



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**ALEXANDRE DE AZEVÊDO DEMÉTRIO FILHO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO CELULAR SOB  
PROCESSO DE CORROSÃO DE ARMADURA**

Recife, Pernambuco

2016



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**ALEXANDRE DE AZEVÊDO DEMÉTRIO FILHO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO CELULAR SOB  
PROCESSO DE CORROSÃO DE ARMADURA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Recife, Pernambuco

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Universidade de Pernambuco – Recife

D377a

Demétrio Filho, Alexandre de Azevêdo

Avaliação do comportamento do concreto celular sob processo de corrosão de armadura / Alexandre de Azevêdo Demétrio Filho. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2016.

240 f.: il.

Orientadora: Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

1. Concreto leve 2. Concreto celular 3. Corrosão de armadura. I. Monteiro, Eliana Cristina Barreto (orient.) II. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 624.183.4

**ALEXANDRE DE AZEVÊDO DEMÉTRIO FILHO**

**AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTO DO CONCRETO CELULAR  
SOB PROCESSO DE CORROSÃO DE ARMADURA**

BANCA EXAMINADORA:

**Orientadora:**



---

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro  
Universidade de Pernambuco



---

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares

**Examinadores:**



---

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene  
Universidade de São Paulo

Recife, PE  
2016

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu guerreiro incansável de tantas batalhas. Meu querido pai Alexandre de Azevêdo Demétrio. Te amo.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por todos os momentos vividos até aqui. Obrigado pelas oportunidades e por tantas bênçãos.

Quero fazer um agradecimento muito especial à Déborah Maria do Nascimento Queiroz. Meu amor, só você sabe o real esforço e suor que esse estudo nos demandou. Foi um ano de ritmo pesado de ensaios, sem finais de semana, com atividades à noite após a jornada cansativa de trabalho, foram vários traços de concreto rodados, muito material pesado para carregar, muitas decisões importantes e difíceis, e tantos outros desafios que surgiram nesse período. Pois é, você esteve comigo em todos esses momentos, maravilhosamente. Você tornou essa caminhada mais leve e prazerosa. Sem você, Deo, eu não teria conseguido chegar até aqui. Essa vitória é nossa.

Agradeço a minha família pelo apoio e compreensão durante essa difícil jornada. Obrigado minha mãe pela paciência e apoio nos momentos de estresse.

Devo um agradecimento enorme à família Demétrio. Obrigado aos meus primos Rafael e Rodrigo, obrigado Gabriel pela ajuda na reta final e obrigado aos meus tios Fernando e Alexandre Lucena. Muito obrigado a todos pela força mental, e, sobretudo, a ajuda física na execução de boa parte dos ensaios. Em especial quero agradecer à tia Verônica por ter sido tão solícita e generosa no momento em que mais precisei de ajuda. Foram quatro meses de muita bagunça e barulho em sua casa. A você, tia, meu muito obrigado.

Não posso deixar de agradecer à Tecomat Engenharia por ter incentivado desde o começo a realização desse mestrado. Agradeço pela disponibilidade de espaço físico e equipamentos para realização de vários ensaios. Obrigado a todos os colegas de trabalho (Felipe Casa Nova, Tiago Andrade e João Ribeiro), em especial ao amigo e colega de profissão Jairo Mariz por tornar possível a realização de algumas etapas dos ensaios. Obrigado também ao professor Tibério Andrade por sempre estar disponível para tirar minhas dúvidas.

Obrigado ao PEC pela disponibilização de recursos que ajudaram na elaboração desse trabalho. Em especial queria agradecer à Dona Lúcia Rosani pela importante ajuda em momentos cruciais nessa jornada.

Agradeço também ao Marcelo Holanda da Tecnoforma. Obrigado pela disponibilização da mão de obra para confecção das fôrmas.

Agradeço à Gethal por disponibilizar o aditivo incorporador de ar utilizado no estudo e por estar disponível para esclarecimentos sobre o assunto.

Por fim, Agradeço especialmente a minha orientadora Eliana Monteiro por acreditar em mim e pelo incentivo.

## RESUMO

O concreto, material secular e largamente difundido em todo o mundo passou por diversos avanços ao longo do tempo, permitindo a produção de concreto especiais que atendam às várias necessidades da sociedade. Tem-se como exemplo o concreto leve, seja ele produzido com agregados leves ou com incorporação de ar. Seu uso no Brasil data desde a década de 70 e observa-se um fomento de seu uso em diversos segmentos, como por exemplo em paredes de concreto de habitações de interesse social. A utilização de concretos leves, como por exemplo, o celular, traz algumas dúvidas quanto ao seu comportamento sob o processo de corrosão de armadura. Será que os vazios presentes da sua argamassa, provenientes da incorporação intencional de ar, são capazes de comportar os produtos de corrosão das armaduras e tornar o processo assintomático. Este trabalho buscou, por meio de concretagem de placas armadas produzidas com concretos de diferentes massas específicas leves (L1, L2 e L3), verificar o comportamento desses concretos sob processo de corrosão. Os ensaios de caracterização mostraram a diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de ar incorporado. As famílias L2 e L3 (maiores teores de ar) se mostraram mais susceptíveis à corrosão de armadura, demonstrando maior intensidade de corrosão, visualmente, bem como na quantidade de massa de aço perdida. Para os parâmetros deste trabalho, não se observou fissuras nas placas. Em 90% dos casos, observou-se manchas de corrosão. Contudo, o comportamento de algumas placas indica que há possibilidade do processo ser assintomático quanto ao manchamento, tendo em vista que verificou-se a influência do cobrimento das armaduras no manchamento.

Palavras chave: Concreto; leve; celular; corrosão.

## ABSTRACT

Concrete, secular material, and widespread throughout the world has undergone several advances over time, allowing special concrete production that meet the various needs of society. It has for example the lightweight concrete, whether made with lightweight aggregates or inclusion of air. Its use in Brazil dates from the 70s and there has been a promotion of its use in various segments, such as in concrete walls. The use of light concrete, for example, produced with entrained air brings some doubts about its behavior under corrosion process. Does the content of air present in the concrete, from the intentional incorporation, have the capability of comport the corrosion products of armor and become asymptomatic and most dangerous process? This study aimed , through concrete armed plates produced with concrete of different light densities (L1, L2 and L3 ) , check the behavior of concrete under corrosion. Characterization tests showed the decrease of the compressive strength with the increase in entrained air content. Families L2 and L3 (larger air content) were more susceptible to reinforced steel corrosion, showing greater intensity of corrosion, visually, as well as the amount of mass lost steel. For the parameters of this study, there was no cracks in the plates. In 90% of cases, was observed corrosion spots on plate's surface. However, the behavior of some boards indicates that there is possibility that the process is asymptomatic as to staining, considering that there is the influence of coatings on reinforcement staining.

Keywords: Concrete; light; corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- TIPOS DE CONCRETO LEVE: COM AGREGADOS LEVES (A), CELULAR (B), SEM FINOS (C). .....	19
FIGURA 2- ESTRUTURA DE UM SURFACTANTE INCORPORADOR DE AR.....	33
FIGURA 3- ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE INTERROMPIDA. ....	37
FIGURA 4- 3.543 UNIDADES EM ALTAMIRA-PA (2014) .....	42
FIGURA 5- 812 UNIDADES EM SÃO MIGUEL DOS CAMPOS-AL (2014).....	42
FIGURA 6- 12.000 UNIDADES EM MANAUS-AM .....	42
FIGURA 7 -1.500 UNIDADES EM PALMARES-PE (2013).....	42
FIGURA 8-CURITUBA –PR. CONJUNTO HABITACIONAL 480 UNIDADES DE APARTAMENTO.....	42
FIGURA 9- CAPANEMA-PA. 1.032 UNIDADES SOBRADOS. (2014).....	42
FIGURA 10-PROCESSO BÁSICO DE CORROSÃO .....	43
FIGURA 11- EXEMPLO DO MECANISMO DE UMA CORROSÃO ELETROQUÍMICA .....	46
FIGURA 12- ESQUEMA LASCAMENTO E DELAMINAÇÃO DO CONCRETO DE COBRIMENTO DEVIDO À CORROSÃO DE ARMADURA. ....	47
FIGURA 13-FORMAÇÃO DA PILHA GALVÂNICA.....	48
FIGURA 14-MODELO DE CLÁSSICO DE CORROSÃO POR PITE. ....	49
FIGURA 15-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA NA PRESENÇA DE CLORETOS. ...	49
FIGURA 16-FORMAS DE OCORRÊNCIA DE ÍONS CLORETO NA ESTRUTURA DE CONCRETO. ....	51
FIGURA 17-ESQUEMA DA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE PELO MÉTODO DE WENNER. ....	58
FIGURA 18-EXEMPLO DO ELETRODO DE REFERÊNCIA DE COBRE/SULFATO DE COBRE. ....	61
FIGURA 19-ESQUEMA DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO.....	61
FIGURA 20-ESQUEMA RESUMO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
FIGURA 21- ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO DO CORPO DE PROVA. ....	66
FIGURA 22-MARCAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO PARA REALIZAÇÃO DO CORTE. ....	68
FIGURA 23-REALIZAÇÃO DO CORTE DOS VARÕES DE AÇO COM LIXADEIRA E DISCO PARA AÇO.....	69
FIGURA 24-VISÃO GERAL DOS GRUPOS DE BARRAS APÓS O CORTE. ....	69
FIGURA 25-COLOCAÇÃO DAS BARRAS DENTRO DE RECIPIENTE PLÁSTICO PARA LIMPEZA. ....	69
FIGURA 26-COLOCAÇÃO DAS BARRAS DENTRO DA SOLUÇÃO ÁCIDA PARA LIMPEZA. ....	70
FIGURA 27-DETALHE DA REAÇÃO DO ÁCIDO COM AS BARRAS DE AÇO. ....	70
FIGURA 28-LIMPEZA DAS BARRAS COM ÁGUA CORRENTE E ESCOVA DE AÇO. ....	70
FIGURA 29-SECAGEM DAS BARRAS APÓS LIMPEZA.....	71
FIGURA 30-DETALHE DA PESAGEM DAS BARRAS ANTES DO INÍCIO DO PROCESSO DE CORROSÃO. ....	71
FIGURA 31-DETALHE DO ASPECTO FINAL DAS BARRAS APÓS LIMPEZA E SECAGEM. ....	72
FIGURA 32-PROTEÇÃO DAS BARRAS COM PLÁSTICO FILME. ....	72
FIGURA 33- IDENTIFICAÇÃO DE CADA BARRA. ....	73
FIGURA 34-PROCESSO DE ORGANIZAÇÃO E LIGAÇÃO DAS BARRAS.....	74
FIGURA 35-DETALHE DA AMARRAÇÃO COM ARAME 18 GALVANIZADO E PLASTIFICADO. ....	74
FIGURA 36-PROJETO DAS FÔRMAS. ....	75
FIGURA 37-FOTO DE UM DOS JOGOS DE FÔRMA (36 UNIDADES).....	75
FIGURA 38- DETALHE DAS FÔRMAS E IDENTIFICAÇÃO DAS PLACAS.....	76
FIGURA 39-IDENTIFICAÇÃO DO CIMENTO UTILIZADO.....	77
FIGURA 40-ARMAZENAMENTO DO CIMENTO.....	77
FIGURA 41-ESTOCAGEM DA AREIA E BRITA UTILIZADAS NO ESTUDO.....	77
FIGURA 42-RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO. ....	78
FIGURA 43-CURVA GRANULOMÉTRICA DO PERCENTUAL RETIDO ACUMULADO DO AGREGADO GRAÚDO.....	79
FIGURA 44- RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO. ....	79
FIGURA 45-CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	80
FIGURA 46-ADITIVO PLASTIFICANTE.....	80
FIGURA 47-ADITIVO INCORPORADOR DE AR. ....	80
FIGURA 48-TUBO DE COBRE CORTADO E AMASSADO DIAMETRALMENTE. ....	82
FIGURA 49-CHAPAS UNIDAS COM FIO DE COBRE.....	83
FIGURA 50-DETALHE DA LIGAÇÃO DO COBRE COM A ARMADURA DE AÇO. ....	83
FIGURA 51-CONFIGURAÇÃO FINAL DA ARMADURA QUE FOI COLOCADA DENTRO DA FÔRMA. ....	84
FIGURA 52-VISÃO GERAL DAS FÔRMAS DAS PLACAS E DOS OUTROS CORPOS DE PROVA. AINDA ANTES DA PREPARAÇÃO PARA A CONCRETAGEM. ....	85
FIGURA 53-VISTA DA FÔRMA COM AS ARMADURAS DENTRO. ....	85

