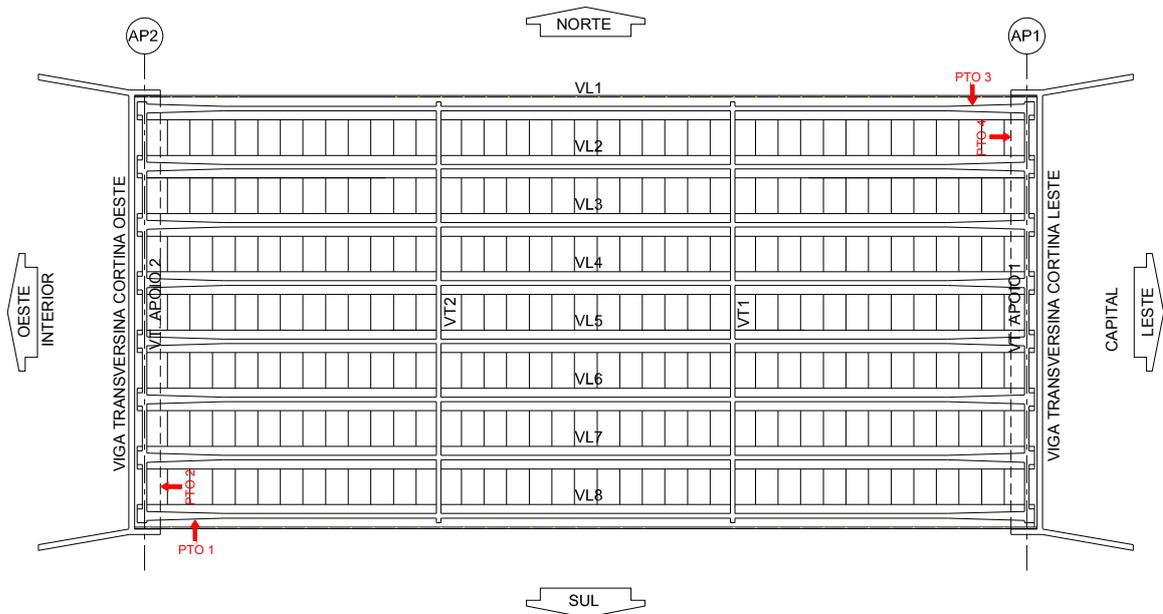
**Figura 4.60:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2007).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.10 e nas figuras 4.61 a 4.65.

<b>Ano de construção:</b>		1998	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	9 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2007		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga longitudinal VL8, face Sul a 1,75m da cortina do encontro Oeste (concreto protendido pré-moldado).	13	25	
2	Viga travessa do encontro Oeste, face Leste a 2,20m da face Sul (concreto armado <i>in loco</i> ).	12	30	
3	Viga longitudinal VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	2	34	
4	Viga travessa do encontro Leste, face Oeste a 2,40m da face Norte (concreto armado <i>in loco</i> ).	13	25	

**Tabela 4.10:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio de carbonatação 2007 (elaboração própria, 2007).

SP-280 - km 021+860 - VIADUTO DE ACESSO A TAMBORÉ - PISTA MARGINAL LESTE (2007)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.61:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Croqui de posicionamento do ensaio 2007 (elaboração própria, 2007).



**Figura 4.62:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga Longarina VL8, face Sul a 1,75m da cortina do encontro Oeste (acervo Beltrame Engenharia, 2007).



**Figura 4.63:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Viga Travessa do encontro Oeste, face Leste a 2,20m da face Sul (acervo Beltrame Engenharia, 2007).



**Figura 4.64:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Viga Longarina VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2007).



**Figura 4.65:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga Travessa do encontro Leste, face Oeste a 2,40m da face Norte (acervo Beltrame Engenharia, 2007).

#### **4.2.9. SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste**

O Viaduto ramo 700 – Pista Leste, situado na Rodovia Presidente Castello Branco, SP-280 – km 031+800, encontra-se na cidade de Jandira no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento no alinhamento retilíneo de 108,905m e no alinhamento curvo de 88,09m e largura total de 9,40m para os tabuleiros 1 e 2, 9,90m para os tabuleiros 1A a 3A, 13,40m para o tabuleiro 4 e variável de 13,40m a 14,40m no tabuleiro 3. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo grelha e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com os projetos originais, a obra apresenta cobertura de 3,50cm para a meso e superestrutura e 5,00cm para infraestrutura, com  $f_{ck}$  igual a 40,00MPa para a superestrutura e 25,00MPa para meso e infraestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

O viaduto ramo 700 – Pista Leste pode ser observado na figura 4.66.



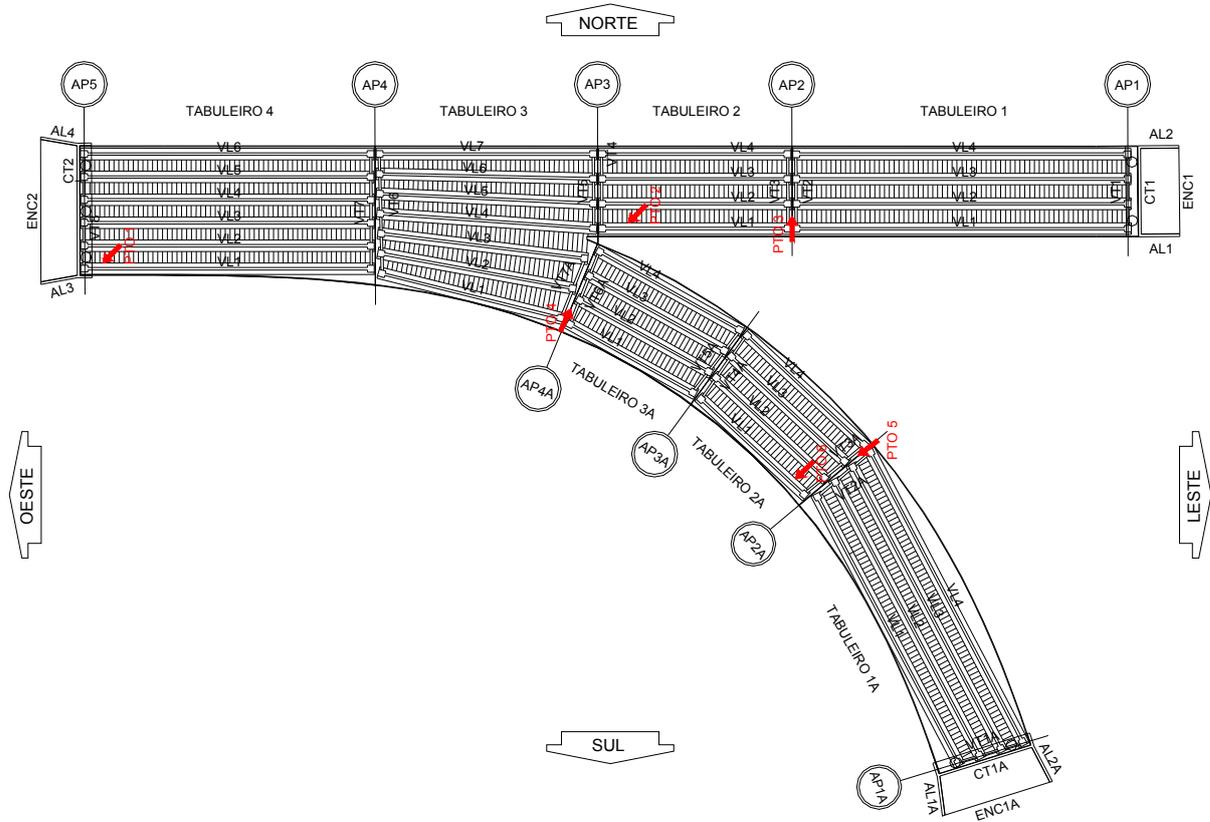
**Figura 4.66:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.11 e nas figuras 4.67 a 4.74.

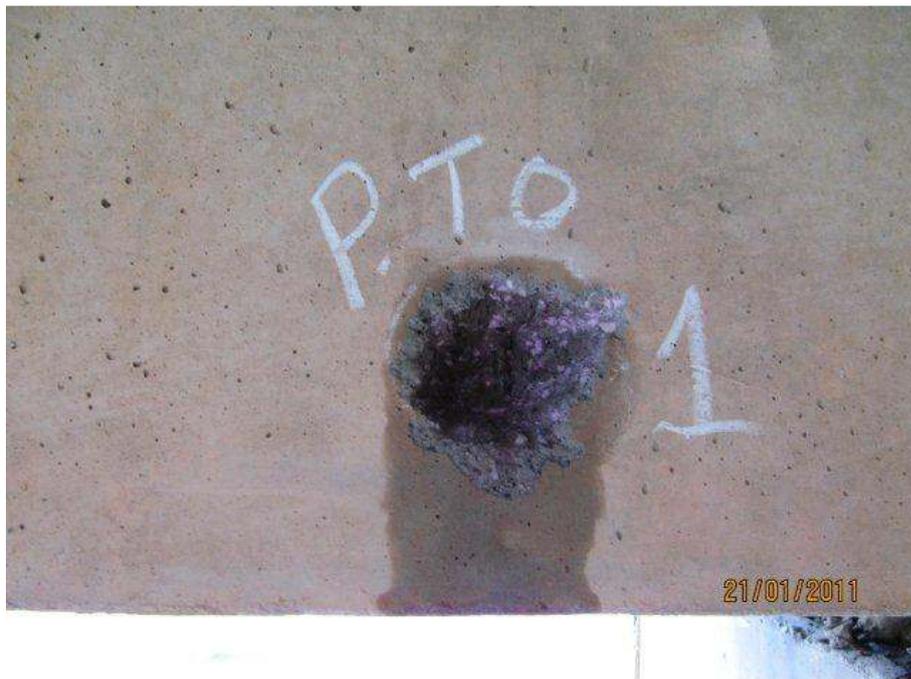
<b>Ano de construção:</b>		2009	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	2 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2011		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga longitudinal VL1, face Norte, a 1,60m do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	4	32	
2	Viga longitudinal VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP3 (concreto protendido pré-moldado).	6	63	
3	Apoio AP2, face Sul a 0,85m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	3	28	
4	Apoio AP4A, face Sul a 0,70m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	3	45	
5	Apoio AP2A, face Norte a 0,75m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	5	28	
6	Viga longitudinal VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP2A (concreto protendido pré-moldado).	5	45	

**Tabela 4.11:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio de carbonatação 2011 (elaboração própria, 2011).

SP-280 - km 031+800 - VIADUTO RAMO 700 - PISTA LESTE (2011)  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.67:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Croqui de posicionamento do ensaio 2011 (elaboração própria, 2011).



**Figura 4.68:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longitudinal VL1, face Norte, a 1,60m do encontro Leste (acervo Beltrame Engenharia, 2011).



**Figura 4.69:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga longitudinal VL4, face Sul, a 0,95m do apoio AP3 (acervo Beltrame Engenharia, 2011).



**Figura 4.70:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Viga longitudinal VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP3 (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.



**Figura 4.71:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Apoio AP2, face Sul a 0,85m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.



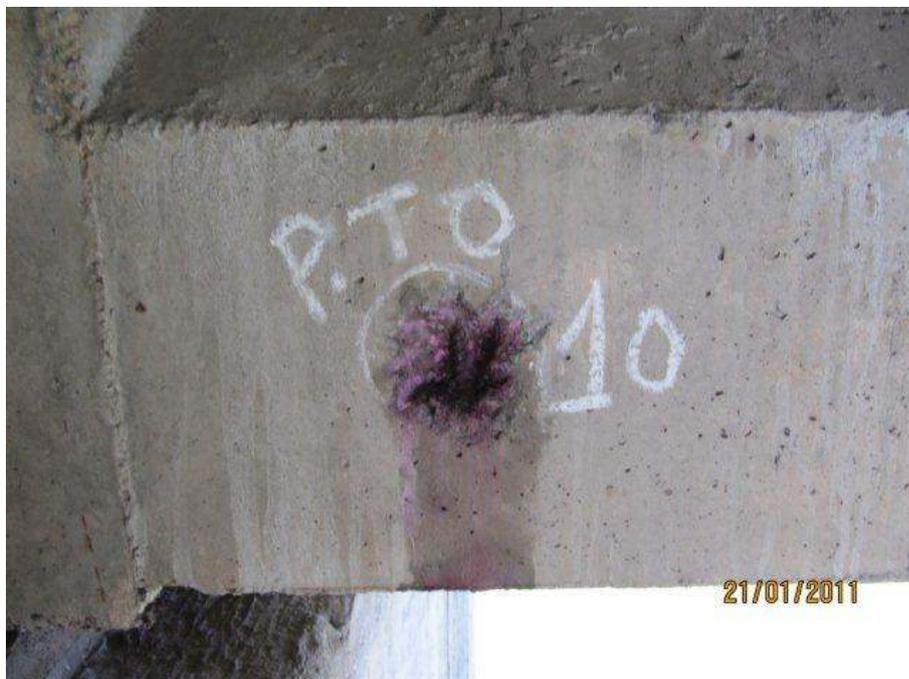
**Figura 4.72:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Apoio AP4A, face Sul a 0,70m do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.



**Figura 4.73:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 5 – Apoio AP2A, face Norte a 0,75m do solo. (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.



**Figura 4.74:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 6 – Viga longitudinal VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP2A. (acervo Beltrame Engenharia, 2011).