FIGURA 54-VISTA DA ARMADURA DENTRO DA FÔRMA. ....	86
FIGURA 55-DETALHE DA ARMADURA DENTRO DA FÔRMA.....	86
FIGURA 56-APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE NAS FÔRMAS .....	86
FIGURA 57-BALANÇA UTILIZADA NA PESAGEM DOS INSUMOS DO CONCRETO. ....	86
FIGURA 58-DETALHE DA AREIA JÁ PESADA SEPARADA EM RECIPIENTES. ....	86
FIGURA 59- BETONEIRA DE 400 LITROS UTILIZADA NA MISTURA DO CONCRETO.....	87
FIGURA 60- PROCESSO DE PREENCHIMENTO DAS FÔRMAS COM CONCRETO. ....	87
FIGURA 63-OUTRA VISTA DA CONCRETAGEM. ....	87
FIGURA 64-DETALHE DA COLOCAÇÃO DO CONCRETO NA FÔRMA. ....	87
FIGURA 63-ADENSAMENTO FEITO COM MARTELO DE BORRACHA BATENDO-SE NAS LATERAIS E TOPO DAS FÔRMAS.....	88
FIGURA 66- VISÃO GERAL NO DIA SEGUINTE À CONCRETAGEM .....	88
FIGURA 67-FOTO LOGO APÓS TÉRMINO DA CONCRETAGEM. ....	88
FIGURA 66- RETIRADA LATERAL DE UMA DAS FÔRMAS. ....	89
FIGURA 67- OUTRA VISÃO DA RETIRADA DAS FÔRMAS. ....	89
FIGURA 68- ASPECTO FINAL DA PLACA APÓS RETIRADA DA FÔRMA.....	90
FIGURA 69-VISÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS PARA OS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO. ....	90
FIGURA 70- VISTA DO ACONDICIONAMENTO INICIAL DAS PLACAS NOS PRIMEIROS 28 DIAS.....	91
FIGURA 71-VISÃO GERAL DA CONFIGURAÇÃO DA “PISCINA” PARA IMERSÃO DAS PLACAS. ....	92
FIGURA 72-DETALHE DA COLOCAÇÃO DO SAL DE COZINHA. ....	92
FIGURA 73-DETALHE DA COLOCAÇÃO DAS PLACAS DENTRO D’ÁGUA. ....	92
FIGURA 74- VISÃO GERAL DAS 72 PLACAS DENTRO DA ÁGUA SALGADA. ....	92
FIGURA 75- FORMA DE ACONDICIONAMENTO DAS PLACAS DURANTE O PERÍODO DE SECAGEM. ....	92
FIGURA 78- ADENSAMENTO COM HASTE METÁLICA. ....	93
FIGURA 79-COLOCAÇÃO INICIAL DO CONCRETO DENTRO DO CILINDRO.....	93
FIGURA 78- FINALIZAÇÃO DO ENCHIMENTO. ....	94
FIGURA 79-ÉTAPA DE RASAMENTO. ....	94
FIGURA 80-PREENCHIMENTO DO TRONCO DE CONE COM CONCRETO.....	94
FIGURA 81-VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR MEIO DO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE. ....	94
FIGURA 82-DETALHE DOS 3 CORPOS DE PROVA DE CADA FAMÍLIA PREPARADOS PARA SEREM ROMPIDOS.....	96
FIGURA 83-DETALHE DO “CAPACETE” DE NEOPRENE COLOCADO PARA UNIFORMIZAR O TOPO DOS CORPOS DE PROVA.....	96
FIGURA 84-DETALHE DA PRENSA UTILIZADA PARA O ENSAIO. ....	96
FIGURA 85- COLOCAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NA ESTUFA. ....	97
FIGURA 86-1ª PESAGEM (MASSA SECA).....	97
FIGURA 87-IMERSÃO DOS CORPOS DE PROVA POR 72 H. ....	97
FIGURA 88-COLOCAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA EM FERVURA POR 5 H.....	97
FIGURA 89- PESAGEM APÓS FERVURA EM BALANÇA HIDROSTÁTICA.....	98
FIGURA 90- SECAGEM COM PANO E PESAGEM DA MASSA ESPECÍFICA SATURADA. ....	98
FIGURA 91-DETALHE DO TERMOHIGRÔMETRO UTILIZADO NO EXPERIMENTO. ....	99
FIGURA 92-ESQUEMA DE REPRESENTAÇÃO DAS FACES A E B DAS PLACAS. ....	100
FIGURA 93-ESCANEAMENTO DA FACE A PARA MEDIDA DO COBRIMENTO.....	101
FIGURA 94-OUTRO DETALHE DO USO DO EQUIPAMENTO.....	101
FIGURA 95-MEDINDO A ESPESSURA DA PLACA. UMA MEDIDA EM CADA LADO. ....	101
FIGURA 96-ELETRODO DE COBRE E SULFATO DE COBRE. ....	103
FIGURA 97-EQUIPAMENTO COM ELETRODO E LIGAÇÃO COM O AÇO. ....	103
FIGURA 98-UMEDECIMENTO DA SUPERFÍCIE DA PLACA ANTES DAS LEITURAS. ....	103
FIGURA 99-EXECUÇÃO DO ENSAIO. 12 PONTOS POR PLACA. ....	103
FIGURA 100- UMEDECIMENTO DA SUPERFÍCIE DA PLACA ANTES DAS LEITURAS.....	104
FIGURA 101-MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE SUPERFICIAL. ....	104
FIGURA 104-FORMA COMO AS PLACAS FORAM QUEBRADAS.....	106
FIGURA 105- FERRAMENTAS UTILIZADAS NA QUEBRA DAS PLACAS.....	106
FIGURA 106-. MALHA DESFEITA E BARRAS PRONTAS PARA A LIMPEZA FINAL E PESAGEM.....	106
FIGURA 107- ARMADURA RECÉM-TIRADA DE DENTRO DA PLACA .....	106
FIGURA 108- INCRUSTAÇÕES REMANESCENTES APÓS LIMPEZA COM ÁCIDO.....	107
FIGURA 109- BARRAS NO PROCESSO DE LIMPEZA EM ÁCIDO. MADEIRAS DIVISÓRIAS PARA EVITAR MISTURAS. FORAM FEITAS 5 BARRAS DE CADA VEZ. ....	107

FIGURA 110-UTILIZAÇÃO DE LIXADEIRA MECÂNICA PARA RETIRAR AS INCRUSTAÇÕES MAIS ADERIDAS.....	107
FIGURA 111-ASPECTO FINAL DA BARRA, PRONTA PARA SER PESADA. ....	107
FIGURA 110-BARRA DEVIDAMENTE ACOPLADA AO EQUIPAMENTO E PRONTA PARA O ENSAIO. ....	108
FIGURA 111-IMAGEM DA BARRA APÓS A RUPTURA. ....	108
FIGURA 114-FAMÍLIA L1.....	114
FIGURA 115-FAMÍLIA R.....	114
FIGURA 116- FAMÍLIA L3.....	114
FIGURA 117-FAMÍLIA L2.....	114
FIGURA 116- LEITURA DA FACE B DA PLACA 01, MOSTRANDO O COBRIMENTO DAS TRÊS BARRAS VERTICAIS (22 MM DE MÉDIA).....	116
FIGURA 117-IMAGEM DA FACE A DA PLACA 9. AS BARRAS HORIZONTAIS, MAIS ESCURAS, ENCONTRAM-SE A FRENTE DAS BARRAS VERTICAIS. ....	116
FIGURA 118-MAPA DE POTENCIAL DA PLACA 20-FAMÍLIA L1 (13/3/16).....	123
FIGURA 119-BARRA 85 .....	153
FIGURA 120-BARRA 35.....	153
FIGURA 121-BARRA 75.....	153
FIGURA 122-BARRA 95.....	153
FIGURA 123-BARRA 191 .....	153
FIGURA 124-BARRA 196 .....	153

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1-VALORES DE REFERÊNCIA DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO CONCRETO LEVE COM AGREGADOS LEVES. ....	21
TABELA 2- PROPRIEDADES TÉRMICAS ENTRE CONCRETO LEVE E NORMAL .....	26
TABELA 3- DADOS ORIENTATIVOS SOBRE CONCRETO CELULAR.....	36
TABELA 4-RELAÇÃO ENTRE MASSA ESPECÍFICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA E TEOR DE AR. ....	39
TABELA 5- RELAÇÃO ENTRE MASSA ESPECÍFICA E CONDUTIBILIDADE TÉRMICA. ....	39
TABELA 6- CONCENTRAÇÕES DOS PRINCIPAIS ÍONS PRESENTES NA ÁGUA DO MAR.....	51
TABELA 7-RELAÇÃO ENTRE RISCO DE CORROSÃO E A PERCENTAGEM DE CLORETOS. ....	52
TABELA 8- TEOR MÁXIMO DE ÍONS CLORETO PARA PROTEÇÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO. ....	53
TABELA 9- VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA INDICATIVOS DA PROBABILIDADE DE CORROSÃO DO CONCRETO, .....	59
TABELA 10- CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIDAS DE POTENCIAIS. ....	62
TABELA 11-VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA PESQUISA.....	65
TABELA 12--VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PESQUISA.....	66
TABELA 13-QUANTIDADE DE PLACAS CONFECCIONADAS.....	67
TABELA 14-RESULTADOS DOS TESTES DE TEMPO DE MISTURA. ....	81
TABELA 15- RESULTADOS DE ENSAIOS DE CONTROLE DE PRODUÇÃO DO CONCRETO. ....	109
TABELA 16- DADOS DE MASSA ESPECÍFICA FRESCA, CONSUMO DE CIMENTO E TEOR DE AR PARA CADA FAMÍLIA. ....	110
TABELA 17- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DAS FAMÍLIAS DE CONCRETO. ....	111
TABELA 18-RESUMO DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO. ....	112
TABELA 19- RELAÇÕES ENTRE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS. ....	112
TABELA 20-VALORES NOTÁVEIS DE TEMPERATURA E UMIDADE DURANTE O ESTUDO. ....	115
TABELA 21- VALORES DE ESPESSURA E COBRIMENTOS MÉDIOS DAS PLACAS DA FAMÍLIA R.....	117
TABELA 22- VALORES DE ESPESSURA E COBRIMENTOS MÉDIOS DAS PLACAS DA FAMÍLIA L1.....	118
TABELA 23- VALORES DE ESPESSURA E COBRIMENTOS MÉDIOS DAS PLACAS DA FAMÍLIA L2.....	119
TABELA 24- VALORES DE ESPESSURA E COBRIMENTOS MÉDIOS DAS PLACAS DA FAMÍLIA L3.....	120
TABELA 25-RESUMO DAS MÉDIAS DE COBRIMENTO DE CADA FAMÍLIA. ....	121
TABELA 26-CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA A RESISTIVIDADE. ....	131
TABELA 27- DADOS QUANTITATIVOS SOBRE A INSPEÇÃO VISUAL.....	139
TABELA 28-QUANTIDADE DE PLACAS POR FAMÍLIA, DE ACORDO COM SUA CLASSIFICAÇÃO DE DETERIORAÇÃO. ....	143
TABELA 29- PERDA DE MASSA DE AÇO TOTAL DE CADA FAMÍLIA.....	150
TABELA 30-PLACAS QUE MAIS PERDERAM MASSA ABSOLUTA POR FAMÍLIA.....	152
TABELA 31-BARRAS QUE MAIS PERDERAM MASSA ABSOLUTA POR FAMÍLIA. ....	152
TABELA 32-ENSAIO DE TRAÇÃO EM BARRAS ÍNTEGRAS. ....	154
TABELA 33-ENSAIO DE TRAÇÃO EM BARRAS DETERIORADAS APÓS PERÍODO DE EXPOSIÇÃO. ....	154

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	15
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Justificativa .....	16
1.2. Objetivo.....	17
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	17
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.3. Estrutura do trabalho.....	18
CAPÍTULO 2 .....	19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2. Concreto Leve .....	19
2.1. Com agregados leves .....	20
2.1.1. <i>Propriedades</i> .....	21
2.1.2. <i>Aplicações</i> .....	27
2.2. Sem finos.....	28
2.2.1. <i>Propriedades</i> .....	29
2.2.2. <i>Aplicação</i> .....	29
2.3. Concreto celular.....	30
2.3.1. <i>Incorporação de ar</i> .....	31
2.3.2. <i>Propriedades</i> .....	34
2.3.3. <i>Aplicação</i> .....	40
3. Corrosão de armadura .....	43
3.1. Corrosão por cloretos e seus aspectos intervenientes.....	48
3.2. Penetração dos íons cloreto.....	54
4. Técnicas eletroquímicas de monitoramento de corrosão de armadura	
56	
4.1. Resistividade.....	57
4.2. Potencial de corrosão .....	60
CAPÍTULO 3 .....	64
5. METODOLOGIA.....	64
5.1. Variáveis independentes.....	65
5.2. Variáveis dependentes.....	65
5.3. Materiais utilizados.....	66
5.3.1. <i>Corpo de prova</i> .....	66
5.3.2. <i>Aço</i> .....	67

5.3.3.	<i>Fôrma</i> .....	74
5.3.4.	<i>Concreto</i> .....	76
5.4.	Indução da Corrosão de armadura (tipo 1) .....	82
5.5.	Concretagem das placas e retirada da fôrma.....	84
5.6.	Indução da Corrosão de armadura (tipo 2) .....	91
5.7.	Ensaio.....	93
5.7.1.	<i>Ensaio de controle de produção do concreto</i> .....	93
5.7.2.	<i>Ensaio de caracterização do concreto</i> .....	94
5.7.3.	<i>Temperatura e umidade</i> .....	99
5.7.4.	<i>Cobrimento das armaduras e espessura das placas</i> .....	100
5.7.5.	<i>Ensaio de monitoramento eletroquímico</i> .....	101
5.7.6.	<i>Ensaio de monitoramento Físico</i> .....	104
CAPÍTULO 4 .....		109
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	109
6.1.	Ensaio de controle de produção do concreto.....	109
•	Massa específica no estado fresco e consistência.....	109
6.2.	Ensaio de caracterização do concreto.....	110
6.2.1.	<i>Estado fresco</i> .....	110
6.2.2.	<i>Estado endurecido</i> .....	111
6.3.	Temperatura e umidade.....	115
6.4.	Espessura das placas e cobrimento das armaduras .....	116
6.5.	Monitoramento eletroquímico .....	122
6.5.1.	<i>Potencial de corrosão</i> .....	122
6.5.2.	<i>Resistividade elétrica</i> .....	131
6.6.	Monitoramento físico .....	139
6.6.1.	<i>Inspeção visual</i> .....	139
6.6.2.	<i>Perda de massa das barras</i> .....	144
6.6.3.	<i>Resistência à tração das barras</i> .....	154
CAPÍTULO 5 .....		156
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	156
8.	CONCLUSÕES.....	159
REFERÊNCIAS .....		161
APÊNDICE A-Fotos das placas e imagens do mapeamento do potencial de corrosão.....		169

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é um material secular largamente utilizado e difundido em todo mundo. Carvalho (2008) relata que as primeiras experiências práticas a respeito do efeito da introdução de ferragens numa massa de concreto, conhecido como “cimento armado”, presume-se ser do francês Joseph Louis Lambot, em 1850. No Brasil, segundo Vieira (2003), a mais antiga publicação que se tem referência sobre o uso de concreto armado data de 1904.

Com o decorrer do tempo e desenvolvimento tecnológico no tocante ao uso do concreto, foi possível produzir concretos com características especiais, como por exemplo, concretos leves utilizados para isolamento térmico. Segundo Rossignolo (2009), a ampla utilização desse material é particularmente atribuída aos benefícios da redução da massa específica e a economia trazida com fôrmas, escoramento e nos custos de transporte de peças no caso de estruturas pré-fabricadas.

O concreto leve é aquele com massa específica seca abaixo de  $2000 \text{ kg/m}^3$ , cuja definição mais detalhada será abordada no capítulo 2. Este concreto leve, sobretudo o produzido com *agregados leves*, tem sido utilizado em diversos países desde a década de 1930. Conforme mostra Rossignolo (2003), no Brasil, os estudos e utilização do concreto leve tiveram início em 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida) pelo grupo Rabello.

Outro tipo de concreto leve, o *concreto celular*, o qual é objeto de estudo desta pesquisa, é produzido com aditivos que incorporam bolhas de ar à argamassa do concreto diminuindo sua massa específica. Ele também tem sido utilizado no Brasil há algumas décadas, sobretudo em sistemas construtivos de parede de concreto. Nos últimos 7 anos, tendo em vista o incentivo do governo Federal para a construção de unidades habitacionais

de interesse social, observa-se um grande vulto no uso do concreto leve celular nesse tipo de sistema.

Desde 1988 a 2014, cerca de 55 mil unidades habitacionais com o sistema construtivo de parede de concreto moldadas no local utilizando concreto celular foram executadas no Brasil<sup>1</sup>. Isso equivale a mais de 2 milhões e 300 mil metros quadrados de área construída.

As obras são divididas principalmente em unidades térreas e sobrados (mais de 49.000 moradias), unidades com até 5 pavimentos (cerca de 4.300 moradias), bem como obras com mais de 5 pavimentos (698 moradias).

### **1.1. Justificativa**

Considerando-se as diversas possibilidades de utilização do concreto leve celular (por exemplo, paredes de vedação e estruturais, bem como lajes para cobertura, dentre outras), há uma preocupação no tocante à utilização desse tipo de material para peças de concreto armado estrutural quanto ao comportamento dos elementos sob o processo de corrosão das armaduras.

Esta preocupação toma força uma vez que a corrosão de armadura é tida até os dias de hoje como um dos principais tipos, senão o principal, de manifestação patológica que acomete as estruturas de concreto armado no Brasil e no mundo. Pesquisadores como Andrade (1997), Aranha (1994) e Dal Molin (1988) realizaram levantamentos sobre as manifestações patológicas em concreto armado em lugares distintos do Brasil, apontando a corrosão de armaduras como a manifestação patológica que mais ocorre.

Helene (2014) alerta sobre a grande incidência da corrosão de armaduras em estruturas de concreto, acarretando grandes prejuízos à população (queda da adutora da Sabesp) e até mesmo causando acidentes fatais (desabamentos de marquises e lajes em balanço).

A hipótese principal deste trabalho está na seguinte pergunta: Será que os vazios presentes no interior do concreto celular, provenientes da

---

<sup>1</sup> Obras de conhecimento e participação da empresa Gethal ([gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras))

incorporação de ar, são capazes de “comportar” o volume dos produtos da corrosão de armaduras e assim tornar o processo assintomático? Ou seja, sem fissuras ou manchas na face externa do elemento.

Esta hipótese torna-se factível ao observar que os concretos que sofrem com ciclos de gelo e degelo são “protegidos” com a incorporação intencional de ar. Segundo Neville e Brooks (2013), a presença de bolhas de ar permite o alívio da pressão hidráulica causada pela formação do gelo.

Com isso, observa-se a importância da realização deste estudo para avaliar comportamento de elementos de concreto armado sob o processo de corrosão, quando se utiliza concreto celular (com ar incorporado).

## 1.2. Objetivo

### *1.2.1. Objetivo Geral*

Avaliar o comportamento do concreto celular durante o processo de corrosão de armaduras, observando se o processo é assintomático ou não.

### *1.2.2. Objetivos Específicos*

- Observar e avaliar o surgimento dos sintomas da corrosão de armaduras (fissuras e manchas) sobre a superfície dos corpos de prova de concreto.
- Checar o nível de degradação das barras de aço no interior dos corpos de prova por meio da diferença de massa antes e depois do procedimento experimental e por meio de suas resistências à tração.
- Caracterizar o concreto das 4 famílias (massas específicas distintas: (1 normal e 3 leves) quanto à resistência à compressão, absorção total de água e índice de vazios.
- Comparar o comportamento do concreto celular para 3 famílias de massa específica distintas em relação ao concreto de referência de massa normal no tocante à corrosão de armadura, por meio de realização de monitoramento com ensaios eletroquímicos.

- Verificar a influência do teor de ar incorporado quanto às características gerais do concreto, bem como ao grau de degradação das barras, visualmente, por meio de ensaios físicos e eletroquímicos.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro, a introdução, aborda a motivação de escolha do tema em estudo, com esclarecimentos sobre o foco de desenvolvimento do trabalho, bem como os objetivos que se deseja alcançar.

O segundo capítulo foi destinado à revisão bibliográfica. Nele serão abordados os assuntos referentes ao tema proposto, que no caso foram o concreto leve, corrosão de armadura e métodos de monitoramento de corrosão. São mostradas as definições e características de cada tema, bem como suas relações de influência uns com os outros.

No terceiro capítulo, há uma descrição detalhada da metodologia utilizada para realização do procedimento experimental. Mostrando todos os materiais e procedimentos utilizados.

O quarto capítulo apresenta os resultados dos ensaios e observações feitas ao longo do procedimento experimental, bem como suas respectivas discussões comparativas entre as 4 famílias de concreto e os critérios normativos, caso se aplique.

No quinto e último capítulo encontram-se as considerações finais que sintetizam os resultados obtidos e também algumas sugestões de continuidade para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

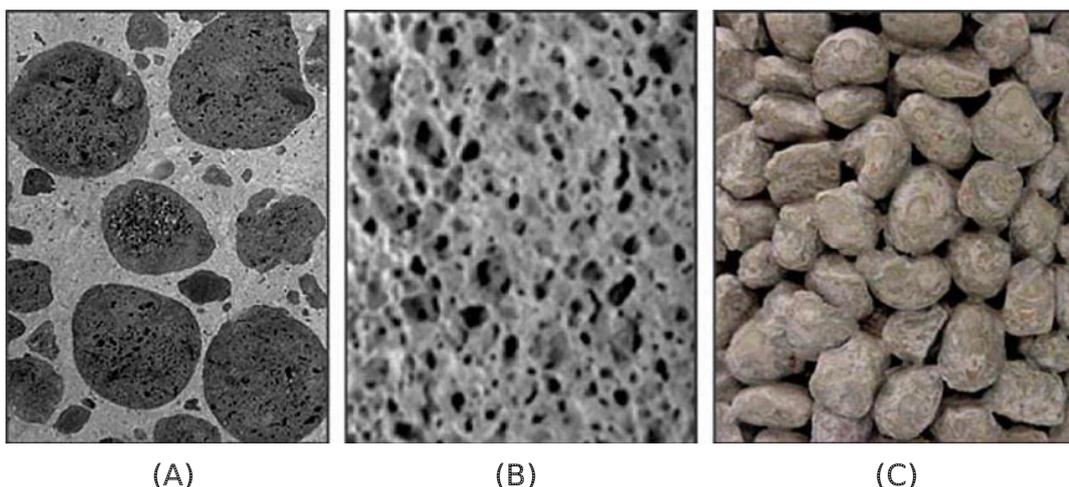
#### 2. Concreto Leve

Conforme conceituação proposta na NBR 8953 (ABNT, 2015) e na NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto leve é aquele onde sua massa específica seca é inferior  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

Neville (2016) expressa o conceito do concreto leve como sendo a redução da massa específica por meio de substituição de parte do material sólido da mistura por vazios.

Rossignolo (2009) define que os concretos leves caracterizam-se pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais. Complementa ainda que os mesmos podem ser classificados em concretos *com agregados leves*, concreto *celular* e concreto *sem finos*. Na Figura 1 pode-se observar os tipos de concreto leve citados.

Figura 1- Tipos de concreto leve: Com agregados leves (A), celular (B), sem finos (C).



Fonte: Rossignolo (2009).

Neville e Brooks (2013) também classificam os concretos leves em três tipos, conforme mostrado na Figura 5. Sendo o primeiro pela utilização de agregados leves (massa específica do agregado menor que  $2600 \text{ Kg/m}^3$ ). O segundo tipo pela introdução de vazios na argamassa (concreto celular,

aerado ou espumoso). O último, pela exclusão dos agregados miúdos da mistura (sem finos).

Já Mehta e Monteiro (2014) introduzem o termo concreto estrutural leve como um concreto estrutural em todos os aspectos, salvo o fato de que, o concreto é feito com agregado leve.

A seguir serão feitas breves explicações sobre cada tipo de concreto leve citado, com foco no concreto *celular*, que é o objeto de estudo, levando em consideração suas propriedades e aplicações.

## 2.1. Com agregados leves

A NM35 (CMN, 1995)<sup>2</sup>, especifica dois grupos gerais de agregados leves que são geralmente utilizados em concretos estruturais. O primeiro grupo é composto por agregados produzidos por expansão, calcinação ou sinterização. São as escórias de alto forno, argila, diatomita, cinza volante e ardósia. O segundo grupo é constituído por materiais naturais como: pedra pomes, escória vulcânica ou tufo.

Observa-se também uma classificação de agregados leves para concretos não expostos ao tempo, cuja função principal seja isolante térmico. De forma semelhante, a NBR7213 (ABNT, 2013), especifica dois tipos gerais de agregados leves para este tipo de utilização.

Grupo I: Agregados preparados por expansão de produtos, como a vermiculita.

Grupo II: Agregados preparados por expansão, calcinação ou sinterização de produtos como: escória de alto forno, argila, diatomita, cinzas volantes, ardósia ou folheto e agregados constituídos por materiais naturais, como pomes, escória vulcânica ou tufo (pedra calcária porosa).

As normas NM35 (CMN, 1995) e NBR7213 (ABNT, 2013), ainda indicam as massas específicas aparentes, no estado seco e solto, dos agregados a

---

<sup>2</sup> Norma Mercosur. CMN-Comité Mercosur de Normalización -NM35:1995 - Agregados leves para concreto estrutural-Especificação

serem utilizados. Variando de valores máximos de 880 kg/m<sup>3</sup> até 1040 Kg/m<sup>3</sup> a depender das faixas granulométricas desses agregados.

Rossignolo (2009) afirma que os agregados naturais têm pouca aplicação em concretos leves estruturais, tendo em vista a variabilidade de suas propriedades e disponibilidade das jazidas.

Os agregados leves, como afirmam Neville e Brooks (2013), mesmo com aparência similar, podem produzir concretos com propriedades muito variáveis, de tal forma que é importante a avaliação de desempenho de cada agregado novo.