**Nota:** desconsiderar numeração da foto.

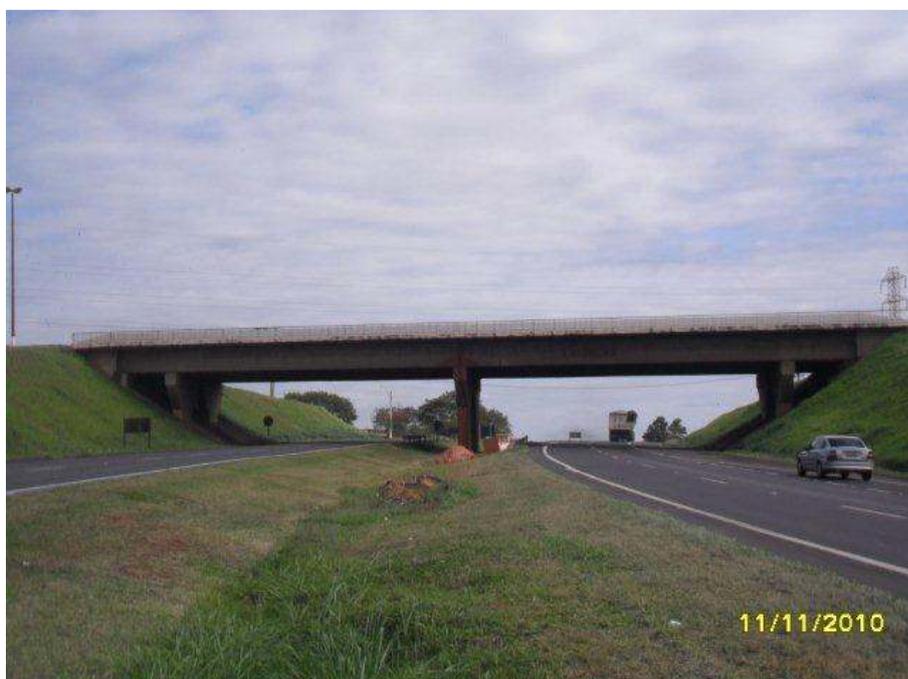
#### **4.2.10. SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal**

A Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal, situada na Rodovia Professor Zeferino Vaz, SP-332 – km 121+900, encontra-se entre as cidades de Paulínea e Arthur Nogueira no estado de São Paulo.

Trata-se de uma Obra de Arte Especial com comprimento total de 60,00m e largura de 10,00m. Possui superestrutura com arranjo estrutural do tipo duas vigas e mesoestrutura formada por 3 (três) linhas de apoio.

De acordo com projetos originais a obra apresenta fck igual a 15,00MPa para infraestrutura, 18,00MPa para superestrutura e 21,00MPa para mesoestrutura. A agressividade ambiental esta classificada como II – Moderada de acordo com a norma NBR 6118:2014.

A figura 4.75 ilustra a referida OAE.



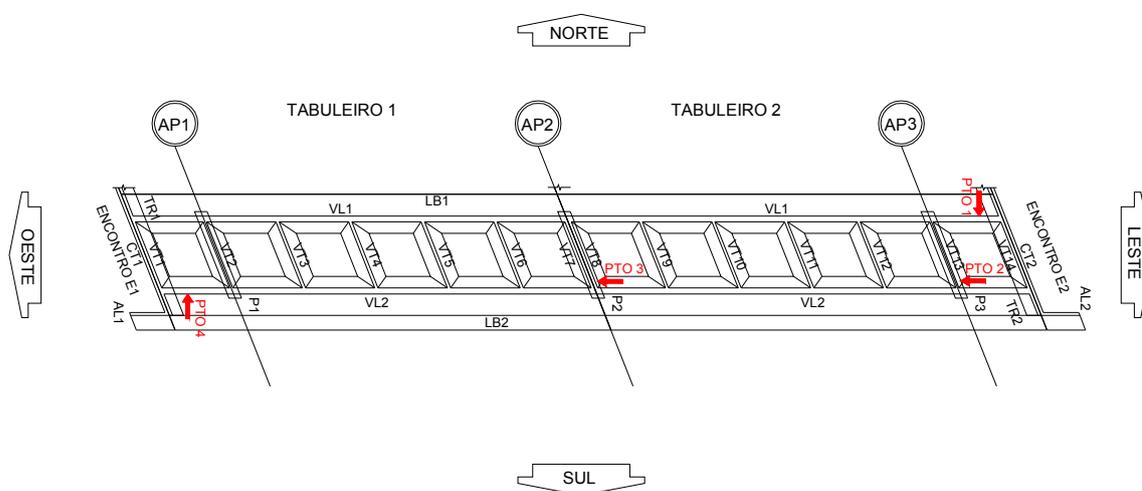
**Figura 4.75:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Vista geral da OAE (acervo Beltrame Engenharia, 2010).

Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, na tabela 4.12 e nas figuras 4.76 a 4.80.

<b>Ano de construção:</b>		1973	<b>Idade da obra na realização do ensaio:</b>	37 anos
<b>Ano de realização do ensaio:</b>		2010		
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura carbonatada (mm)</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço (mm)</b>	
1	Viga longarina VL1 – face Norte, a 0,90m da transversina VT14 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	21	30	
2	Pilar P3 – face Leste, a 0,95m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	32	35	
3	Pilar P2 – face Leste, a 1,00m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	23	40	
4	Viga longarina VL2 – face Sul, a 0,85m da transversina VT1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	27	25	

**Tabela 4.12:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio de carbonatação 2010 (elaboração própria, 2010).

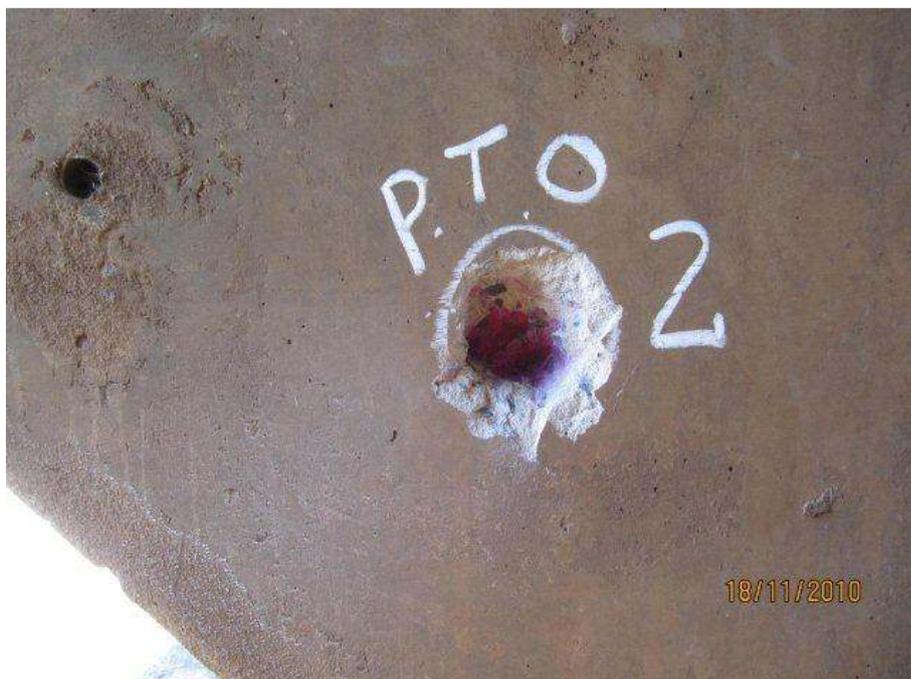
SP-332 - km 121+900 - PASSAGEM SUPERIOR - ACESSO A PAULINEA - TRANSVERSAL  
 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE ENSAIOS  
 DE DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



**Figura 4.76:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Croqui de posicionamento do ensaio 2010 (elaboração própria, 2010).



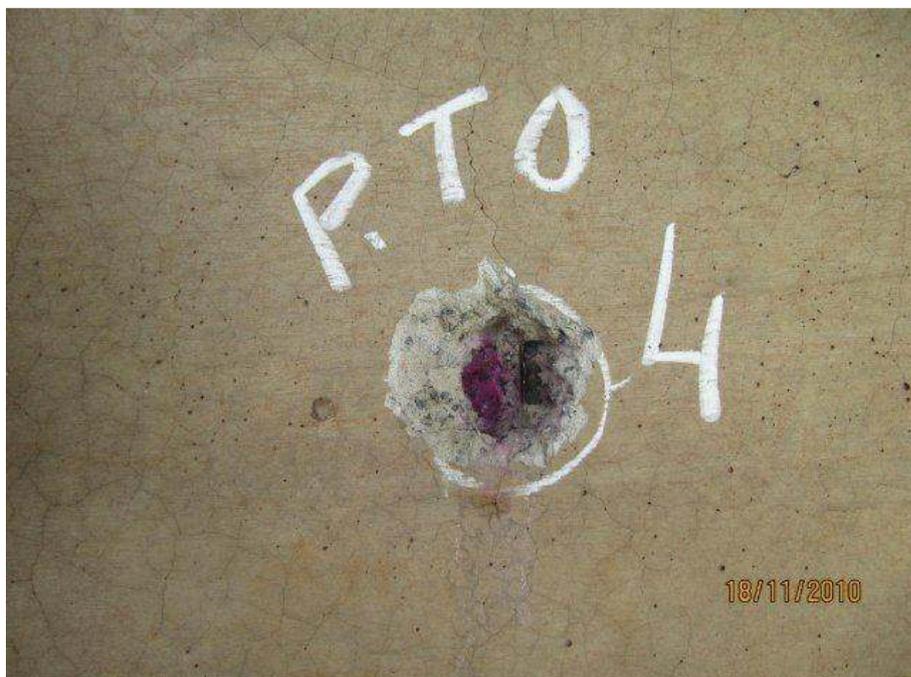
**Figura 4.77:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 1 – Viga longitudinal VL1 – face Norte a 0,90m da transversina VT14 (acervo Beltrame Engenharia, 2010).



**Figura 4.78:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 2 – Pilar P3 – face Leste a 0,95m de altura do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2010).



**Figura 4.79:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 3 – Pilar P2 – face Leste a 1,00m de altura do solo (acervo Beltrame Engenharia, 2010).



**Figura 4.80:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Ensaio para determinação da profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos tempos. Ponto 4 – Viga longitudinal VL2 – face Sul a 0,85m da transversina VT1 (acervo Beltrame Engenharia, 2010).

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir é apresentada a análise comparativa entre as dez (10) obras estudadas.

### 5.1. Cobrimentos

Como já foi discutido em capítulos anteriores, a espessura de cobertura é um dos parâmetros de grande importância para a durabilidade de uma estrutura de concreto, já que o revestimento do aço é uma barreira física e química aos agentes agressivos existentes no ambiente em que a estrutura se encontra.

No presente trabalho o critério de julgamento é a comparação da espessura de revestimento efetiva obtida na obra com o revestimento prescrito nas normas atuais (ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2006) e nas normas vigentes na época da construção.

Nos subitens a seguir é apresentada a análise de cada obra estudada.

#### 5.2.1. SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa

Para a OAE em questão foram realizados ensaios em 2009 e em 2013, portanto a obra estava com 7 e 11 anos, respectivamente, quando foram realizados os ensaios.

Comparando os revestimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2009 com a norma vigente na época da construção, é possível observar que apenas um (1) dos oito (8) elementos inspecionados, o ponto 8, não está em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:1980), e quatro (4) desses elementos, os pontos 2, 5, 6 e 7, estão em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.1.

Em relação ao ensaio realizado em 2013, fazendo a mesma comparação dos revestimentos encontrados nos elementos estruturais com a norma vigente na época da construção é possível observar que três (3) dos cinco (5) elementos inspecionados, os pontos 3, 4 e 5, estão em conformidade com a normalização

nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:1980) e com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.2.

**5.2.2. SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2009, portanto a obra estava com 8 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que apenas um (1) dos seis (6) elementos inspecionados não está em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2007) e também não está em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.3.

**5.2.3. SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2013, portanto a obra estava com 9 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que os quatro (4) elementos inspecionados estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2003) e também estão em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.4.

**5.2.4. SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2012, portanto a obra estava com 7 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que os quatro (4) elementos inspecionados dos quatro (4) elementos inspecionados apenas 1 (um), o ponto 3, está em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2003) e também não está em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.5.

#### **5.2.5. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2013, portanto a obra estava com 4 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que dos quatro (4) elementos inspecionados 2 (dois) estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2007), os pontos 1 e 2, e também estão em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.6.

#### **5.2.6. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2013, portanto a obra estava com 7 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que dos quatro (4) elementos inspecionados, apenas o ponto 1 está em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2003) e também está em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.7.

#### **5.2.7. SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2012, portanto a obra estava com 11 anos, quando foi realizado o ensaio com a norma vigente na época da construção, é possível observar que dois (2) dos quatro (4) elementos inspecionados, os pontos 1 e 3, estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:1980) e apenas um (1), o ponto 1, está em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.8.

**5.2.8. SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2007, portanto a obra estava com 9 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que os quatro (4) elementos inspecionados, estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:1980) e em comparação com a norma nacional vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), nenhum apenas o ponto 2 está em conformidade, conforme apresentado na tabela 5.9.

**5.2.9. SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2011, portanto a obra estava com 2 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção, é possível observar que dois (2) dos seis (6) elementos inspecionados, os pontos 3 e 5, estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (ABNT NBR 6118:2007) e também em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.10.

**5.2.10. SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal**

Comparando os cobrimentos encontrados nos elementos estruturais da OAE em 2014, portanto a obra estava com 37 anos quando foi realizado o ensaio, com a norma vigente na época da construção é possível observar que os quatro (4) elementos inspecionados, estão em conformidade com a normalização nacional vigente na época (NB1:1960). E apenas um (1) desses elementos, o ponto 47, não está em conformidade com a normalização vigente atualmente (ABNT NBR 6118:2014), conforme apresentado na tabela 5.11.

<b>OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa</b>				<b>Idade (anos):</b>		<b>7</b>	
<b>Ano de construção: 2002</b>				<b>Ano de realização do ensaio:</b>		<b>2009</b>	

<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)</b>	<b>Cobrimento - projeto (mm)</b>	<b>Cobrimento minimo NBR 6118:1980 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:1980 (mm)</b>	<b>Cobrimento minimo NBR 6118:2014 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)</b>
1	Viga longarina VL1 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,25m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	30	30	25	Conforme	35	Não conforme
2	Viga longarina VL2 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,40m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	40	30	25	Conforme	35	Conforme
3	Viga longarina VL3 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,45m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	30	25	Conforme	35	Não conforme
4	Viga travessa TR1 – face RB a 2,95m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	30	25	Conforme	30	Não conforme
5	Tubulão T4 – face RPM a 1,00m do solo (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	40	30	30	Conforme	30	Conforme
6	Viga longarina VL7 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,85m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	30	30	25	Conforme	30	Conforme

continuação

<b>OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa</b>					<b>Idade (anos):</b>	<b>7</b>	
<b>Ano de construção: 2002</b>					<b>Ano de realização do ensaio:</b>	<b>2009</b>	
<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)</b>	<b>Cobrimento - projeto (mm)</b>	<b>Cobrimento mínimo NBR 6118:1980 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:1980 (mm)</b>	<b>Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)</b>
7	Viga longarina VL6 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,20m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	35	30	25	Conforme	30	Conforme
8	Viga longarina VL5 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,25m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	20	30	25	Não conforme	30	Não conforme

**Tabela 5.1:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2009): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa		Idade (anos):	11
Ano de construção: 2002		Ano de realização do ensaio:	2013

Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:1980 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:1980 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga travessa TR1 - face RB, a 1,45m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	23	30	25	Não conforme	30	Não conforme
2	Viga longarina VL7 - face Interior, a 5,70m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	22	30	25	Não conforme	35	Não conforme
3	Pilar P4 do apoio AP2 - face RPM, a 0,70m do piso (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	43	30	25	Conforme	30	Conforme
4	Viga longarina VL1 - face Capital, a 1,30m da viga transversina VT5 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	40	30	25	Conforme	30	Conforme
5	Viga travessa TR3 - face RPM, a 2,60m do muro de ala AL4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	36	30	25	Conforme	30	Conforme

**Tabela 5.2:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (2013): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

<b>OAE:</b> SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)	<b>Idade (anos):</b> 8
<b>Ano de construção:</b> 2000	<b>Ano de realização do ensaio:</b> 2009

Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2007 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2007 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	30	Conforme	30	Conforme
2	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	42	25	35	Conforme	35	Conforme
3	Pilar P3 – face RB – a 1,20m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	30	30	Não conforme	30	Não conforme
4	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 2,95m do apoio 4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	40	25	35	Conforme	35	Conforme
5	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	30	Conforme	30	Conforme
6	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	42	25	35	Conforme	35	Conforme

**Tabela 5.3:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (RB – RPM): Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte					Idade (anos): 9		
Ano de construção: 2005					Ano de realização do ensaio: 2014		
Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2003 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2003 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Borda de laje, vão 1 - face Leste a 0,40m da TR1 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	70	30	25	Conforme	30	Conforme
2	Pilar P2, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	51	40	30	Conforme	30	Conforme
3	Pilar P3, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	50	40	30	Conforme	30	Conforme
4	Borda de laje vão 3 - face Leste a 0,10m da TR4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	48	30	25	Conforme	30	Conforme

**Tabela 5.4:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

<b>OAE:</b> SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste	<b>Idade (anos):</b> 7
<b>Ano de construção:</b> 2005	<b>Ano de realização do ensaio:</b> 2012

<b>Ponto</b>	<b>Local</b>	<b>Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)</b>	<b>Cobrimento - projeto (mm)</b>	<b>Cobrimento mínimo NBR 6118:2003 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2003 (mm)</b>	<b>Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)</b>	<b>Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)</b>
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 1,00m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	35	30	Não conforme	30	Não conforme
2	Viga longarina VL1 - face Sul, a 1,15m da viga travessa TR1 (concreto protendido pré-moldado).	30	35	35	Não conforme	35	Não conforme
3	Viga travessa TR2 - face Leste, a 2,25m do muro de ala AL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	35	30	Conforme	30	Conforme
4	Viga longarina VL6 - face Norte, a 0,80m da viga travessa TR2 (concreto protendido pré-moldado).	30	35	35	Não conforme	35	Não conforme

**Tabela 5.5:** SP-270 – km 088+800 – Pista Leste/Oeste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste	Idade (anos): 4
Ano de construção: 2009	Ano de realização do ensaio: 2013

Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2007 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2007 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga longarina VL1 – face Sul, a 1,50m da cortina CT1 (concreto protendido pré-moldado).	38	35	35	Conforme	35	Conforme
2	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,80m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	38	35	30	Conforme	30	Conforme
3	Viga travessa TR3 – face Leste, a 0,70m do talude do encontro ENC2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	35	30	Não conforme	35	Não conforme
4	Viga longarina VL5 – face Norte, a 1,50m da cortina CT2 (concreto protendido pré-moldado).	22	35	35	Não conforme	30	Não conforme

**Tabela 5.6:** SP-270 – km 098+350 – Marginal Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste					Idade (anos): 7		
Ano de construção: 2006					Ano de realização do ensaio: 2013		
Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2003 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2003 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,83m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	35	30	Conforme	30	Conforme
2	Viga longarina VL5 – face Norte, a 2,50m da viga transversina VT1 (concreto protendido pré-moldado).	31	35	35	Não conforme	35	Não conforme
3	Pilar P2 do apoio AP2 - face Oeste, a 1,00m do piso (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	26	35	30	Não conforme	30	Não conforme
4	Viga longarina VL1 - face Sul, a 6,00m da viga transversina VT4 (concreto protendido pré-moldado).	30	35	35	Não conforme	35	Não conforme

**Tabela 5.7:** SP-270 – km 098+350 – Pista Oeste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2003 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste					Idade (anos): 11		
Ano de construção: 2001					Ano de realização do ensaio: 2012		
Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento minimo NBR 6118:1980 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:1980 (mm)	Cobrimento minimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 2,15m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	35	25	25	Conforme	30	Conforme
2	Viga longarina VL1 - face Sul, a 5,10m do apoio AP1 (concreto protendido, pré-moldado).	17	25	25	Não conforme	35	Não conforme
3	Viga travessa TR2 - face Oeste, a 0,45m da viga longarina VL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	27	25	25	Conforme	30	Não conforme
4	Viga longarina VL7 - face Norte, a 7,50m do apoio AP3 (concreto protendido, pré-moldado).	22	25	25	Não conforme	35	Não conforme

**Tabela 5.8:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste: Comparativo do cobrimento medido “in loco” com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste	Idade (anos): 9
Ano de construção: 1998	Ano de realização do ensaio: 2007

Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:1980 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:1980 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga longitudinal VL8, face Sul a 1,75m da cortina do encontro Oeste (concreto protendido pré-moldado).	25	30	25	Conforme	35	Não conforme
2	Viga travessa do encontro Oeste, face Leste a 2,20m da face Sul (concreto armado <i>in loco</i> ).	30	30	25	Conforme	30	Conforme
3	Viga longitudinal VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	34	30	25	Conforme	35	Não conforme
4	Viga travessa do encontro Leste, face Oeste a 2,40m da face Norte (concreto armado <i>in loco</i> ).	25	30	25	Conforme	30	Não conforme

**Tabela 5.9:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:1980 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste					Idade (anos): 2		
Ano de construção: 2009					Ano de realização do ensaio: 2011		
Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento minimo NBR 6118:2007 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR6118:2007 (mm)	Cobrimento minimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga longarina VL1, face Norte, a 1,60m do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	32	35	35	Não conforme	35	Não conforme
2	Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP3 (concreto protendido pré-moldado).	28	35	35	Não conforme	35	Não conforme
3	Apoio AP2, face Sul a 0,85m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	45	35	30	Conforme	30	Conforme
4	Apoio AP4A, face Sul a 0,70m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	18	35	30	Não conforme	30	Não conforme
5	Apoio AP2A, face Norte a 0,75m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	55	35	30	Conforme	30	Conforme
6	Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP2A (concreto protendido pré-moldado).	18	35	35	Não conforme	35	Não conforme

**Tabela 5.10:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

OAE: SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal					Idade (anos): 37		
Ano de construção: 1973					Ano de realização do ensaio: 2010		
Ponto	Local	Espessura de cobrimento do aço "in loco" (mm)	Cobrimento - projeto (mm)	Cobrimento mínimo NB1 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NB1 (mm)	Cobrimento mínimo NBR 6118:2014 (mm)	Comparação cobr. executado x cobr. mín. NBR 6118:2014 (mm)
1	Viga longarina VL1 – face Norte, a 0,90m da transversina VT14 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	20	20	Conforme	30	Conforme
2	Pilar P3 – face Leste, a 0,95m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	35	20	20	Conforme	30	Conforme
3	Pilar P2 – face Leste, a 1,00m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	40	20	20	Conforme	30	Conforme
4	Viga longarina VL2 – face Sul, a 0,85m da transversina VT1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	20	20	Conforme	30	Não conforme

**Tabela 5.11:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal: Comparativo do cobrimento medido "in loco" com a NB1:1960 e ABNT NBR 6118:2014 (elaboração própria, 2014).

## **5.2. Profundidade de carbonatação**

Foram realizados ensaios em diversos pontos da estrutura de cada OAE, com o objetivo de determinar a profundidade atingida pela carbonatação do concreto ao longo dos anos, conforme descrito no item 4.1.

O objetivo principal destes ensaios foi o de obter informação se a carbonatação chegou ou não até a armadura nas áreas sem corrosão do aço e realizar o cálculo do tempo de vida útil remanescente através do modelo clássico de previsão da carbonatação descrito no item 3.1.

### **5.2.1. SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa**

Para a OAE em questão foram realizados ensaios em 2009 e em 2013. Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.1 deste trabalho.

Em relação aos ensaios realizados em 2009, estes apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas longarinas, vigas travessas e tubulões variando entre 9mm e 24mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que o concreto de cobertura das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.12 e as figuras 5.1 e 5.2 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

Com relação aos ensaios realizados em 2013, os ensaios realizados nos pontos 2 a 5 apresentaram valores de espessura de carbonatação entre 18 e 26mm, o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobertura das armaduras está acima destes valores. Especificamente para o ensaio realizado na viga travessa TR1 (ponto 1), a espessura de carbonatação apresentou valor superior a 23mm, e nesta espessura já se atingiu a armadura da peça, portanto, as barra de aço encontram-se suscetíveis à corrosão.

Além disso, para a viga travessa TR1 foi realizado o ensaio em 2009 e 2011 e é possível observar que não houve diferença na espessura carbonatada.

A tabela 5.13 e as figuras 5.3 e 5.4 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

### **5.2.2. SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.2 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 11 a 19mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobertura das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.14 e as figuras 5.5 e 5.6 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

### **5.2.3. SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.3 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 34 a 59mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobertura das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.15 e as figuras 5.7 e 5.8 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.4. SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.4 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 10 a 15mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobertura das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.16 e as figuras 5.9 e 5.10 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.5. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.5 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 7 a 15mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobertura das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.17 e as figuras 5.11 e 5.12 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.6. SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.6 deste trabalho.

Os ensaios realizados nos pontos 1, 2 e 4 apresentaram valores de espessura de carbonatação entre 12 e 25mm, o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

Especificamente para o ensaio realizado no pilar P2 do apoio AP2 (ponto 3), a espessura de carbonatação apresentou valor superior a 26mm, e nesta espessura já se atingiu a armadura da peça, portanto, as barras de aço encontram-se suscetíveis à corrosão.

A tabela 5.18 e as figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.7. SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.7 deste trabalho.

Os ensaios realizados nos pontos 1 e 4 apresentaram valores de espessura de carbonatação entre 15mm, o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

Especificamente para os ensaios realizados nos pontos 2 (viga longitudinal VL1) e 3 (viga travessa TR2) apresentaram valores de 20 e 30mm, respectivamente, e nesta espessura já se atingiu a armadura da peça, portanto, as barras de aço encontram-se suscetíveis à corrosão nesses locais.

A tabela 5.19 e as figuras 5.15 e 5.16 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.8. SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.8 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 2 a 13mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.20 e as figuras 5.17 e 5.18 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.9. SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.9 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 4 a 10mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

A tabela 5.21 e as figuras 5.19 e 5.20 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

#### **5.2.10. SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal**

Os pontos para verificação da profundidade de carbonatação e os resultados foram apresentados no item 4.2.10 deste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram valores de espessura de carbonatação para as vigas travessas, almas da seção celular e pilares variando entre 21 a 32mm o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

Os ensaios realizados nos pontos 1, 2 e 3 apresentaram valores de espessura de carbonatação entre 21 e 32mm, o que no presente caso não representa comprometimento da proteção das armaduras, já que a espessura de cobrimento das armaduras está acima destes valores.

Especificamente para o ensaio realizado na viga longarina VL2 – face Sul (ponto 4), a espessura de carbonatação apresentou valor superior a 24mm, e nesta espessura já se atingiu a armadura da peça, portanto, as barras de aço encontram-se suscetíveis à corrosão.

A tabela 5.22 e as figuras 5.21 e 5.22 mostram os resultados obtidos da espessura de carbonatação, da previsão da espessura carbonatada aos 50 anos e do cálculo de vida útil.

OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa		Idade (anos):	7
Ano de construção: 2002		Ano de realização do ensaio:	2009

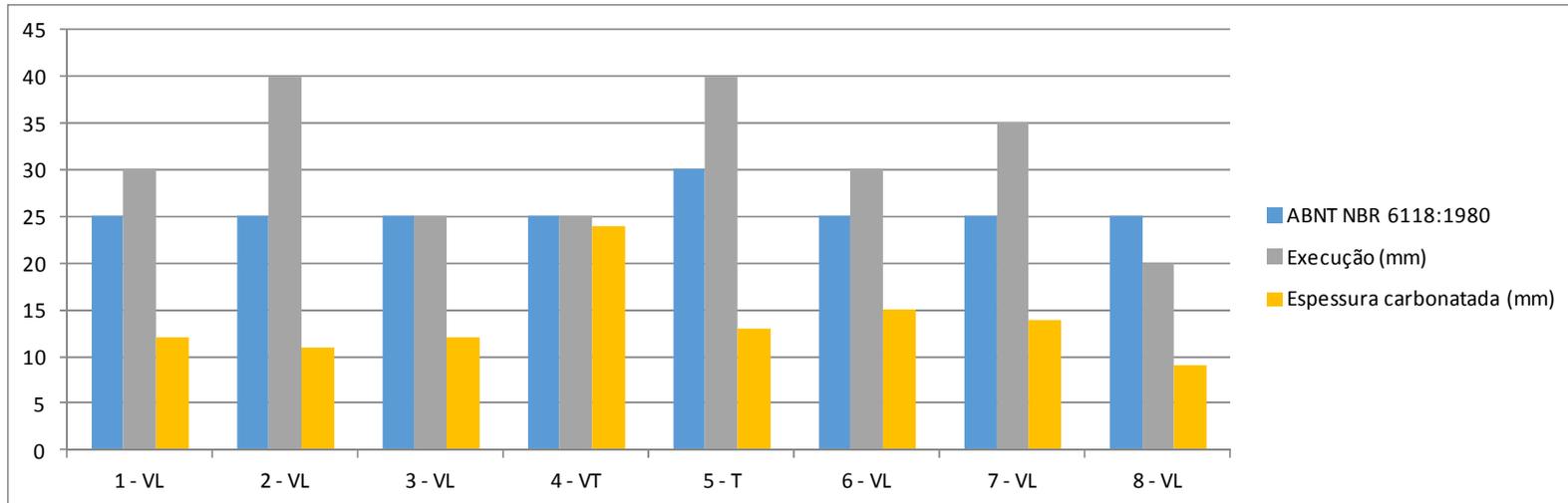
Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:1980	Execução (mm)						
1	Viga longarina VL1 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,25m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	30	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	32,07	4,54	43,75	36,75
2	Viga longarina VL2 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,40m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	40	11	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	29,40	4,16	92,56	85,56
3	Viga longarina VL3 – face Capital – Tabuleiro 1 a 1,45m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	25	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	32,07	4,54	30,38	23,38
4	Viga travessa TR1 – face RB a 2,95m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	25	24	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	64,14	9,07	7,60	0,60
5	Tubulão T4 – face RPM a 1,00m do solo (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	30	40	13	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	34,74	4,91	66,27	59,27
6	Viga longarina VL7 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,85m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	30	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	40,09	5,67	28,00	21,00