Conforme o ACI (2003), os concretos produzidos com agregado leve devem ter resistência à compressão aos 28 dias maior que 17 MPa e a massa específica entre 1120 e 1920 kg/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 1, Rossignolo (2009) mostra referências de massas específicas aparente para concretos leves, produzidos com agregados leves, de diferentes entidades internacionais.

Tabela 1-Valores de referência de massa específica aparente do concreto leve com agregados leves.

Referência	Massa específica aparente do concreto(Kg/m <sup>3</sup> )
NM 35 (1995)	Entre 1680 e 1840
ACI 213 R-03 (2003)	Entre 1120 e 1920
EUROCODE 2 (2007)	Entre 900 e 2000
NS 3473 E (1998)	Entre 1200 e 2200
CEB- FIP (1977)	Menor que 2000
RILEM (1975)	Menor que 2000

Fonte: Rossignolo (2009).

### ***2.1.1. Propriedades***

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as propriedades do concreto fresco feito com agregados leves e os fatores que as afetam são essencialmente os mesmos que influenciam no concreto de peso normal.

- **Trabalhabilidade**

Petrucci (2005) expressa a dificuldade de conceituar o termo trabalhabilidade. Contudo, o autor resume que a trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco que identifica sua aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de homogeneidade.

Mehta e Monteiro (2014) informam que em misturas de concreto com agregado leve, com abatimento elevado e excesso de vibração, geralmente causam a sedimentação da argamassa mais pesada, chamado de flutuação do agregado graúdo. Os autores citam recomendação do ACI 213R-03, onde há especificado que deve-se ter um abatimento de no máximo 125 mm para se obter uma boa superfície de pisos de concreto com agregado leve, por exemplo.

Mehta e Monteiro (2014) ainda complementam que a perda de abatimento pode ser um problema sério quando o agregado continua a absorver uma quantidade considerável de água após a mistura. Como alternativa, Neville e Brooks (2013) recomendam misturar o agregado com parte da água de amassamento antes da adição do cimento.

- **Resistência e massa específica**

Sabe-se que a porosidade da pasta de cimento tem bastante importância com relação à resistência à compressão do concreto. Para concretos tradicionais, com agregados de peso normal, observa-se que a região de fratura ocorre na interface pasta/agregado, ou na própria matriz cimentícia.

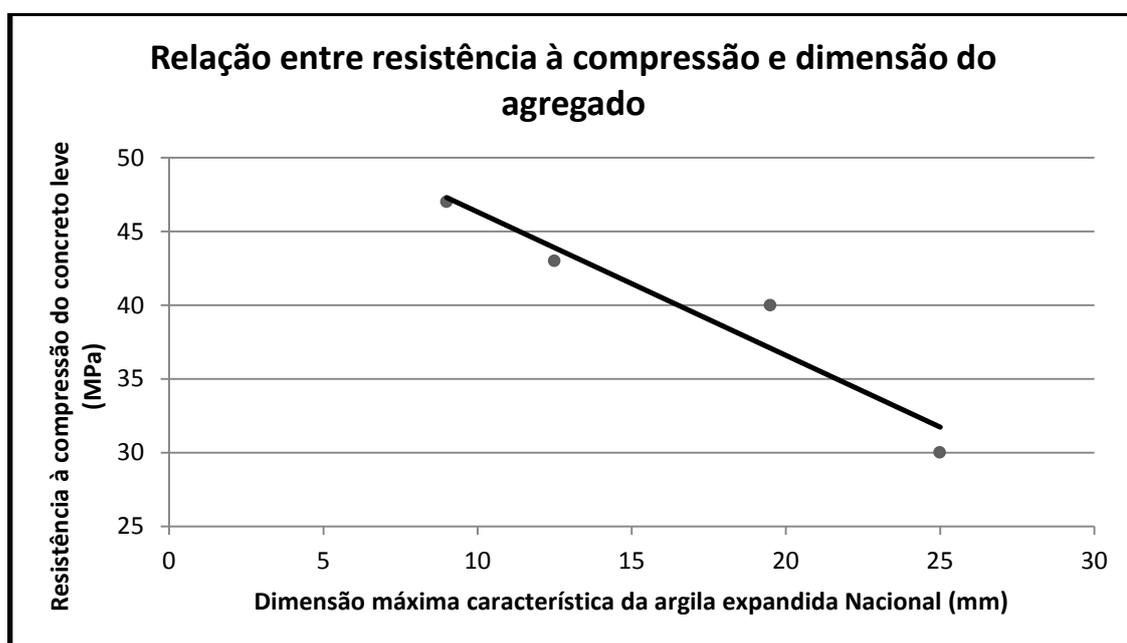
Em contrapartida, como mostra Mehta e Monteiro (2014), no concreto produzido com agregado leve, a fratura se dá através das partículas do agregado, tendo em vista que tanto a zona de transição quanto a pasta de cimento são mais resistentes.

Os autores Rossignolo e Agnesini (2005), mostram que no caso dos concretos produzidos com agregado leve, o tipo e a granulometria deste agregado estão diretamente ligados com a resistência à compressão e massa específica. Complementam ainda que a granulometria do agregado

tem mais influência para os concretos leves, do que os tradicionais. Isto porque na maioria dos agregados leves, sua massa específica é inversamente proporcional à sua dimensão.

No gráfico 1 encontra-se esta relação entre dimensão do agregado leve e resistência à compressão. Na ocasião, foi utilizada a argila expandida nacional.

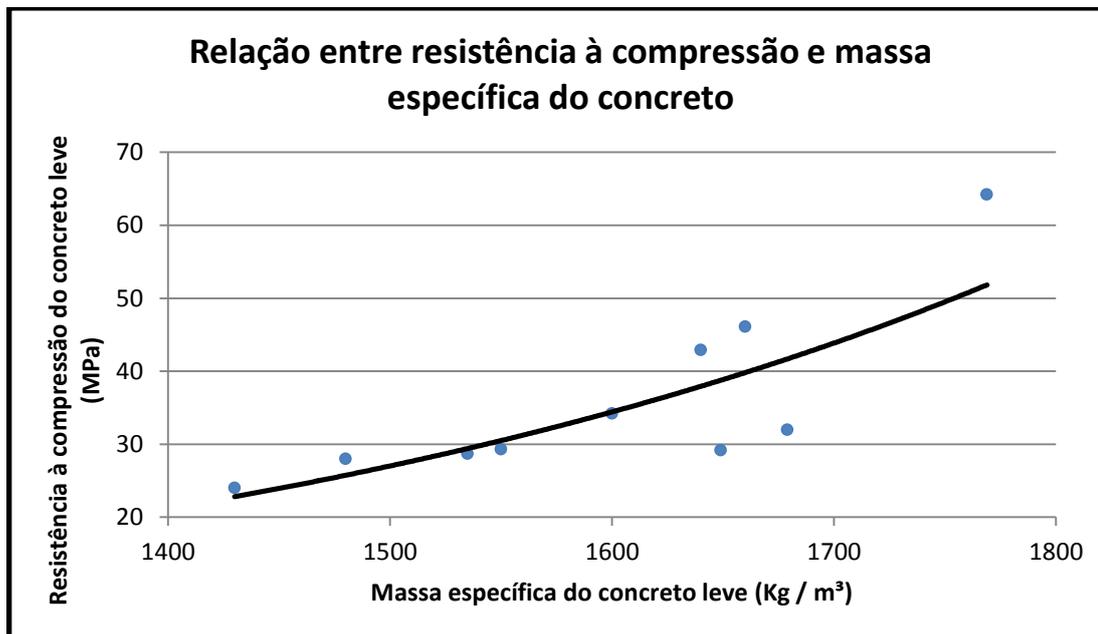
Gráfico 1- Relação entre resistência à compressão do concreto leve e a dimensão máxima característica do agregado leve nacional.



Fonte: Evangelista et al. (1996) apud Rossignolo (2003).

A relação entre massa específica do concreto e sua resistência à compressão atua de forma inversamente proporcional. O gráfico 2 mostra essa relação. Estas informações também foram obtidas por Evangelista et al. (1996) apud Rossignolo (2003).

Gráfico 2- Relação entre resistência à compressão e a massa específica do concreto leve com argila expandida nacional.



Fonte: Evangelista et al. (1996) apud Rossignolo (2003).

Observando o gráfico 2, nota-se que há valores próximos de 50 MPa e, no caso extremo, chegando a cerca de 65 MPa. No tocante aos valores de resistência que se pode atingir de concretos produzidos com agregados leves, Mehta e Monteiro (2014) explicam da seguinte forma:

Projetos de resistência à compressão de 20 a 35 MPa aos 28 dias são comuns, embora, ao utilizar um alto consumo de cimento e um agregado leve de pequena dimensão (isto é, 9 ou 13 mm no máximo) e de boa qualidade, algumas indústrias de pré-moldados e protendidos consigam produzir concretos de 40 a 50 MPa. Agregados leves com microporosidade controlada têm sido desenvolvidos para produzir concretos de 70 a 75 MPa e com massa específica de 1840 a 2000 Kg/m³.

- **Durabilidade**

“Capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenções específicas no manual de uso, operação e manutenção.” (NBR 15575-

1;2013). Esta é a definição de durabilidade encontrada na norma de desempenho para edificações habitacionais.

A norma Brasileira que rege o projeto de estruturas de concreto (NBR 6118;2014) define durabilidade como sendo a capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais em que a mesma estará inserida. Lembrando que as estruturas devem conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente a sua vida útil.

Medeiros, Andrade e Helene (2011) afirmam que a durabilidade é uma necessidade do usuário e não é uma propriedade inerente à estrutura, ou seja, está atrelada à forma como esta estrutura é utilizada (condições de uso, operação e manutenção). Da mesma forma, a CBIC (2013)<sup>3</sup>, indica que a durabilidade das edificações depende de muitos fatores que atuam isolada ou conjuntamente, desde a concepção do projeto até práticas de uso e conservação.

No tocante à durabilidade do concreto, assunto relevante e bastante estudado, sabe-se que a permeabilidade e difusibilidade do concreto são os principais fatores que influenciam no ingresso de agentes agressivos, afetando a sua durabilidade.

Diante do exposto, cria-se uma expectativa com relação à durabilidade de concretos estruturais leves produzidos com agregados leves, haja vista a elevada porosidade destes agregados.

Em resposta à preocupação levantada no parágrafo anterior, Mehta e Monteiro (2014), explicam que a permeabilidade do concreto leve (produzido com agregados leves) é baixa e sua durabilidade é satisfatória.

Os autores complementam que essa baixa permeabilidade advém da ausência geral de microfissuração na interface agregado/pasta. A explicação dessa não fissuração é devido à semelhança dos módulos de elasticidade dos agregados e argamassa, o que não acontece nos concretos tradicionais.

---

<sup>3</sup> CBIC-Câmara brasileira da indústria da construção

Em adição a isso, Rossignolo e Agnesini (2005) afirmam que na maioria dos agregados artificiais, muito embora tenham uma porosidade elevada, como por exemplo, acima de 50 % da argila expandida, apresentam baixa permeabilidade, pois os poros não estão conectados uns com os outros (porosidade fechada).

- **Propriedades térmicas**

O conforto térmico promovido por concretos leves é uma das grandes vantagens desse material. Como diz Rossignolo (2009), os vazios presentes nos agregados leves (como por exemplo, argila expandida) reduzem a absorção e transferência de calor quando comparado com agregados tradicionalmente utilizados.

O coeficiente de dilatação térmica do concreto com agregado leve, é, em geral, menor do que em um concreto normal (Neville e Brooks, 2013).

Como forma de exemplificar as diferenças, no tocante ao comportamento térmico de um concreto normal e um produzido com agregado leve, seguem os dados referentes a algumas propriedades, como por exemplo, condutividade e difusão térmica, na Tabela 2.