continuação

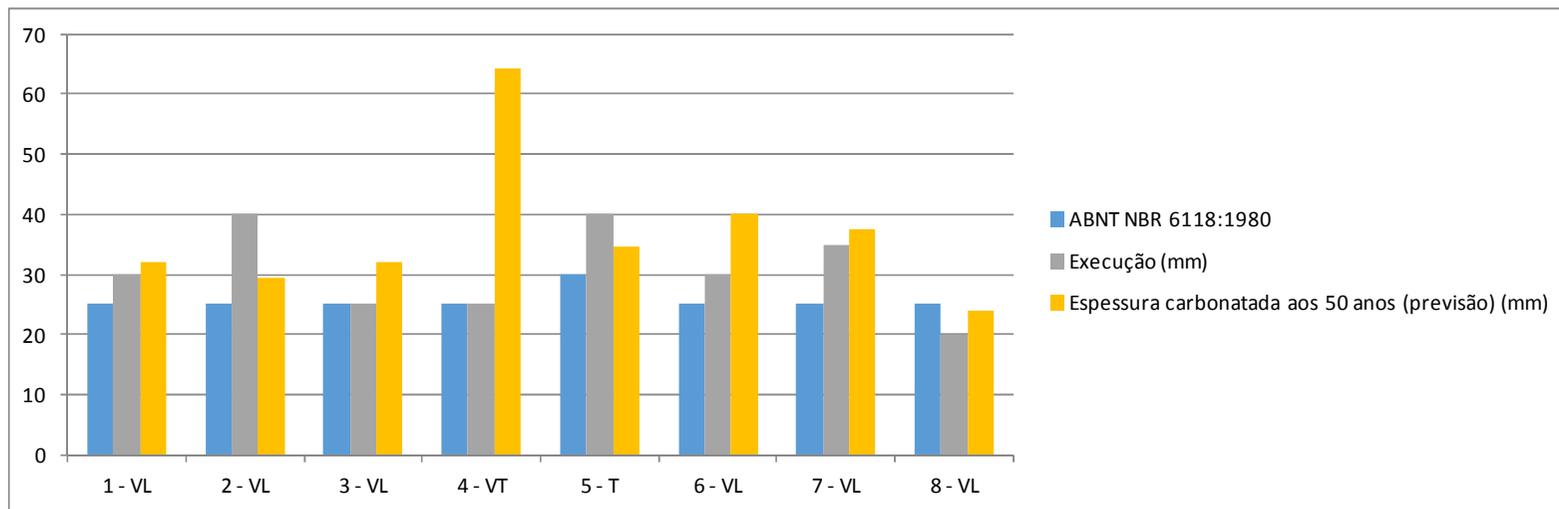
<b>OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa</b>	<b>Idade (anos):</b>	<b>7</b>
<b>Ano de construção: 2002</b>	<b>Ano de realização do ensaio:</b>	<b>2009</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:1980	Execução (mm)						
7	Viga longarina VL6 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,20m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	35	14	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	37,42	5,29	43,75	36,75
8	Viga longarina VL5 – face Interior – Tabuleiro 2 a 1,25m da viga transversina VT4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	20	9	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	24,05	3,40	34,57	27,57

**Tabela 5.12:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.1:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

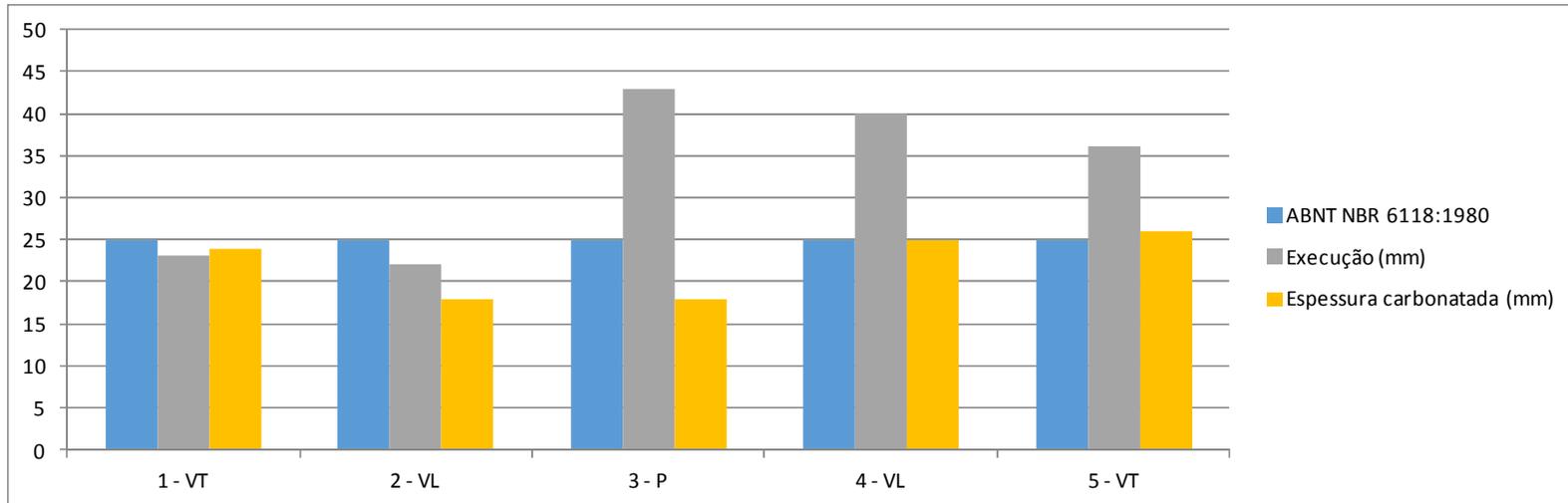


**Figura 5.2:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

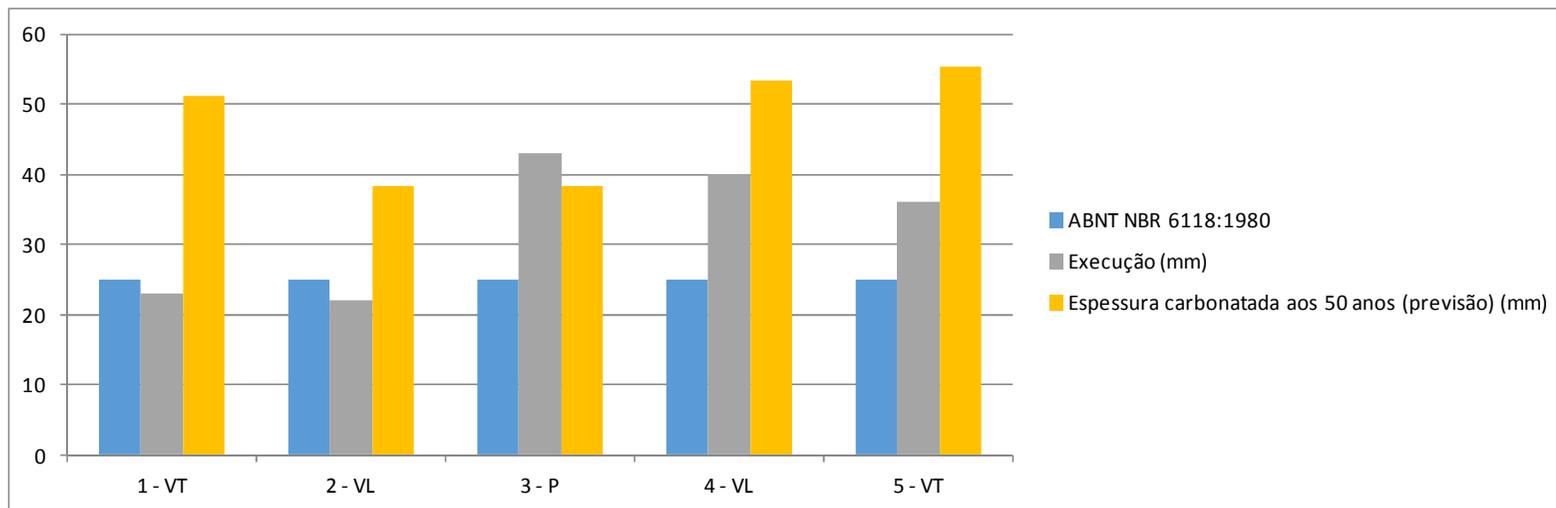
OAE: SP-021 – km 013+000 – Ponte – Pista Externa	Idade (anos): 11
Ano de construção: 2002	Ano de realização do ensaio: 2013

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:1980	Execução (mm)						
1	Viga travessa TR1 - face RB, a 1,45m do muro de ala AL1 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	23	24	Representa comprometimento da proteção das armaduras.	51,17	7,24	10,10	-0,90
2	Viga longarina VL7 - face Interior, a 5,70m da viga transversina VT1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	22	18	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	38,38	5,43	16,43	5,43
3	Pilar P4 do apoio AP2 - face RPM, a 0,70m do piso (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	43	18	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	38,38	5,43	62,77	51,77
4	Viga longarina VL1 - face Capital, a 1,30m da viga transversina VT5 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	40	25	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	53,30	7,54	28,16	17,16
5	Viga travessa TR3 - face RPM, a 2,60m do muro de ala AL4 (concreto armado, moldado <i>in loco</i> ).	25	36	26	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	55,43	7,84	21,09	10,09

**Tabela 5.13:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.3:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

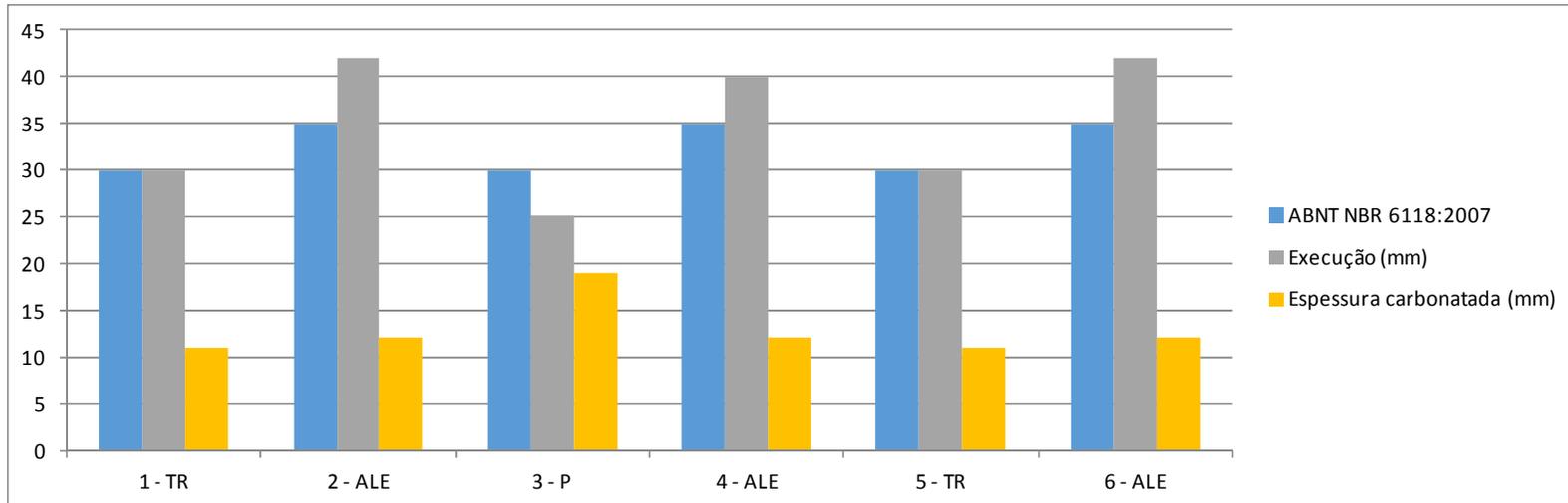


**Figura 5.4:** SP-021 - km 013+000 – Pista Externa (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

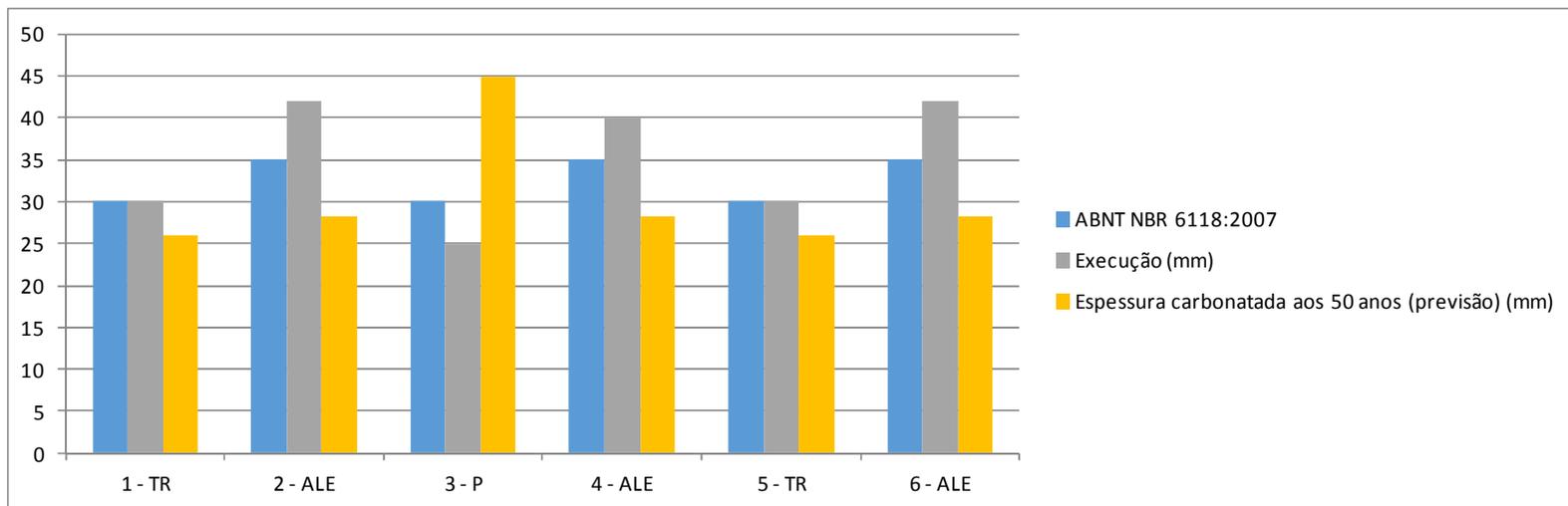
OAE: SP-021 – km 029+300 - Passagem Inferior sobre BR 116 – Alça 04 (Ramo 1195) - Pista Interna (RB - RPM)	Idade (anos): 8
Ano de construção: 2000	Ano de realização do ensaio: 2009

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2007	Execução (mm)						
1	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	11	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	25,93	3,67	66,94	57,94
2	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	35	42	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	28,28	4,00	110,25	101,25
3	Pilar P3 – face RB – a 1,20m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	25	19	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	44,78	6,33	15,58	6,58
4	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 2,95m do apoio 4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	35	40	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	28,28	4,00	100,00	91,00
5	Viga travessa TR2 – face RPM – a 1,80m da viga longarina VL1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	11	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	25,93	3,67	66,94	57,94
6	Alma da seção celular VL1 – face Capital – a 1,00m do apoio 5 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	35	42	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	28,28	4,00	110,25	101,25

**Tabela 5.14:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.5:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

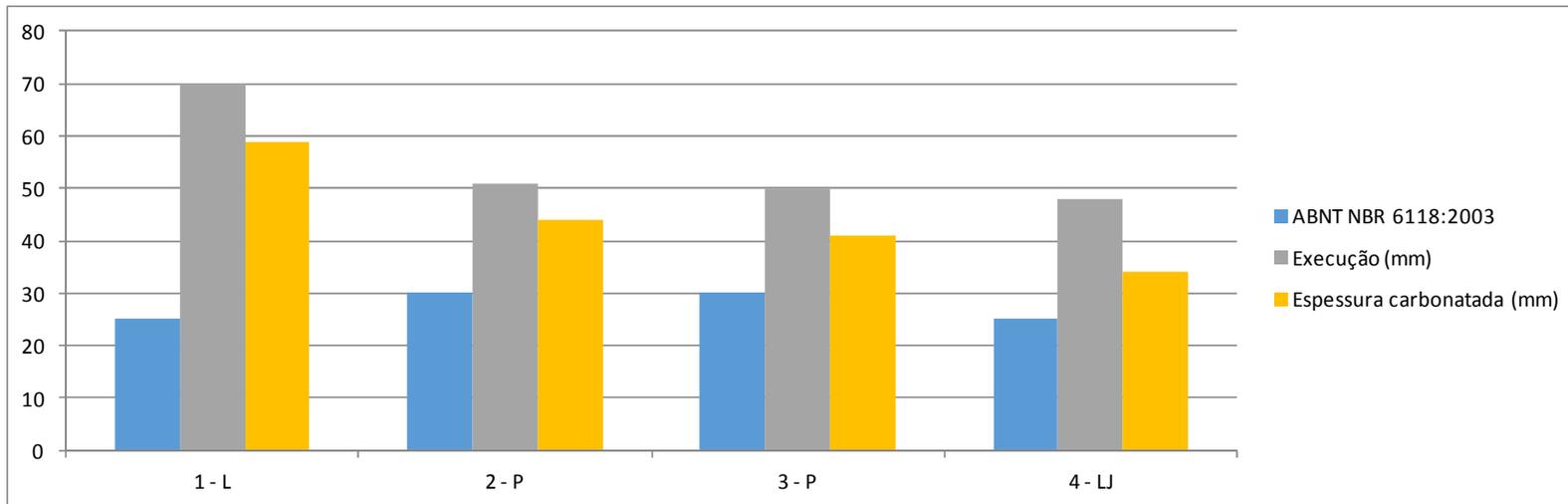


**Figura 5.6:** SP-021 – km 029+300 - Pista Interna (Ensaio realizado em 2009): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

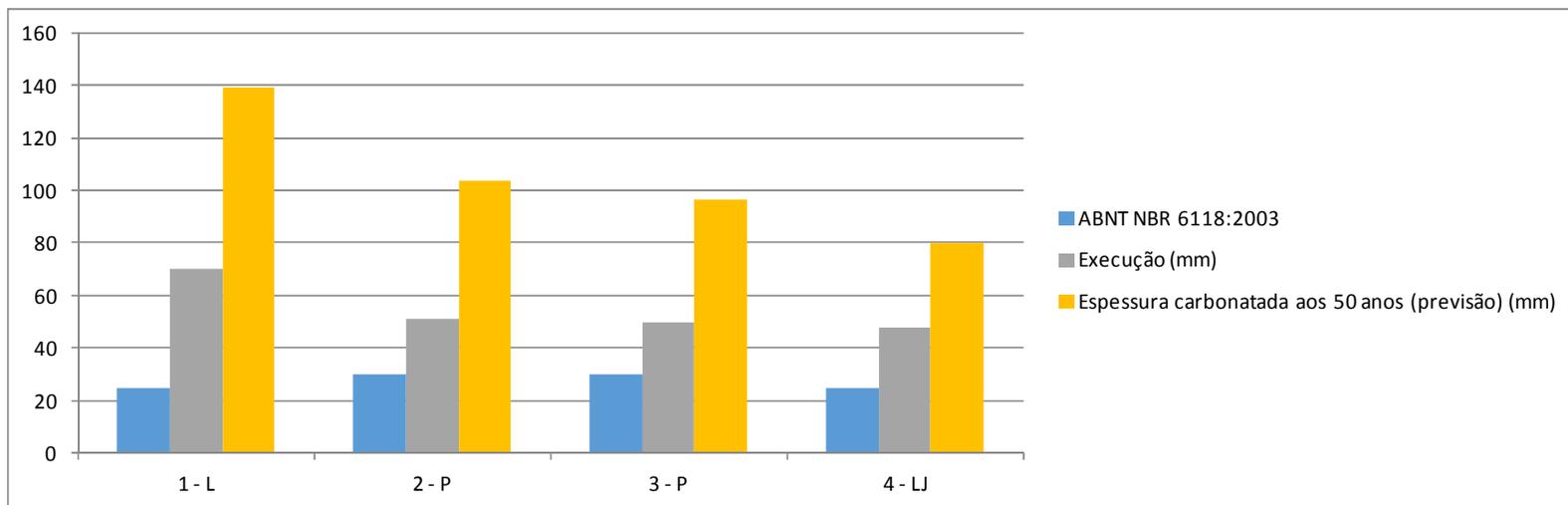
OAE: SP-150 – km 029+422 - Ponte sobre Riacho Grande – Pista Norte	Idade (anos): 9
Ano de construção: 2005	Ano de realização do ensaio: 2014

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2003	Execução (mm)						
1	Borda de laje, vão 1 - face Leste a 0,40m da TR1 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	25	70	59	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	139,06	19,67	12,67	3,67
2	Pilar P2, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	51	44	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	103,71	14,67	12,09	3,09
3	Pilar P3, face Norte a 0,90m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	50	41	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	96,64	13,67	13,38	4,38
4	Borda de laje vão 3 - face Leste a 0,10m da TR4 (concreto protendido moldado <i>in loco</i> ).	25	48	34	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	80,14	11,33	17,94	8,94

**Tabela 5.15:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.7:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

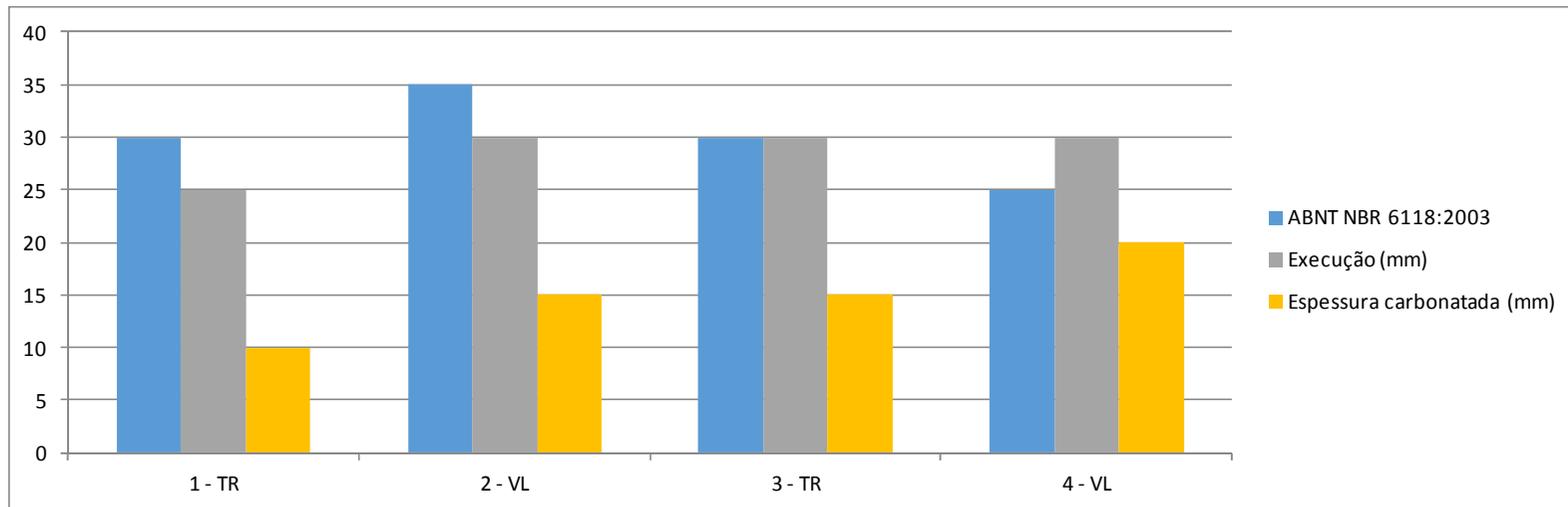


**Figura 5.8:** SP-150 – km 029+422 – Pista Norte (Ensaio realizado em 2014): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

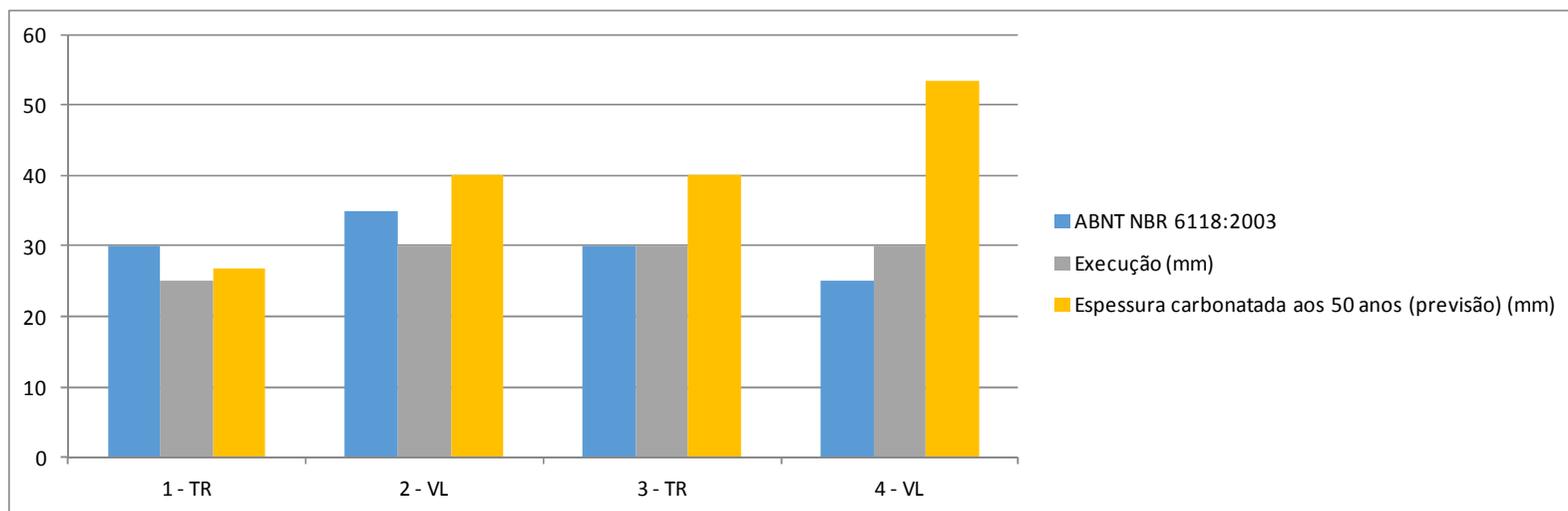
<b>OAE:</b> SP-270 – km 088+800 - Passagem Inferior - Viaduto Waldomiro de Arruda Marins – Pista Leste/Oeste	<b>Idade (anos):</b> 7
<b>Ano de construção:</b> 2005	<b>Ano de realização do ensaio:</b> 2012

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2003	Execução (mm)						
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 1,00m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	25	10	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	26,73	3,78	43,75	36,75
2	Viga longarina VL1 - face Sul, a 1,15m da viga travessa TR1 (concreto protendido pré-moldado).	35	30	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	40,09	5,67	28,00	21,00
3	Viga travessa TR2 - face Leste, a 2,25m do muro de ala AL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	40,09	5,67	28,00	21,00
4	Viga longarina VL6 - face Norte, a 0,80m da viga travessa TR2 (concreto protendido pré-moldado).	25	30	20	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	53,45	7,56	15,75	8,75

**Tabela 5.16:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.9:** SP SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