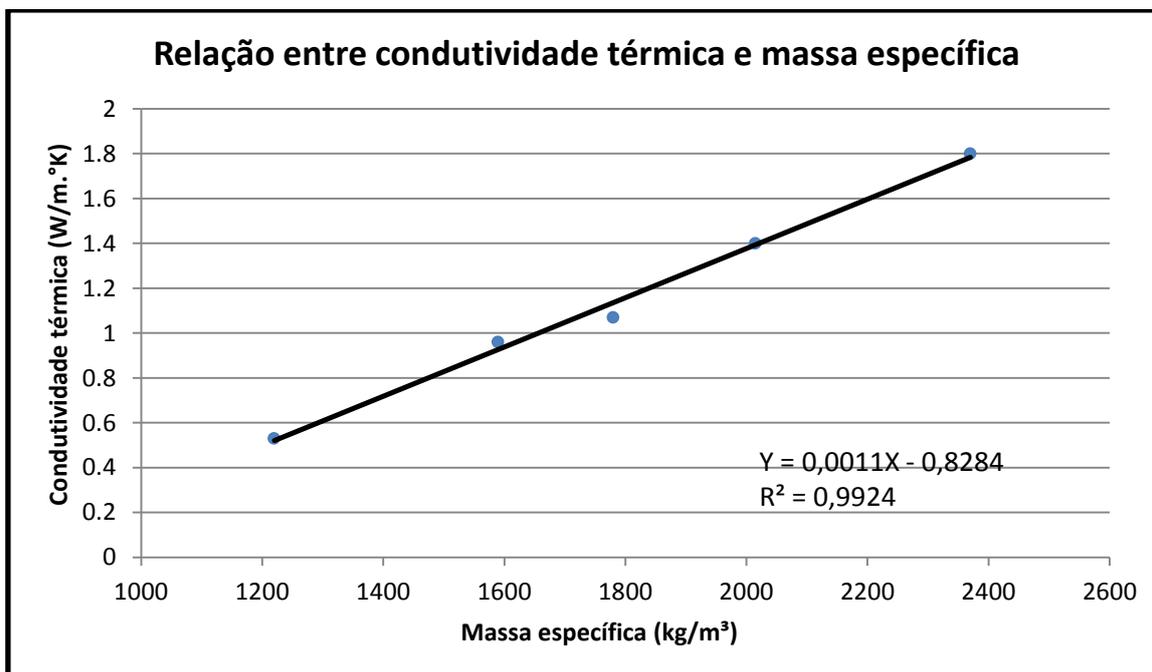
Tabela 2- Propriedades térmicas entre concreto leve e normal

Propriedades	Concreto leve	Concreto normal
Massa Específica (Kg /m <sup>3</sup> )	1850	2400
Resistência à Compressão (MPa)	20-50	20-70
Calor Específico (cal/g. °C)	0,23	0,22
Condutividade Térmica (W/ m.K)	0,58-0,86	1,4-2,9
Difusão Térmica (m <sup>2</sup> / h)	0,0015	0,0025-0,0079
Expansão Térmica (microstrain. 10 <sup>-6</sup> /°C)	9	11

Fonte: Holm e Bremner (2000) apud Rossignolo (2009)

Para melhor verificar a influência da massa específica sobre a condutividade térmica do concreto, Rossignolo (2009) apresenta gráfico com concreto produzido com argila expandida de diferentes massas específicas e seus respectivos valores de condutividade térmica. Estes dados estão representados no gráfico 3.

Gráfico 3- Influência da massa específica do concreto com argila expandida no valor da condutividade térmica.



Fonte: Sacht, Rossignolo e Santos (2007).

### ***2.1.2. Aplicações***

Mehta e Monteiro (2014) citam diversas aplicações de concretos leves produzidos com agregados leves. Dentre elas, pode-se mencionar o tabuleiro da ponte entre São Francisco e Okaland, no Estado da Califórnia, gerando uma economia de cerca de 3 milhões de dólares em aço, devido ao menor peso próprio das lajes.

Outra aplicação citada foi em lajes de edifícios residenciais, como por exemplo, no Lake Point Tower, em Chicago. Ainda no setor imobiliário, há um prédio no Texas todo construído com concreto leve. Neste último caso, se o edifício tivesse sido construído com concreto convencional, teriam que diminuir 17 pavimentos por causa da capacidade de suporte do solo.

Outra aplicação interessante, mostrada por Rossignolo e Agnesini (2005), é em plataformas petrolíferas, tendo em vista que grande parte da solicitação da estrutura é devido ao seu peso próprio. Os autores citam

obras de cais, plataformas e tanques em países como Itália, Dinamarca, Estados Unidos e Noruega entre as décadas de 70 e 90.

Por fim, segundo Mehta e Monteiro (2014) as principais aplicações do concreto leve estrutural (produzido com agregados leves) no mundo, são em concretos pré-moldados e painéis pré-fabricados.

## 2.2. Sem finos

Segundo Neville e Brooks (2013), o concreto dito sem finos é obtido pela exclusão do agregado miúdo da mistura, de modo que ocorra uma aglomeração de partículas de agregados graúdos envolvidos por uma camada de pasta de cimento de espessura aproximada de 1,3 mm.

Petrucci (2005) define este concreto como sendo constituído de cimento e a agregado graúdo, eliminando-se o agregado miúdo com o intuito de provocar vazios na massa.

Para Neville (2016) a massa específica do concreto sem finos depende principalmente da granulometria do agregado. A dimensão habitual varia entre 10 e 20 mm. De mesmo modo, Petrucci (2005) indica que a fração do agregado esteja compreendida entre 9,5 e 19 mm.

Este último autor ainda alerta que tanto o excesso de cimento quanto o de água não são benéficos ao concreto sem finos. No caso do cimento, haverá um aumento na massa específica sem melhoria da resistência mecânica e isolamento térmico. Já a água pode lavar o concreto impedindo a colagem dos grãos.

Ambos os autores Neville (2016) e Petrucci (2005) ainda recomendam que os agregados sejam umedecidos antes da mistura para facilitar o revestimento uniforme pela pasta de cimento. Com relação ao adensamento, é permitido apenas um apiloamento nos cantos das fôrmas. Pois, a vibração pode fazer com que a pasta escape do agregado.

### ***2.2.1. Propriedades***

Neville e Brooks (2013) explicam que pra os concretos comuns, os agregados são bem graduados e a relação água cimento é quem governa a resistência. Já no tocante ao concreto sem finos, isso não ocorre da mesma forma, pois, há um valor ótimo de relação água cimento para que a pasta não escoe para fora das partículas dos agregados, nem que ela seja pouco adesiva ao ponto de não formar uma composição uniforme.

Os valores usuais de resistência à compressão dos concretos sem finos variam de 1,5 a 14 MPa, conforme mostra Neville (2016).

Neville (2016) comenta ainda que a massa específica deste concreto, quando produzido com agregados de peso normal, varia de 1.600 a 2.000 Kg/m<sup>3</sup>. Já aqueles produzidos com agregados leve, podem chegar a uma massa específica de 640 kg/m<sup>3</sup>.

Neville e Brooks (2013) afirmam que a movimentação térmica do concreto sem finos é cerca de 70% do concreto normal. Outra característica formada por esse tipo de concreto é a resistência ao congelamento, tendo em vista a sua ausência de capilares. Contudo, sua alta absorção de água o torna inadequado para uso em fundações.

Ainda no que tange às propriedades térmicas, o coeficiente de condutividade, segundo Neville (2016), do concreto sem finos varia de 0,69 e 0,94 J/m<sup>2</sup>s<sup>0</sup>C/m quando é produzido com agregados normais. Já utilizando agregados leves, esse valor pode chegar a 0,22 J/m<sup>2</sup>s<sup>0</sup>C/m.

### ***2.2.2. Aplicação***

Devido aos grandes poros, esse concreto é altamente resistente ao congelamento, afirma Neville (2016).

Outro benefício dos poros, conforme Neville (2016) é conferir uma boa drenagem de água desse concreto, permitindo sua utilização em pavimentos de estacionamento e próximos de árvores.

Contudo, Neville (2016) alerta que esse concreto não é normalmente utilizado em concreto armado. Sendo o seu principal uso para paredes portantes de habitações e em painéis de fechamento de estruturas reticuladas.

### 2.3. Concreto celular

A NBR 12646 (ABNT, 1992) define o concreto celular espumoso como sendo aquele obtido pela introdução de bolhas de ar milimétricas à argamassa do concreto. Bolhas tais que devem ser homogêneas, estar uniformemente distribuídas e estáveis, bem como incomunicáveis e indeformadas. A densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre  $1300 \text{ kg/m}^3$  e  $1900 \text{ kg/m}^3$ .

Petrucci (2005) classifica os concretos celulares como porosos ou aerados. Para ele este concreto é obtido pela formação de gases ou espuma estáveis, aprisionadas no interior da massa, possuindo massa específica entre 300 e  $1.200 \text{ Kg/m}^3$ .

A NBR 12645 (ABNT, 1992) também classifica o concreto celular e diz que as bolhas de ar podem ser obtidas na forma de uma espuma pré-formada ou gerada no interior da própria mistura. Em nota, a norma ainda indica que as bolhas devem resistir aos esforços decorrentes da mistura, lançamento e bombeamento, ficando estáveis até o início da pega do cimento.

Na definição proposta por Neville e Brooks (2013), os vazios introduzidos no concreto têm dimensões entre 0,1 e 1 mm.

Os autores ainda definem duas maneiras para produzir a aeração. A primeira, denominada concreto gasoso, é obtida por uma reação química que gera um gás na argamassa fresca, de forma que fique incorporada uma grande quantidade de bolhas de gás. O outro tipo, o concreto espumoso, é produzido pela adição de um agente espumante que introduz e estabiliza as bolhas de ar durante a mistura. Este agente espumante

pode ser produzido previamente e ser adicionado ao concreto ou ser misturado e formado dentro da própria mistura.

Outra classificação utilizada para concretos celulares é quanto ao seu processo de cura. Sendo divididos em curados ao ar e autoclavados. Os curados ao ar, como o nome já sugere, são aqueles de cura normal ao ar, com processo comum de hidratação.

Com relação ao concreto celular autoclavado, Ferreira (1987) explica que o concreto é submetido a temperaturas da ordem 160 a 190 graus Celsius e pressão entre 6 e 12 kgf/cm<sup>2</sup>.

Na norma de blocos de concreto celular autoclavado, NBR 13438 (2013), há uma definição sobre este tipo de material da seguinte forma:

Concreto leve, obtido através de um processo industrial, constituído por materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e materiais ricos em sílica, granulados finamente. Esta mistura é expandida através da utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, se for o caso, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas e uniformemente distribuídas.

### ***2.3.1. Incorporação de ar***

A NBR 11768 (2011) define aditivo para concreto como sendo um produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não superior a 5% da massa de cimento.

Segundo Bauer (2001), aditivo é um produto que pode ser adicionado ou não, antes ou durante a mistura do concreto na betoneira, em quantidades pequenas e homogeneizadas. O aditivo acrescenta ou reforça as características do concreto.

Como comentado anteriormente, existem dois processos de incorporação de ar para produção dos concretos celulares. O concreto gasoso e o espumoso. Neville e Brooks (2013) descrevem esse processo da seguinte maneira:

*Concreto gasoso* - Nesse caso as bolhas são formadas pela reação de pó de alumínio ativo, na ordem de 0,2% em relação à massa de cimento, com o hidróxido de cálcio ou álcalis. O resultado dessa reação são bolhas de hidrogênio. Ainda podem ser utilizados para esse fim zinco em pó e algumas ligas de alumínio.

*Concreto espumoso* – Para este tipo de processo é adicionado um agente espumante, o qual normalmente é uma proteína hidrolisada ou resina de sabão. Esse agente introduz e estabiliza as bolhas de ar durante a mistura.

Os autores Neville e Brooks (2013) ainda discorrem a respeito dos agentes incorporadores de ar, afirmando que o constituinte principal do aditivo incorporador é um agente tensoativo que diminui a tensão superficial da água para facilitar a formação das bolhas e garantir que elas sejam estáveis.

A NBR 12645 (ABNT, 1992) informa que esse agente espumante pode ser de origem sintética ou proteica.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que os tensoativos citados também são conhecidos como surfactantes (composto de sais de resina de madeira, materiais proteicos e ácidos de petróleo).

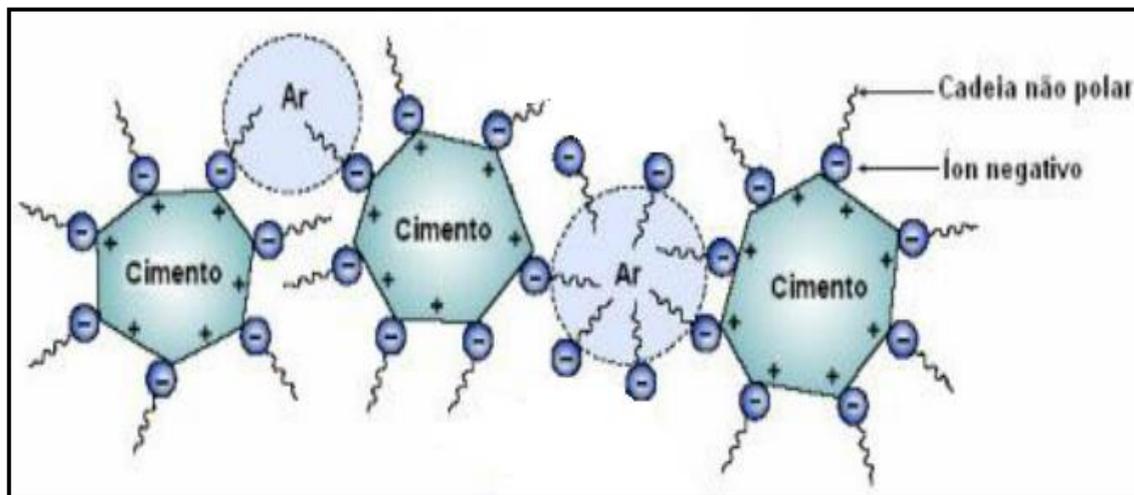
Os autores complementam também que um aditivo tensoativo é composto de moléculas orgânicas de cadeia longa com uma extremidade hidrofílica (atrai água) e outra hidrofóbica (repele água). No caso dos aditivos incorporadores essas cadeias de moléculas são apolares.