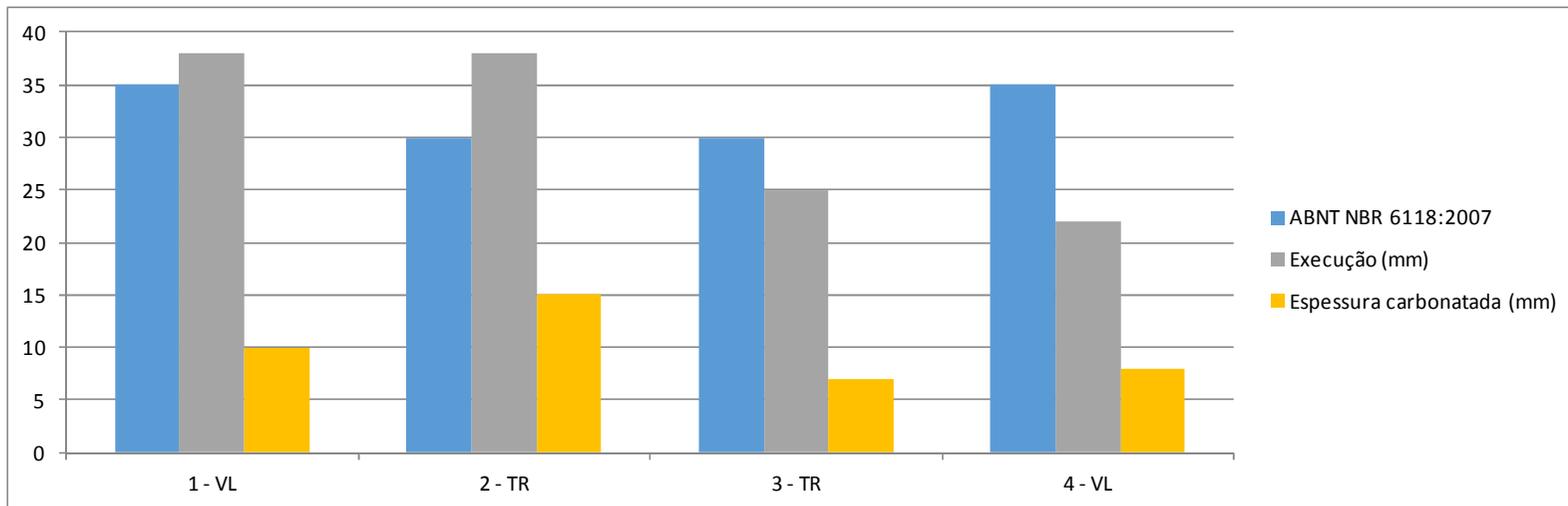


**Figura 5.10:** SP-270 - km 088+800 - Leste/Oeste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

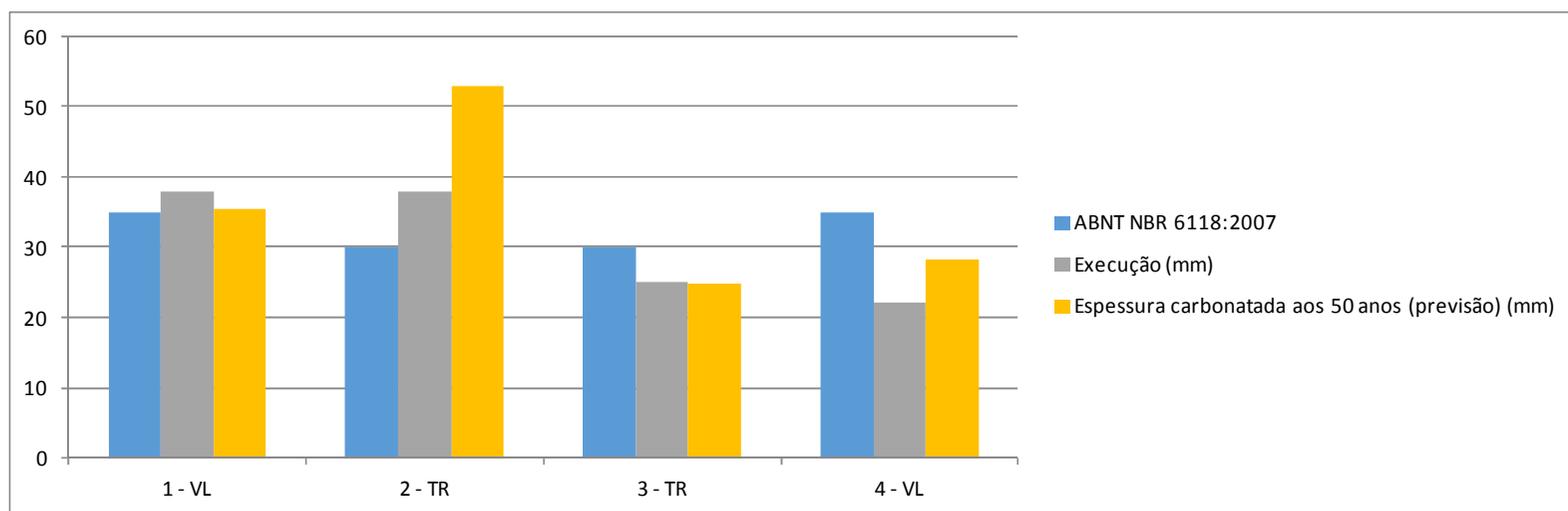
<b>OAE: SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Marginal Leste</b>	<b>Idade (anos): 4</b>
<b>Ano de construção: 2009</b>	<b>Ano de realização do ensaio: 2013</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2007	Execução (mm)						
1	Viga longarina VL1 – face Sul, a 1,50m da cortina CT1 (concreto protendido pré-moldado).	35	38	10	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	35,36	5,00	57,76	53,76
2	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,80m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	38	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	53,03	7,50	25,67	21,67
3	Viga travessa TR3 – face Leste, a 0,70m do talude do encontro ENC2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	25	7	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	24,75	3,50	51,02	47,02
4	Viga longarina VL5 – face Norte, a 1,50m da cortina CT2 (concreto protendido pré-moldado).	35	22	8	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	28,28	4,00	30,25	26,25

**Tabela 5.17:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.11:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

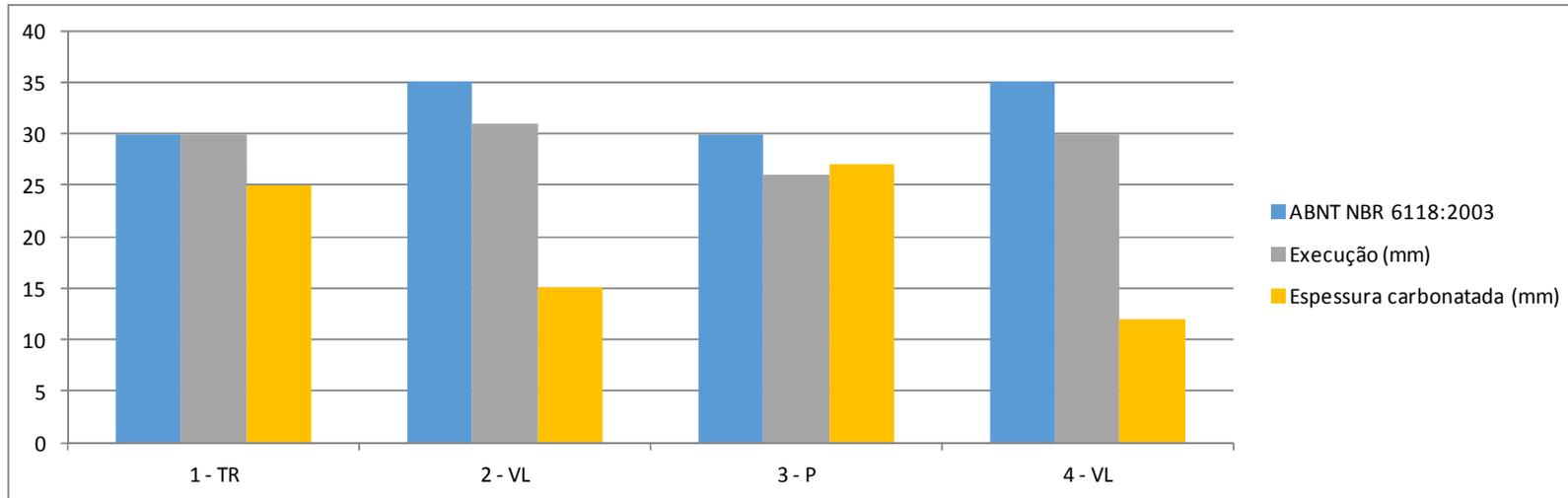


**Figura 5.12:** SP-270 - km 098+350 – Marginal Leste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

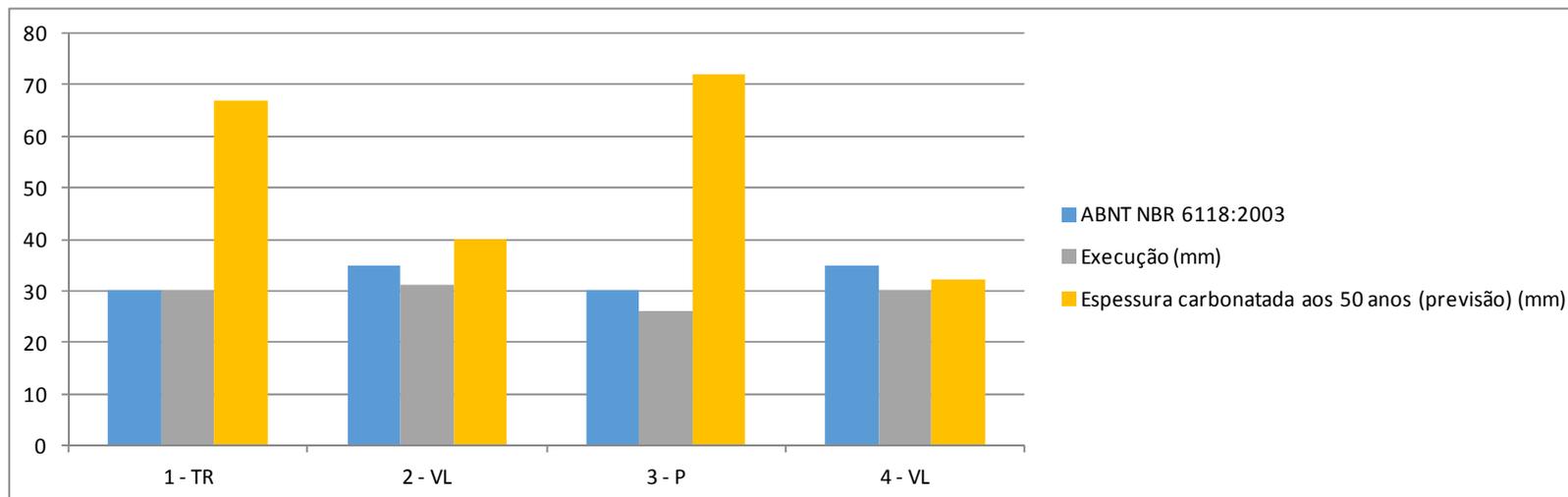
OAE: SP-270 – km 098+350 – Viaduto sobre linha férrea e estrada municipal – Pista Oeste	Idade (anos): 7
Ano de construção: 2006	Ano de realização do ensaio: 2013

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2003	Execução (mm)						
1	Viga travessa TR1 – face Oeste, a 0,83m do talude do encontro ENC1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	30	25	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	66,82	9,45	10,08	3,08
2	Viga longarina VL5 – face Norte, a 2,50m da viga transversina VT1 (concreto protendido pré-moldado).	35	31	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	40,09	5,67	29,90	22,90
3	Pilar P2 do apoio AP2 - face Oeste, a 1,00m do piso (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	26	27	Representa comprometimento da proteção das armaduras	72,16	10,21	6,49	-0,51
4	Viga longarina VL1 - face Sul, a 6,00m da viga transversina VT4 (concreto protendido pré-moldado).	35	30	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	32,07	4,54	43,75	36,75

**Tabela 5.18:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.13:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

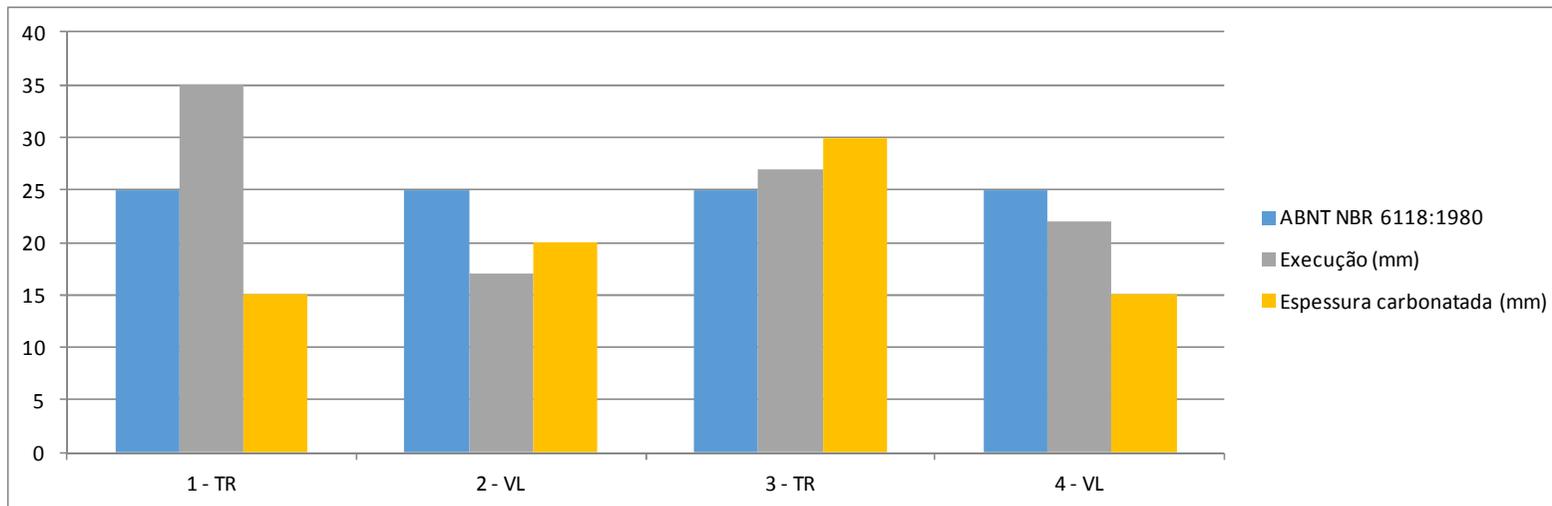


**Figura 5.14:** SP-270 - km 098+350 – Pista Oeste (Ensaio realizado em 2013): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2003 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

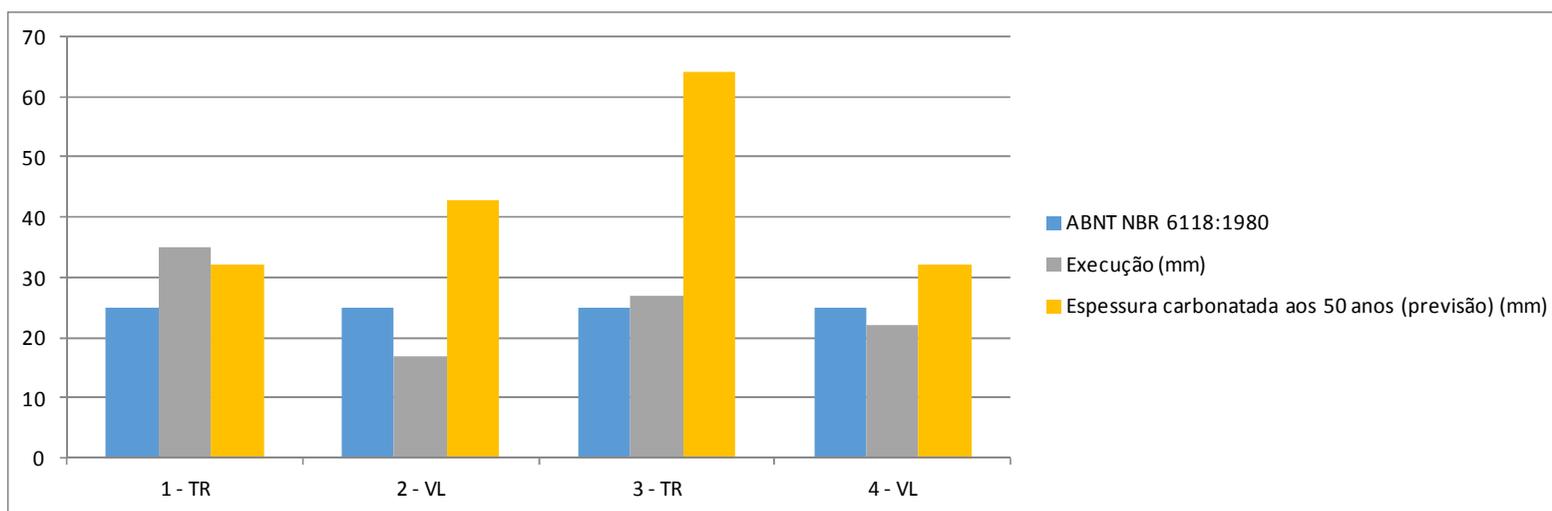
<b>OAE: SP-280 – km 019+280 - Viaduto sobre ramos do Rodoanel – Pista Leste</b>	<b>Idade (anos): 11</b>
<b>Ano de construção: 2001</b>	<b>Ano de realização do ensaio: 2012</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:1980	Execução (mm)						
1	Viga travessa TR1 - face Oeste, a 2,15m do muro de ala AL2 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	35	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	31,98	4,52	59,89	48,89
2	Viga longarina VL1 - face Sul, a 5,10m do apoio AP1 (concreto protendido, pré-moldado).	25	17	20	Representa comprometimento da proteção das armaduras	42,64	6,03	7,95	-3,05
3	Viga travessa TR2 - face Oeste, a 0,45m da viga longarina VL3 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	25	27	30	Representa comprometimento da proteção das armaduras	63,96	9,05	8,91	-2,09
4	Viga longarina VL7 - face Nor-te, a 7,50m do apoio AP3 (concreto protendido, pré-moldado).	25	22	15	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	31,98	4,52	23,66	12,66

**Tabela 5.19:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.15:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

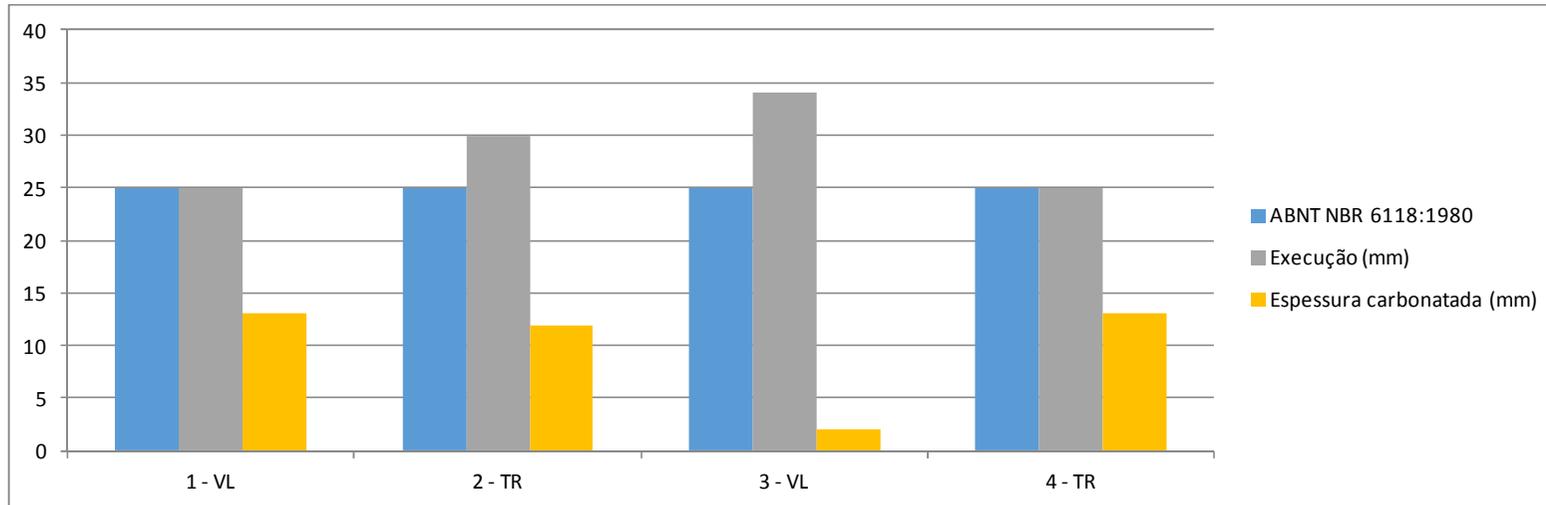


**Figura 5.16:** SP-280 – km 019+280 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2012): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

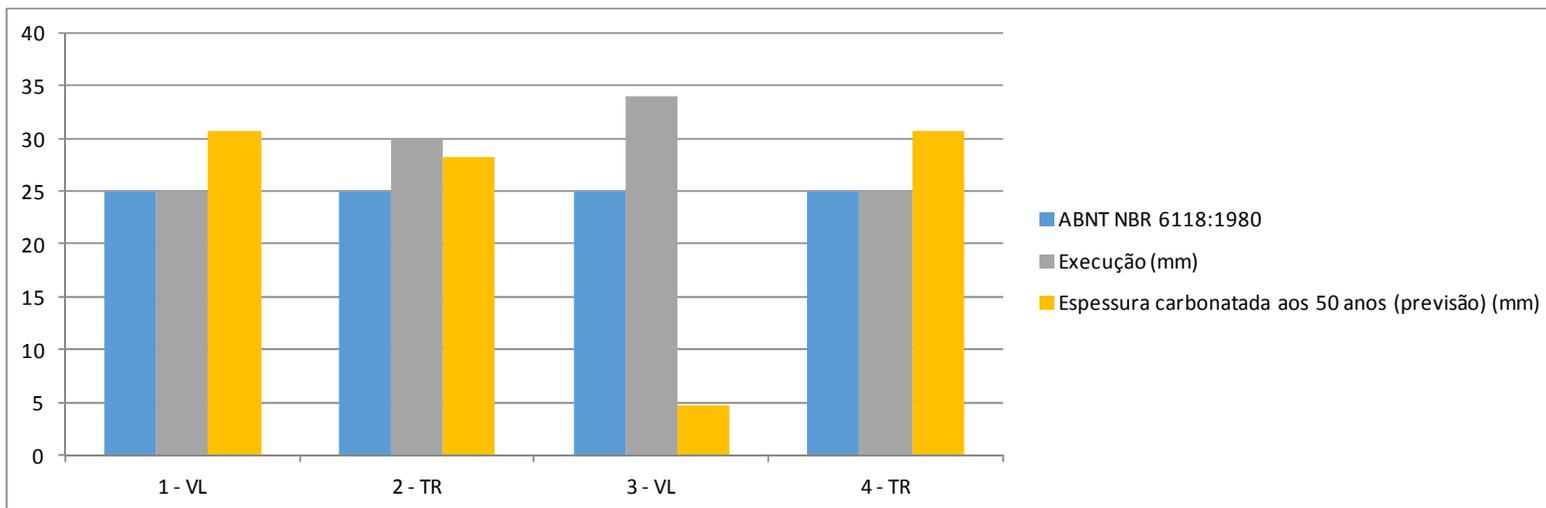
<b>OAE: SP-280 - km 021+860 - Viaduto de acesso a Tamboré - Marginal Leste</b>	<b>Idade (anos): 9</b>
<b>Ano de construção: 1998</b>	<b>Ano de realização do ensaio: 2007</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:1980	Execução (mm)						
1	Viga longarina VL8, face Sul a 1,75m da cortina do encontro Oeste (concreto protendido pré-moldado).	25	25	13	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	30,64	4,33	33,28	24,28
2	Viga travessa do encontro Oeste, face Leste a 2,20m da face Sul (concreto armado <i>in loco</i> ).	25	30	12	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	28,28	4,00	56,25	47,25
3	Viga longarina VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	25	34	2	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	4,71	0,67	2.601,00	2.592,00
4	Viga travessa do encontro Leste, face Oeste a 2,40m da face Norte (concreto armado <i>in loco</i> ).	25	25	13	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	30,64	4,33	33,28	24,28

**Tabela 5.20:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.17:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

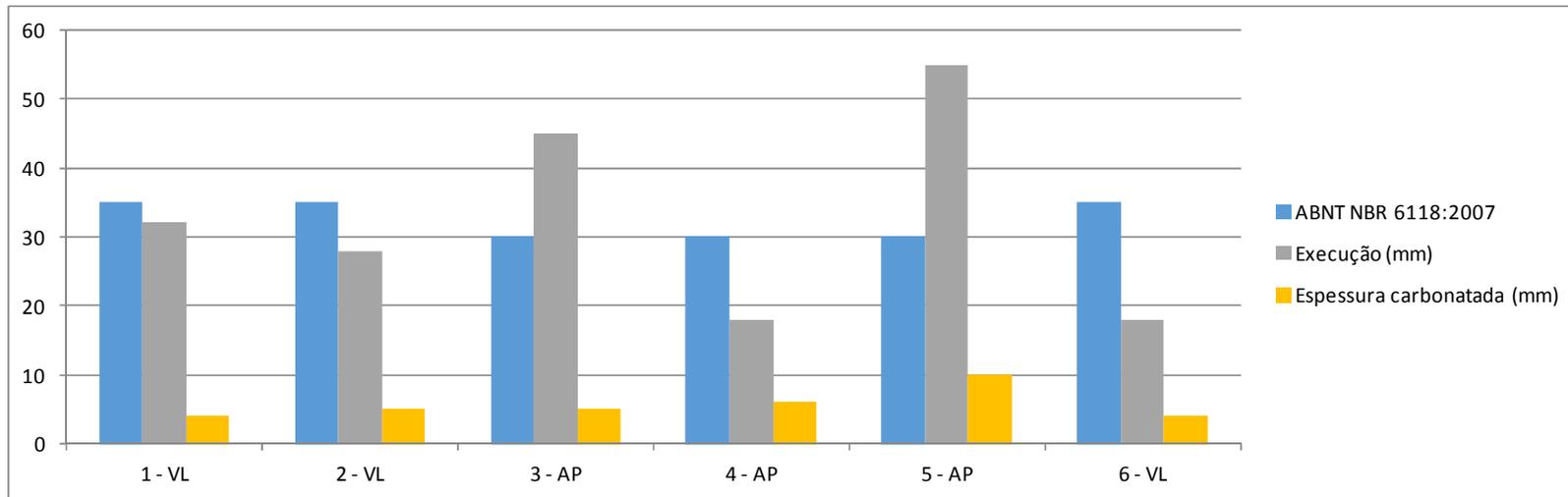


**Figura 5.18:** SP-280 - km 021+860 - Marginal Leste (Ensaio realizado em 2007): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:1980 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

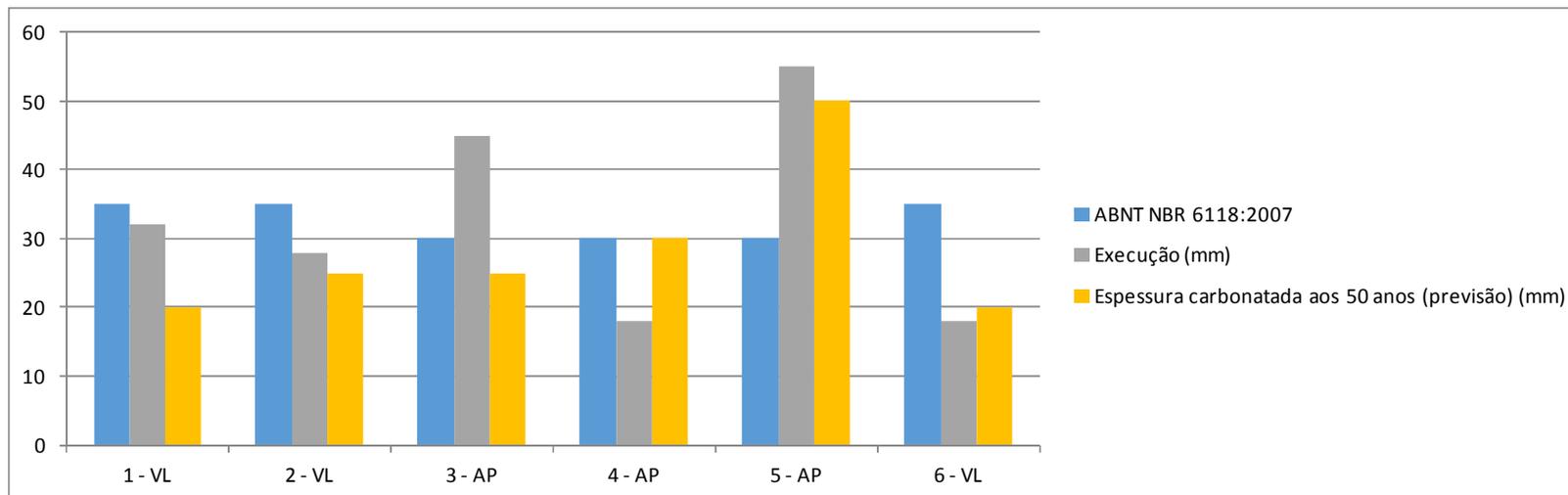
<b>OAE: SP-280 – km 031+800 - Viaduto ramo 700 – Pista Leste</b>	<b>Idade (anos): 2</b>
<b>Ano de construção: 2009</b>	<b>Ano de realização do ensaio: 2011</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		ABNT NBR 6118:2007	Execução (mm)						
1	Viga longarina VL1, face Norte, a 1,60m do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado).	35	32	4	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	20,00	2,83	128,00	126,00
2	Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP3 (concreto protendido pré-moldado).	35	28	5	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	25,00	3,54	62,72	60,72
3	Apoio AP2, face Sul a 0,85m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	45	5	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	25,00	3,54	162,00	160,00
4	Apoio AP4A, face Sul a 0,70m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	18	6	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	30,00	4,24	18,00	16,00
5	Apoio AP2A, face Norte a 0,75m do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	30	55	10	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	50,00	7,07	60,50	58,50
6	Viga longarina VL1, face Norte, a 0,95m do apoio AP2A (concreto protendido pré-moldado).	35	18	4	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	20,00	2,83	40,50	38,50

**Tabela 5.21:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.19:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).