Lea (1971) mostra como os vazios de ar são incorporados e estabilizados quando um aditivo surfactante é adicionado à mistura (figura 2):

Na interface ar-água os grupos polares estão orientados na direção da fase aquosa, reduzindo a tensão superficial, promovendo a formação de bolhas e neutralizando a tendência das bolhas dispersas de coalescerem. Na interface sólido-água, onde existem forças direcionadoras na superfície do cimento, os grupos polares ligam-se ao sólido mantendo os grupos apolares orientados para a fase aquosa, tornando a superfície do cimento hidrofóbica e assim o ar

pode deslocar a água e permanecer ligado às partículas sólidas em forma de bolhas.

Figura 2- Estrutura de um surfactante incorporador de ar.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Neville (2016) discute alguns fatores que influenciam na incorporação de ar. O Volume de ar incorporado está diretamente ligado à quantidade de aditivo utilizada. Para uma determinada quantidade de ar desejada, há uma dosagem específica para cada tipo de aditivo.

De forma geral, Neville (2016) elege alguns fatores que demandam maior quantidade de aditivo para uma determinada porcentagem de ar incorporado:

- Quando o cimento é mais fino;
- Quando o cimento possui baixo teor de álcalis;
- Quando o cimento possui cinza volante;
- Quando o agregado possui elevado teor de material muito fino;
- Quando a temperatura do concreto é alta.

Neville (2016) faz um alerta especial para os cimentos que contém cinza volante. Nesses casos há uma dificuldade de mistura. A principal razão disso é que o carbono presente na cinza volante, resultante da queima incompleta, pode absorver o agente tensoativo e diminuir a eficácia do incorporador de ar.

O autor completa ainda que a estabilidade das bolhas de ar está ligada não ao teor total de ar, mas sim ao espaçamento entre as bolhas.

### ***2.3.2. Propriedades***

De forma análoga ao concreto produzido com agregados leves, será realizada uma breve explanação sobre algumas propriedades do concreto celular.

- **Trabalhabilidade**

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do concreto. Isto ocorre tendo em vista a diminuição do atrito interno, promovendo um melhor deslizamento das partículas umas sobre as outras.

Em corroboração ao que foi dito, Cortelassi (2005) afirma que os concretos celulares apresentam maior trabalhabilidade que os concretos convencionais, por terem uma maior quantidade de vazios na sua estrutura.

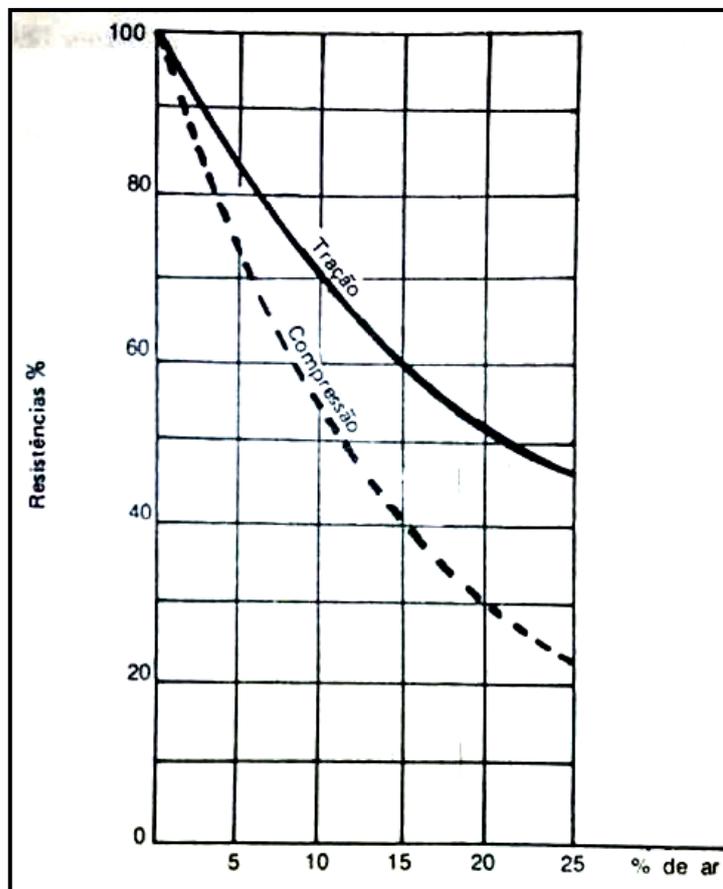
- **Resistência à compressão e massa específica**

Como mostrado anteriormente, a resistência à compressão do concreto leve com agregado leve é inversamente proporcional à sua massa específica.

Da mesma maneira se aplica ao concreto leve celular, onde a resistência atuará de forma inversamente proporcional à quantidade de vazios, tendo em vista que o aumento dos vazios ao concreto leva a uma diminuição de sua massa específica.

Esta relação pode ser verificada no gráfico 4 proposto por Bauer, Noronha e Bauer. (2001). Onde se tem as resistências à tração e à compressão em função da quantidade de ar incorporado, sendo mantida a mesma relação água/cimento.

Gráfico 4- Relação entre resistência à tração e à compressão e quantidade de ar (mesma relação a/c).



Fonte: Bauer, Noronha e Bauer (2001)

Feret formulou a sua expressão geral em 1886. No caso dos concretos convencionais, onde o teor de poros é pequeno, esta expressão foi simplificada por Duff Abrams em 1918, após um extensivo trabalho de testes na "University of Illinois" (TEIXEIRA FILHO e TEZUKA, 1992).

A função de ABRAMS, que relaciona a resistência dos concretos com a relação água/cimento não é uma relação universal, não sendo satisfatória para descrever o comportamento de todas as classes de concretos.

Segundo Teixeira Filho e Tezuka (1992), no caso destes concretos onde a quantidade de vazios é grande, a relação proposta por Abrams não é válida e torna-se necessária a aplicação da expressão geral de Feret.

Nos concretos celulares os teores de ar incorporado são tão elevados que o efeito da relação água/cimento na resistência mecânica chega a ser o

inverso daquele indicado pela relação de Abrams (TEIXEIRA FILHO e TEZUKA, 1992).

A seguir apresenta-se a expressão de Feret que relaciona a resistência dos concretos com a soma dos volumes absolutos de cimento, água e ar na pasta endurecida.

$$R = K \left( \frac{C}{C + W + A} \right)^2$$

Onde:

R – Resistência do concreto;

C, W, A – Volumes absolutos de cimento, água e ar respectivamente;

K – Constante.

Legatski (1978) levanta os principais fatores que afetam a resistência à compressão dos concretos celulares:

- Massa específica;
- Consumo de cimento;
- Consumo total de água;
- Agregado- Tipo e qualidade;
- Aditivo;
- Condição de cura

Neville (2016) elabora uma tabela que relaciona dados de resistência à compressão e massa específica, baseada nos dados de BCA (1991)<sup>4</sup>. Essas informações estão na tabela 3.

Tabela 3- Dados orientativos sobre concreto celular.

<b>Massa Específica Seca em estufa (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>360</b>	<b>760</b>	<b>1.180</b>	<b>1.550</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

<sup>4</sup> British Cement Association- foamed concrete

- **Durabilidade**

Da mesma forma, quando se falou em concreto leve com agregados leves, a durabilidade é uma preocupação também no caso do concreto celular.

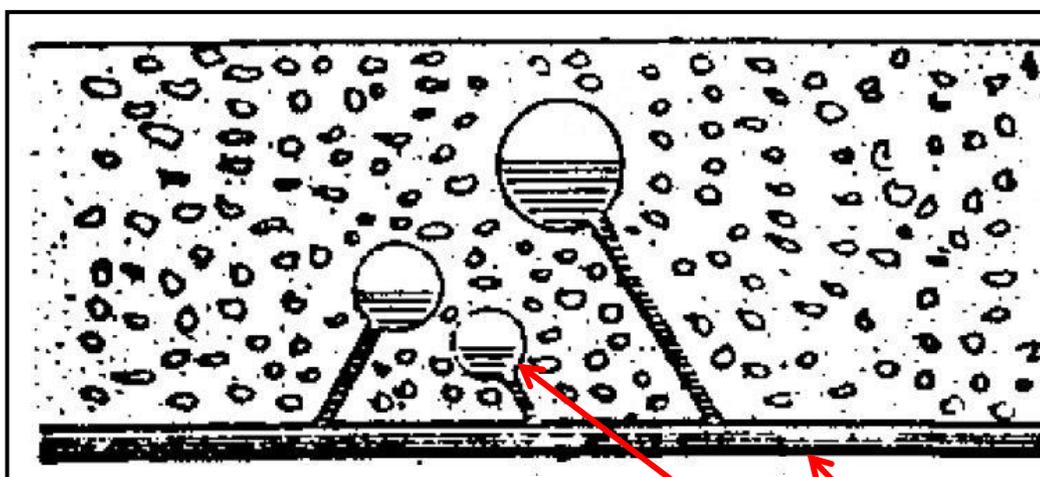
A estrutura porosa do concreto e suas características, como absorção total, absorção capilar, permeabilidade e difusão são fatores que influenciam na penetração de agentes agressivos e, por conseguinte na sua durabilidade.

Neville e Brooks (2013) conceituam a permeabilidade como sendo a facilidade com a qual os líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto.

Os autores ainda explicam que a permeabilidade de concretos produzidos com agregados normais é governada pela porosidade da pasta de cimento. Contudo, alertam que a permeabilidade não é uma simples função da porosidade, tendo em vista a grande influência da segmentação dos capilares.

Sobre a absorção de água por capilaridade, Ferreira (1987) diz que no concreto celular o sistema capilar encontra-se conectado por várias e pequenas bolhas de ar que não se comunicam entre si. Dessa forma a absorção de água por capilaridade se torna interrompida e ocorre em pequenas quantidades na superfície do material (Figura 3).

Figura 3-Absorção por capilaridade interrompida.



Fonte: Ferreira (1987)

Poros sem  
comunicação

Água

Mariz (2013) observou o aumento da absorção capilar de água com a diminuição das massas específicas dos concretos, em seus estudos sobre as propriedades do concreto celular.

Cortelassi e Carbonari (2008) em estudos com concreto celular espumoso de alto desempenho encontraram coeficientes de permeabilidade baixos. Eles atribuem esse comportamento à elevada compacidade da matriz de alto desempenho e a baixa relação água cimento. Os autores ainda afirmam que a permeabilidade não está relacionada com a porosidade total, mas com a porosidade capilar.

Com relação à difusão, Helene (1993), fala que a penetração de cloretos depende de fatores, como por exemplo, o gradiente de concentração de cloretos, temperatura ambiente, os ciclos de molhagem e secagem do concreto, composição e adições do cimento, e outros.

Em experimentos de carbonatação realizados por Teixeira Filho e Tezuka (1992), em corpos de prova prismáticos com concreto celular, mostraram a influência da massa específica nos resultados.

Para as massas específicas de 1900 e 1700 Kg/m<sup>3</sup>, não se observou sinais de carbonatação até os 90 dias. Contudo, para os corpos de prova com massa específica de 1500 Kg/m<sup>3</sup> observou-se uma profundidade de carbonatação crescente com o tempo.

Vale lembrar que a massa específica varia com a quantidade de ar incorporado à mistura, com isso, observa-se a importância da investigação das propriedades do concreto celular (absorção por imersão e capilar, porosidade e permeabilidade) antes da sua utilização, levando em consideração as condições ambientais de exposição e sua finalidade.

Araújo et al. (2014) chamam atenção para a possibilidade de corrosão prematura em concreto poroso. Complementam que a corrosão pode ocorrer ou não na presença de agentes agressivos, tendo em vista a restrição de formação da camada protetora nos locais de contato das bolhas de ar e armadura.

- **Propriedades térmicas**

Experimentos realizados por Ferreira (1987) mostram que a condutividade térmica do concreto decai com a diminuição da massa específica.

Neville (2016) elabora uma tabela que relaciona dados de condutividade térmica, massa específica e teor de ar, baseada nos dados de BCA (1991)<sup>5</sup>, de acordo com tabela 4.

Petrucci (2005) resume os resultados de condutibilidade térmica encontrados por diversos autores, conforme tabela 5.

Tabela 4-Relação entre massa específica, condutividade térmica e teor de ar.

<b>Massa Específica Seca em estufa (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>360</b>	<b>760</b>	<b>1.180</b>	<b>1.550</b>
<b>Teor de ar (%)</b>	<b>78</b>	<b>62</b>	<b>45</b>	<b>28</b>
<b>Condutividade térmica (Jm/m<sup>2</sup>s<sup>0</sup>C)</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

Tabela 5- Relação entre massa específica e condutibilidade térmica.

<b>Massa específica aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (K cal/m/h/<sup>0</sup>C)</b>
<b>200</b>	<b>0,074 a 0,100</b>
<b>300</b>	<b>0,083 a 0,114</b>
<b>500</b>	<b>0,160 a 0,220</b>
<b>800</b>	<b>0,290 a 0,400</b>
<b>1000</b>	<b>0,380 a 0,530</b>
<b>1200</b>	<b>0,480 a 0,660</b>

Fonte: Adaptado de Petrucci (2005)

Ferreira (1987) ainda afirma que essa estrutura de bolhas de ar dispersas e incomunicáveis dentro da massa de concreto, conferem ao concreto celular notáveis características de isolamento térmico.

<sup>5</sup> British Cement Association- foamed concrete

- **Retração**

Neville (2016) e Petrucci (2005) alertam que o concreto celular possui retração elevada. Este último autor afirma que a influência da retração da pasta para concretos celulares é mais importante do que no concreto denso, devido aos vazios.

Neville (2016) informa que os valores de retração para concretos celulares variam de  $700 \times 10^{-6}$  para massa específica seca em estufa de  $1.600 \text{ Kg/m}^3$  a  $3.000 \times 10^{-6}$  para massa específica de  $400 \text{ Kg /m}^3$ .

### ***2.3.3. Aplicação***

Ferreira (1987) cita alguns tipos de aplicação para o concreto celular:

- Isolante térmico de lajes de cobertura e terraços;
- Isolante térmico de linhas subterrâneas de água fria e quente;
- Isolante térmico de frigoríficos;
- Isolante térmico de paredes corta fogo;
- Enchimentos de pisos e contra pisos;
- Enchimento de lajes nervuradas e rebaixadas;
- Revestimento de estruturas metálicas, etc.

Observa-se que há uma grande aplicação de concretos celulares em vedações verticais (estruturais ou não) de paredes de concreto, tendo em vista sua leveza e bom comportamento térmico.

Este tipo de utilização é notório em programas de habitações de interesse social, como por exemplo, o “Minha casa Minha vida”.

De acordo com a ABCP (2002), a construção de edificações com paredes de concreto celular moldadas no local, no Brasil, começou na década de 80, em Natal (RN) e Manaus (AM). Um dos fatores positivos desse sistema construtivo foi o grau de conforto térmico oferecido pelos ambientes internos.

Nos últimos 30 anos, cerca de 55 mil unidades habitacionais com o sistema construtivo de parede de concreto moldadas no local utilizando concreto celular foram executadas no Brasil<sup>6</sup>. Isso equivale a mais de 2 milhões e 300 mil metros quadrados de área construída.

As obras são divididas principalmente em unidades térreas e sobrados (mais de 49.000 moradias), unidades com até 5 pavimentos (cerca de 4.300 moradias), bem como obras com mais de 5 pavimentos (698 moradias), conforme exemplos das figuras 4 a 9.

---

<sup>6</sup> Obras de conhecimento e participação da empresa Gethal ( informações obtidas no site [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras))

Figura 4- 3.543 unidades em Altamira-PA (2014)



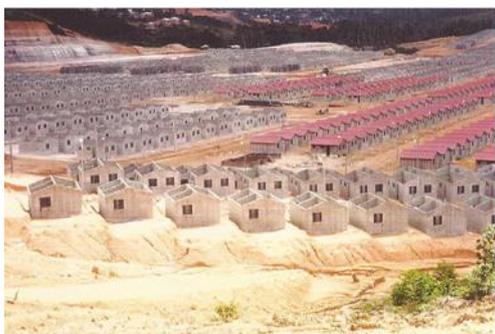
Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

Figura 5- 812 unidades em São Miguel dos Campos-AL (2014)



Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

Figura 6- 12.000 unidades em Manaus-AM



Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

Figura 7 -1.500 unidades em Palmares-PE (2013)



Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

Figura 8-Curitiba –PR. Conjunto habitacional 480 unidades de apartamento.



Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

Figura 9- Capanema-PA. 1.032 unidades sobrados. (2014)

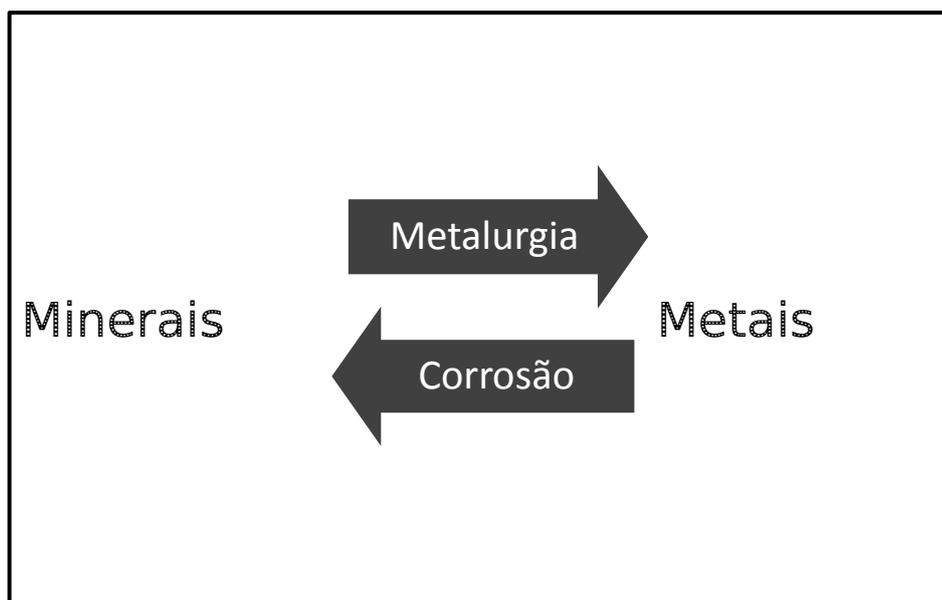


Fonte: [gethal.com.br/obras](http://gethal.com.br/obras)

### 3. Corrosão de armadura

Como mostra Ribeiro e Cunha (2014), a corrosão dos metais se dá de maneira inversa do processo que ocorre na metalurgia extrativa, conforme esquema da Figura 10.

Figura 10-Processo básico de corrosão



Fonte: Ribeiro e Cunha (2014)

Gentil (2011) define corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. O autor ainda afirma que em geral, a corrosão é um processo espontâneo e está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam.

A corrosão, segundo o autor, pode ocorrer sob diferentes formas, conforme destacado a seguir:

**Uniforme:** A corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura.

**Por placas:** A corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.

**Alveolar:** A corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.

**Puntiforme ou por pite:** A corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que seu diâmetro.

**Intergranular:** A corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos.

**Intragranular:** A corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos.

Bertolini (2010) também afirma que as consequências da corrosão estão ligadas ao modo como ocorre o ataque, e descreve algumas formas de corrosão, as quais pode-se citar:

**Dissolução seletiva:** No caso de algumas ligas, pode-se verificar um ataque corrosivo que aflige apenas um componente da própria liga.

**Corrosão sob tensão:** Este é um caso de interação ambiente e solicitação mecânica. As fissuras são produzidas pela ação combinada do ambiente corrosivo e da solicitação de tração, são orientadas em direção perpendicular à da solicitação de tração e podem avançar com velocidade muito elevada, levando a condições instáveis, podendo ocasionar uma ruptura frágil. Este tipo de corrosão manifesta-se só por acoplamentos específicos entre o ambiente e o metal. Por exemplo: os aços carbono.

Broomfield (2007) afirma que os aços presentes dentro do concreto podem ser protegidos contra a corrosão, tendo em vista que o concreto confere um ambiente alcalino para as armaduras.

Fusco (2008) complementa dizendo que a proteção alcalina do concreto provém da água dos poros, cujo pH é em torno de 12,5. Esta proteção é devida ao fenômeno da passivação do aço, na qual é explicada como

sendo uma película microscópica impermeável de óxido de ferro aderida às armaduras.

Como afirmam Ribeiro e Cunha (2014), basicamente existem dois processos de corrosão que atuam nas armaduras de aço para concreto armado. São elas a corrosão química e a eletroquímica.

Com relação à corrosão química, ou somente oxidação, pode-se destacar que se trata de uma reação entre gás e metal. À temperatura ambiente, em condições normais da atmosfera, esse tipo de reação não provoca deterioração substancial. O produto final desse tipo de corrosão é comumente conhecido por “carepa” (oxidação superficial quando os aços estão expostos ao ar).

No que concerne à corrosão eletroquímica, pode-se tecer alguns comentários sobre as condições primordiais para ocorrência. Helene (1993), elencou 4 condições primordiais para a ocorrência da corrosão eletroquímica. São eles:

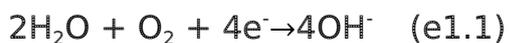
- *Existência de eletrólito:* A água que está presente no concreto atua como eletrólito, transportando os íons necessários às reações de corrosão eletroquímica.
- *Diferença de potencial:* Qualquer diferença de potencial de eletrodo que se produza entre dois pontos da barra de aço, seja por diferença de umidade, aeração, concentração salina, ou correntes de fuga, são capazes de desencadear as pilhas de corrosão eletroquímica.
- *Existência de oxigênio:* É necessário que haja a presença de oxigênio para a formação da ferrugem (óxidos/hidróxidos de ferro).
- *Agentes agressivos:* A presença de agentes agressivos, especialmente o  $\text{Cl}^-$  têm papel importante na despassivação da armadura.

Ribeiro e Cunha (2014) resumem a reação da corrosão de armadura da seguinte forma (exemplo esquemático na Figura 11):

Nas zonas anódicas, o ferro perde elétrons, ocasionando a dissolução do metal.



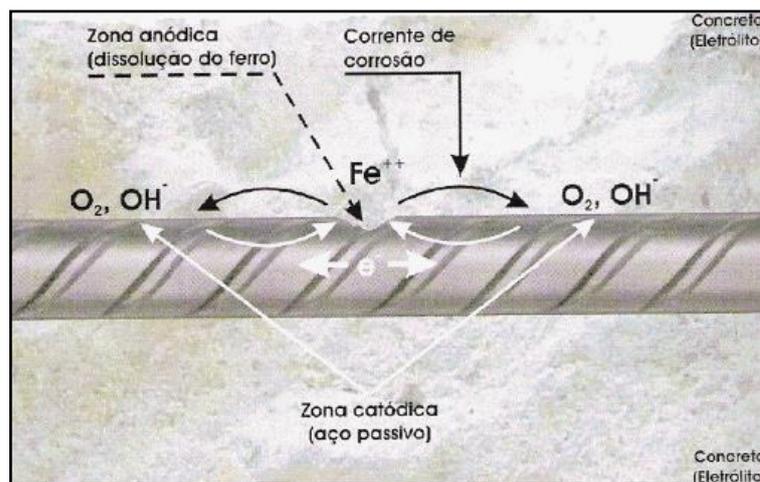
Nas zonas catódicas, em meios neutros e aerados, ocorre redução.



Acarretando, assim, as seguintes reações de corrosão, como formação de ferrugem.



Figura 11- Exemplo do mecanismo de uma corrosão eletroquímica



Fonte: Cascudo (2005)

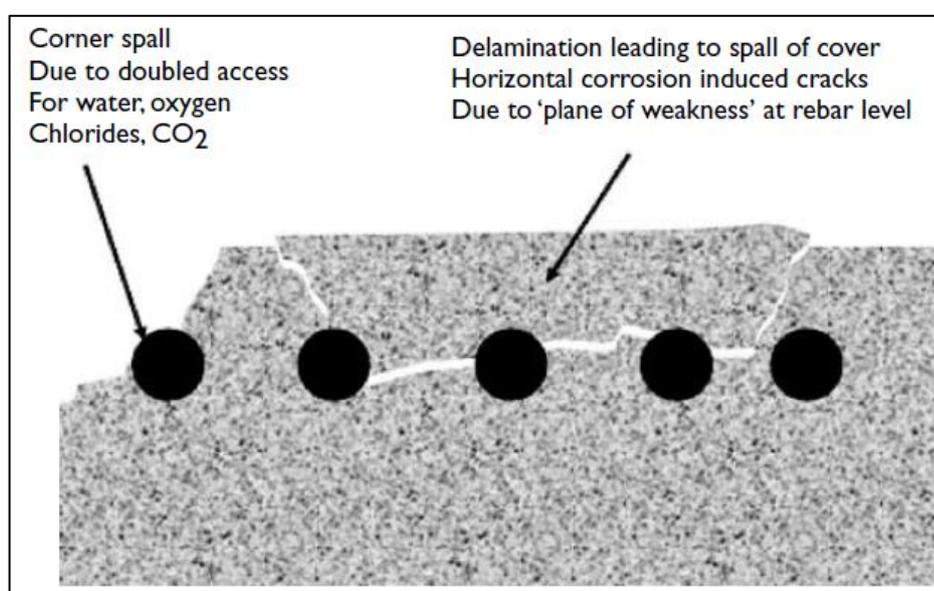
Neville (2016) ressalta o papel fundamental da água e oxigênio no desenvolvimento da corrosão. Para ele, provavelmente, não há corrosão em concretos secos em umidade relativa inferior a 60%. Também não ocorre corrosão no concreto totalmente imerso em água, sendo a umidade relativa ótima para a corrosão entre 70 e 80 %.