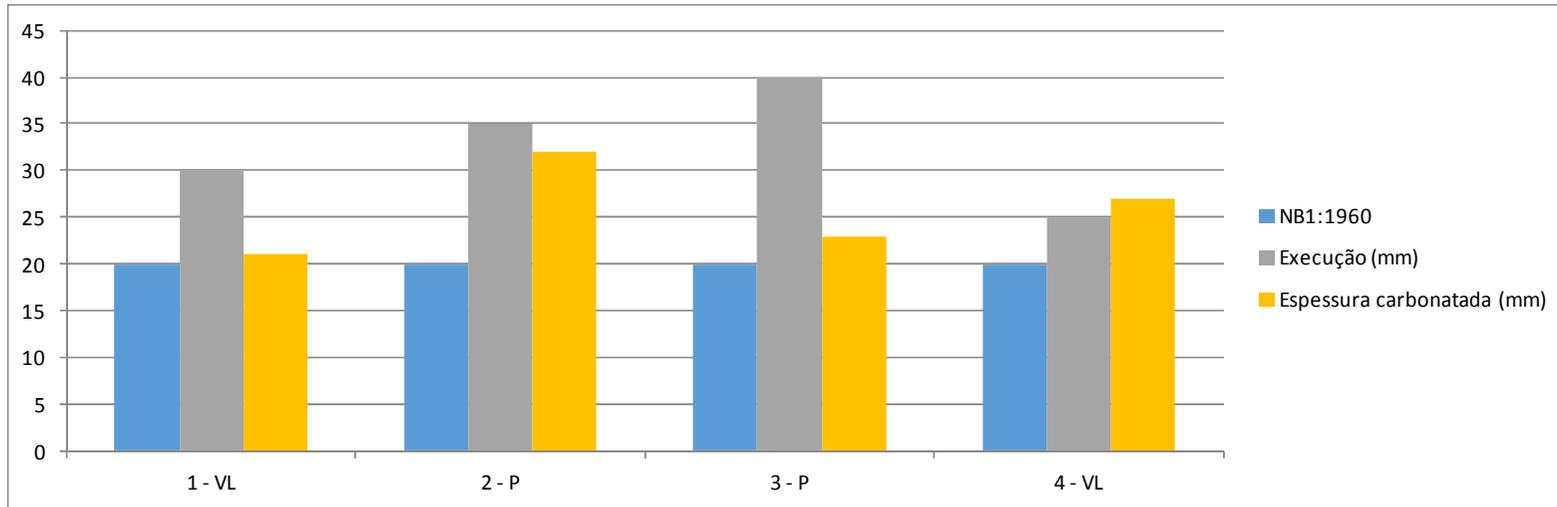


**Figura 5.20:** SP-280 – km 031+800 – Pista Leste (Ensaio realizado em 2011): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

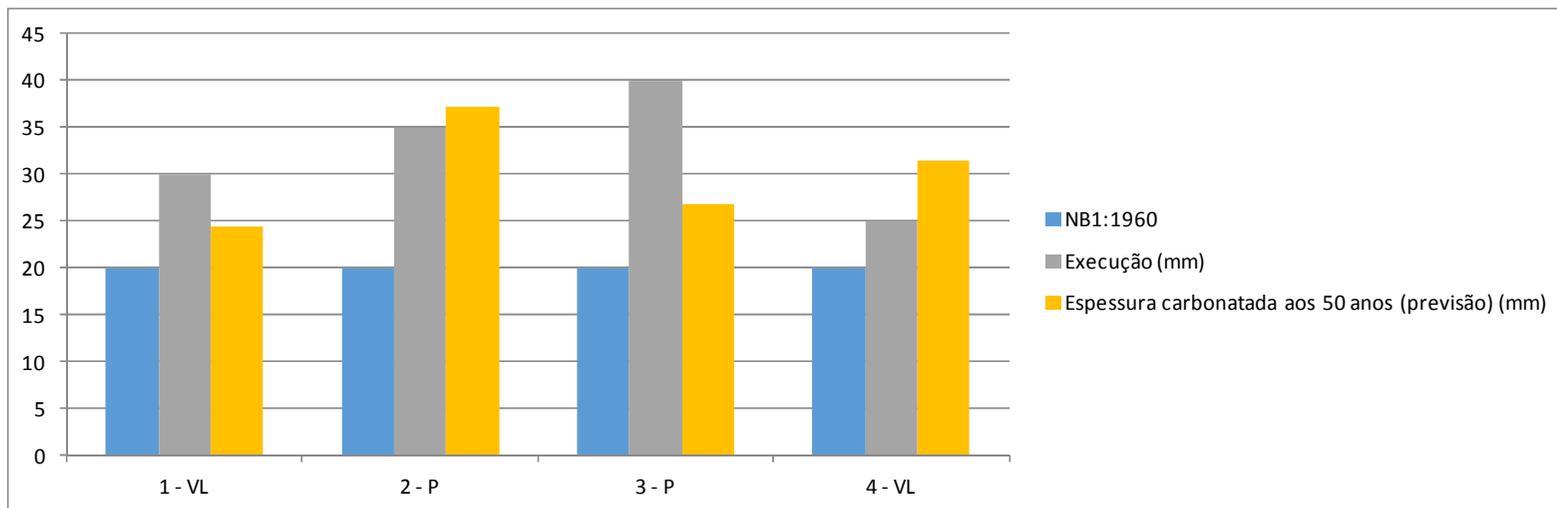
<b>OAE: SP-332 – km 121+900 - Passagem Superior - Acesso Paulínea - Pista Transversal</b>	<b>Idade (anos): 37</b>
<b>Ano de construção: 1973</b>	<b>Ano de realização do ensaio: 2010</b>

Ponto	Local	Cobrimento		Espessura carbonatada (mm)	Análise	Espessura carbonatada aos 50 anos (previsão) (mm)	k	Vida útil efetiva (anos)	Vida útil residual (anos)
		NB1:1960	Execução (mm)						
1	Viga longarina VL1 – face Norte, a 0,90m da transversina VT14 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	20	30	21	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	24,41	3,45	75,51	38,51
2	Pilar P3 – face Leste, a 0,95m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	20	35	32	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	37,20	5,26	44,26	7,26
3	Pilar P2 – face Leste, a 1,00m de altura do solo (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	20	40	23	Não representa comprometimento da proteção das armaduras	26,74	3,78	111,91	74,91
4	Viga longarina VL2 – face Sul, a 0,85m da transversina VT1 (concreto armado moldado <i>in loco</i> ).	20	25	27	Representa comprometimento da proteção das armaduras	31,39	4,44	31,72	-5,28

**Tabela 5.22:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Análise da espessura de carbonatação e previsão da vida útil (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.21:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NB1:1960 e a espessura carbonatada (Elaboração própria, 2014).



**Figura 5.22:** SP-332 – km 121+900 - Pista Transversal (Ensaio realizado em 2010): Comparativo do cobrimento executado com a ABNT NBR 6118:2007 e a espessura carbonatada aos 50 anos - previsão (Elaboração própria, 2014).

## 6. CONCLUSÕES

Apresenta-se a seguir as conclusões baseadas e fundamentadas nos resultados de carbonatação e cobrimentos das obras estudadas no presente trabalho. Recomenda-se o combate a continuidade da penetração da carbonatação mediante proteção superficial do concreto nas obras onde a carbonatação já atingiu a armadura do elemento estrutural.

### 6.1. Conclusão propriamente dita

- A análise da vida útil envolve a inspeção e vistoria da estrutura de concreto, extrapolando o resultado para uma vida útil de 50anos, conforme com a ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 15575:2013;
- De forma geral, em relação aos cobrimentos previstos para 50 anos, estimados a partir das inspeções atuais, das dez (10) obras estudadas, sendo que a obra da SP-021, km 013+000 – Pista externa foi estudada no ano de 2009 e de 2013, apenas uma (1) das obras está em conformidade com a ABNT NBR 6118:1980, norma vigente na época e as demais (9) não estão conforme a norma vigente na época de construção;
- Essa deficiência se deveu a projeto inadequado e má execução;
- Apesar da maioria dos cobrimentos extrapolados para 50 anos, não estarem em conformidade com a norma vigente na época da construção e nem com a atual, verifica-se que a maioria ainda não apresenta sintomas patológicos na ocasião e data das visitas, esperando-se problemas nas próximas idade. Referente aos pontos onde a carbonatação já atingiu a armadura do elemento estrutural, ou seja, onde a espessura de concreto de cobrimento das armaduras está abaixo dos valores de espessura carbonatada, pode-se dizer que o aço está desprotegido e despassivado, apesar de não ser observada, no momento e nesta idade precoce, a corrosão das armaduras.

- Especialmente com relação à viga longarina VL1, face Norte a 1,70m da cortina do encontro Leste (concreto protendido pré-moldado) da OAE da SP-280 – km 021+860 – Marginal Leste, chama a atenção o baixo valor da espessura carbonatada, o que se pode atribuir às boas condições de preservação da obra, que encontra-se pintada o que funciona como uma barreira a penetração de agentes agressivos, e interfere no resultado do tempo de vida útil do concreto;
- A durabilidade está diretamente ligada aos cuidados que tem com a estrutura em todas as fases: projeto, execução e utilização. Sendo assim é de extrema importância que essas etapas sejam executadas de forma a maximizarem a eficiência, diminuindo a possibilidade do surgimento de patologias que reduzem grandemente a vida útil da estrutura.

## **6.2. Sugestões para continuidade da pesquisa**

- Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se propor um estudo da agressividade ambiental com relação a carbonatação em diversas regiões do país, efetuar ensaios de carbonatação do concreto com períodos prolongados, a fim de obter atenuação da curva de desempenho do concreto a carbonatação e formas de recuperação das Obras de Arte Especiais, avaliando classe ambiental, metodologia e custos.

## **6.3. Transferência de conhecimento à sociedade**

- Participação de cursos e seminários às Concessionárias de rodovias com a pretensão de apresentar em Congressos e Revistas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE TRANSPORTE NO ESTADO DE SÃO PAULO (ARTESP). Controle das condições estruturais, funcionais e de durabilidade das OAE's. ET-00.000.000-0-C21/002. São Paulo, 2007.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS – Manual of condition evaluation of bridges. 2nd ed. AASHTO, 1998.

ANDRADE, C. HELENE, P. FIGUEIREDO, E. J. P. Fatores determinantes da iniciação e propagação da Corrosão da armadura do concreto. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP – BT/PCC/121. São Paulo, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.

\_\_\_\_\_. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. Manutenção de edificações - Procedimento. NBR 5674. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. Cálculo e execução de obras de concreto - NB-1, Rio de Janeiro, 1960.

\_\_\_\_\_. NBR 9062. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. Vistorias de Pontes e Viadutos de concreto. NBR 9452. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. Desempenho de Edificações Habitacional - NBR 15575 – Rio de Janeiro, 2013.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In.: SCHIESSL, P. (Ed) Corrosion of steel in concrete: report of technical committee 60-CSC RILEM - London: Chapman & Hall Ltda, 1988.

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

CARMONA, A. F.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil; Estudo estatístico. In: Jornadas em Espanol y Português sobre Estruturas y Materiales. Madrid, 1988.

CARMONA, T. G. Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto. Ed. UFG, Goiânia, Pini, São Paulo, 1997.

CASTRO, A. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2003.

CEB. Durability of concrete structures: State of the art report. Bulletin D' Information N2 148, Paris, 1982.

DAL MOLIN, D. C. C. Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

DIN EN 14630. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method English version of DIN EN 14630:2007-01.

DNIT 010/2004 – PRO. Inspeções de pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

FIGUEIREDO, E. J. P. ANDRADE, C. HELENE, P.R.L. Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura de concreto. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – BT/PCC121. São Paulo, 1993.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.

FIGUEIREDO, E. P. MEIRA, G. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. Boletim técnico 06. México, 2013.

HELENE, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado. Ed. Pini. São Paulo, 1986.

\_\_\_\_\_. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Professor Livre Docente) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_. Envelhecimento e inspeção de pontes e viadutos. Engenharia estrutural, ciência & tecnologia, ABECE, n. 1, primeiro trimestre, São Paulo, 1998.

MITRE, M. BARBOSA, P. HELENE, P. Influência do traço na carbonatação de concretos, argamassas e pastas. São Paulo, Revista IBRACON, 2002.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo. PINI, 1997.

NINCE, A. A. Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região Contro-Oeste. Dissertação (Mestrado) – Departamento de engenharia civil, Universidade de Brasília. Brasília, 1996.

POURBAIX, M. Atlas of electrochemical equilibria in Aqueous Solutions. Houston, NACA, 1974.

SILVA, T. J. Predicción de La vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro. Tese (Doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1998.

TULA, L. S. Contribuição ao estudo da resistência a corrosão de armaduras de aço inoxidável. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

TUTIKIAN, B. PACHECO, M. Inspeção, diagnóstico e prognóstico na construção civil. Boletim técnico 01. México, 2013.