Nas regiões em que o recobrimento do concreto não é adequado, a corrosão torna-se progressiva com conseqüente formação de óxidos e hidróxidos de ferro, que passam a ocupar de 3 a 10 vezes o volume

original do concreto, podendo causar pressões superiores a 15 MPa (RIBEIRO E CUNHA, 2014).

Broomfield (2007) mostra na Figura 12 exemplo de desenvolvimento de fissuras no concreto devido à corrosão de armadura. O autor diz que os cantos “sofrem” mais tendo em vista o duplo caminho de acesso de água, oxigênio e agentes deletérios.

Figura 12- Esquema lascamento e delaminação do concreto de cobertura devido à corrosão de armadura.



Fonte: Broomfield (2007)

Broomfield (2007) sugere ainda que a fissuração do concreto pode ser iniciada com apenas cerca de 100 micrometros de perda de secção do aço. Mas essa quantidade necessária depende da espessura do cobrimento de concreto, proximidade com os cantos das peças, bem como proximidade entre as barras e taxa de corrosão.

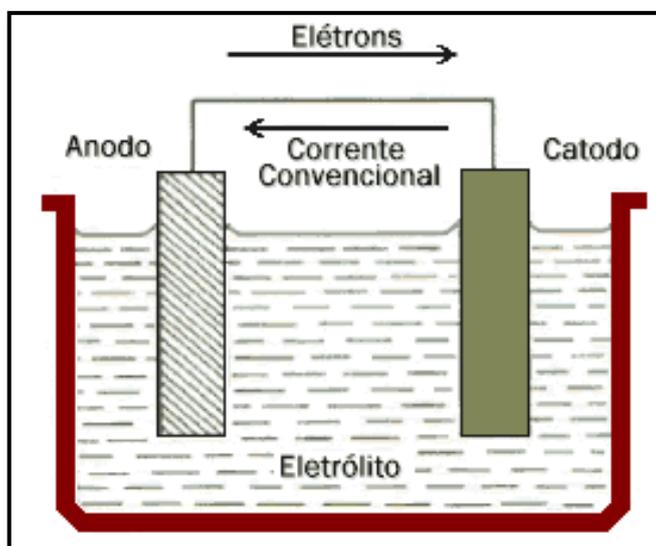
Ainda com relação aos tipos de corrosão, cabe abordar aqui neste trabalho a chamada corrosão galvânica, onde o cátion e ânion estão imersos em um mesmo eletrólito e por diferença de atividade de potencial há formação de uma pilha e ocorre transferência de elétrons.

Sousa (2014) descreve que o par galvânico, ou pilha galvânica, os eletrodos em contato entre si apresentam diferentes resistências à corrosão por causa de suas diferentes composições.

O autor ainda explica que quando um eletrodo que está em equilíbrio em um eletrólito (pode-se tomar como exemplo o aço dentro do concreto), é conectado eletricamente a outro eletrodo com diferente resistência à corrosão (como por exemplo, o cobre), há a formação de um fluxo de corrente entre os dois até que se obtenha o equilíbrio.

Essa polarização (esse processo de troca de elétrons) será tão mais intensa quanto maior for a diferença de potencial entre os eletrodos. Vale salientar que quanto maior a diferença entre a área do cátodo e do ânodo, mais intensa será a corrosão do ânodo. Na Figura 13, observa-se um esquema de como funciona esse processo que foi descrito.

Figura 13-Formação da pilha galvânica.



Fonte: <http://wmnett.com.br/quimica/pilhas-e-eletrolise/>

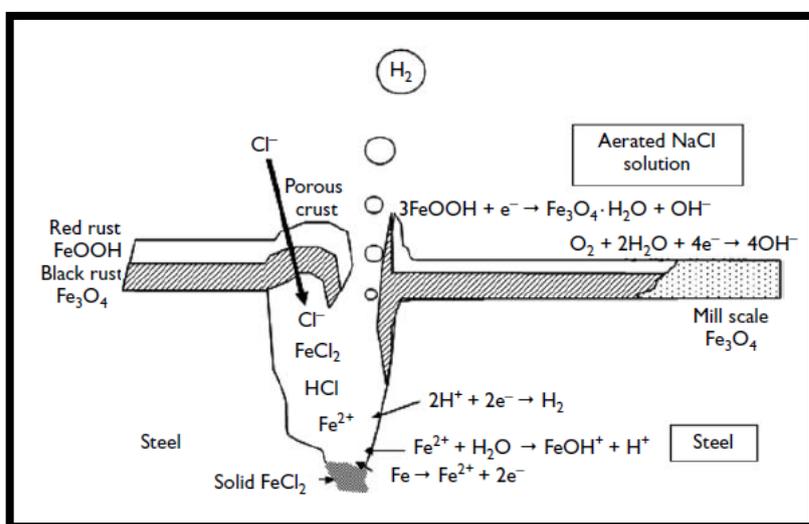
### 3.1. Corrosão por cloretos e seus aspectos intervenientes

Para efeitos práticos deste estudo, será discutida aqui a corrosão por pites, causada por cloretos.

Cascudo (1997, apud Almeida e Sales 2014, p.58), afirma que a presença do íon cloreto é uma das principais causas da corrosão de armaduras, agindo no período de iniciação, rompendo o filme passivo do aço, bem como na aceleração e propagação da corrosão.

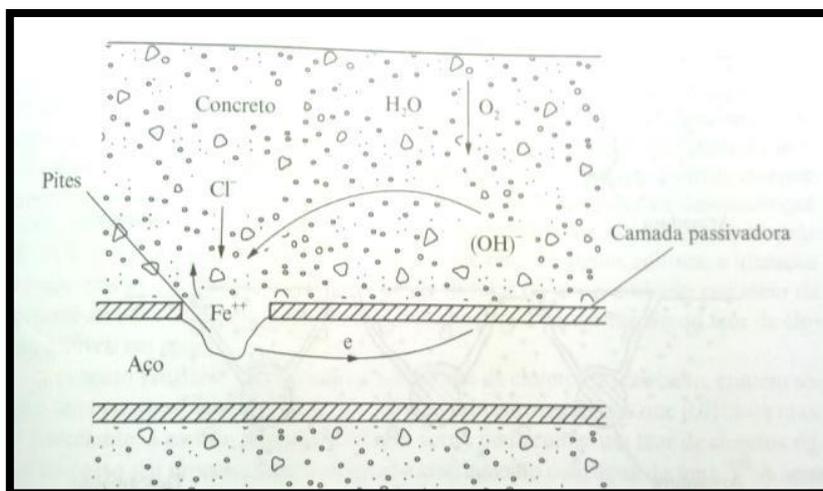
Almeida e Sales (2014) explicam que os cloretos agem de forma localizada, rompendo o filme passivo, conforme figura 14. Da mesma maneira, Neville (2016) mostra na figura 15 que os íons cloreto destroem o filme passivo, e, na presença de água e oxigênio, ocorre a corrosão.

Figura 14-Modelo de clássico de corrosão por pite.



Fonte: Broomfield (2007)

Figura 15-Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.



Fonte: Neville (2016)

Neville (2016) ainda descreve essa reação de ataque dos cloretos ao filme passivo da seguinte forma:



Helene (1993) cita algumas fontes internas e externas de íons cloreto que podem contaminar as estruturas de concreto armado:

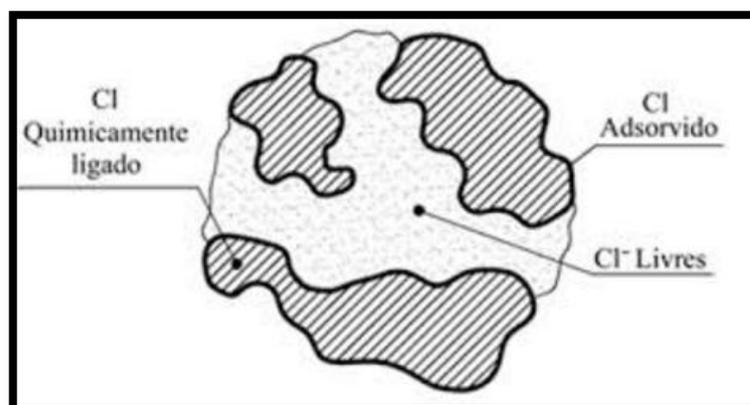
- Água do mar;
- Atmosferas marinhas e industriais;
- Lavagem de fachadas e pisos com ácido muriático;
- Tratamento de combate ao congelamento com sais à base de cloreto de sódio;
- Utilização Agregados contaminados e águas salobras na confecção do concreto;
- Utilização de aditivos aceleradores de endurecimento à base de cloreto

Segundo Cascudo (1997, apud Ribeiro e Cunha, 2014, p110), o cloreto se apresenta sob três formas no concreto (figura 16).

- Quimicamente ligado ao  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico);
- Adsorvido na superfície dos poros;
- Íons livres.

O autor ainda complementa que mesmo com a capacidade do cimento em se combinar com o íon cloro, sempre haverá íons livres. Estes íons livres são os que efetivamente causam preocupação no tocante à corrosão de armaduras.

Figura 16-Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura de concreto.



Fonte: Silva Júnior (2001).

Os cloretos são encontrados em maior concentração nos oceanos, sendo transportado pela atmosfera através do spray gerado pelas ondas. Por isso deve-se tomar um maior cuidado com as obras localizadas próximas à orla marítima. Na Tabela 6, proposta por Ribeiro (2014), encontra-se a concentração dos principais íons presentes na água do mar, corroborando para a afirmação realizada sobre os cloretos.

Tabela 6- Concentrações dos principais íons presentes na água do mar.

Íons	Teores médios
Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	2.800 mg/L
Cloreto ( $\text{Cl}^-$ )	20.000 mg/L
Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ )	1.400 mg/L
Sódio ( $\text{Na}^+$ )	11.000 mg/L

Fonte: Ribeiro (2014).

Bertolini (2010) afirma que a área mais crítica da estrutura de concreto exposta à ação da água do mar é aquela entre o nível mais baixo e mais alto da maré. O autor explica que essa região sofre, simultaneamente, o ataque químico e físico. As regiões submersas não possuem oxigênio livre suficiente para o desenvolvimento da corrosão de armaduras.

Helene (1993) comenta muito bem que em situações onde ocorre molhagem e secagem na presença de cloreto de sódio, por exemplo, outro fenômeno pode ocorrer, agravando o problema de corrosão das armaduras. Os ciclos podem causar cristalização do sal no interior do

concreto, ocasionando outro fenômeno de deterioração superficial. As pressões de expansão podem chegar a 60 MPa. Contudo, essa concentração que permita a cristalização só ocorre nos primeiros milímetros, o que diminui a possibilidade de danos expressivos.

- **Limites de concentração de cloretos**

Para Neville (2016) não existe um limite universal válido para a concentração mínima de íons cloreto na superfície do aço para que a corrosão se inicie. O autor complementa ainda que é difícil estabelecer esse limite tendo em vista que há fatores que o influenciam que não são completamente compreendidos. Mais ainda que a distribuição dos cloretos na pasta de cimento endurecida não é uniforme.

Hausmann (1967) indica que a quantidade limite de íons cloreto para despassivar a armadura está relacionada a um quociente entre concentração de cloretos e hidróxidos. Esta relação foi estabelecida em um valor de 0,6.

Ribeiro e Cunha (2014) mostram uma tabela com valores percentuais de concentração de cloretos e risco de corrosão, encontrados na norma BS1881 (1988), conforme tabela 7.

Tabela 7-Relação entre risco de corrosão e a percentagem de cloretos.

Risco de corrosão	Teor de cloretos em relação à massa de cimento (%)	Teor de cimento em relação à massa de concreto (%)
Desprezível	< 0,2	< 0,03
Baixo	0,2 a 0,4	0,03 a 0,06
Médio	0,4 a 1,0	0,06 a 0,14
Alto	> 1,0	> 0,14

Fonte: Ribeiro e Cunha (2014) apud BS1881 (1988).

Helene (1993) considerou como um limite geral de 0,4% em relação à massa de cimento como sendo teor de cloretos suficiente para despassivar a armadura. Contudo, vale salientar que o autor já encontrou casos de armaduras corroídas com teores inferiores, bem como armaduras não corroídas com teores superiores.

Farias (1991) ressalta a importância de se verificar, além da concentração de cloretos, a resistividade elétrica do concreto e a disponibilidade de oxigênio na avaliação do processo de corrosão de armaduras.

Neville (2016) apresenta o limite de 0,4% para o teor total de cloretos no concreto armado, prescritos pelas normas BS 8110-1:1997 e BS EN 1992-1:2004.

A NBR 12655 (2015) estabelece o valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando-se a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos. Ou seja, para proteger as armaduras, no estágio inicial, de concepção da estrutura, os percentuais de cloreto em relação à massa de cimento devem seguir a Tabela 8.

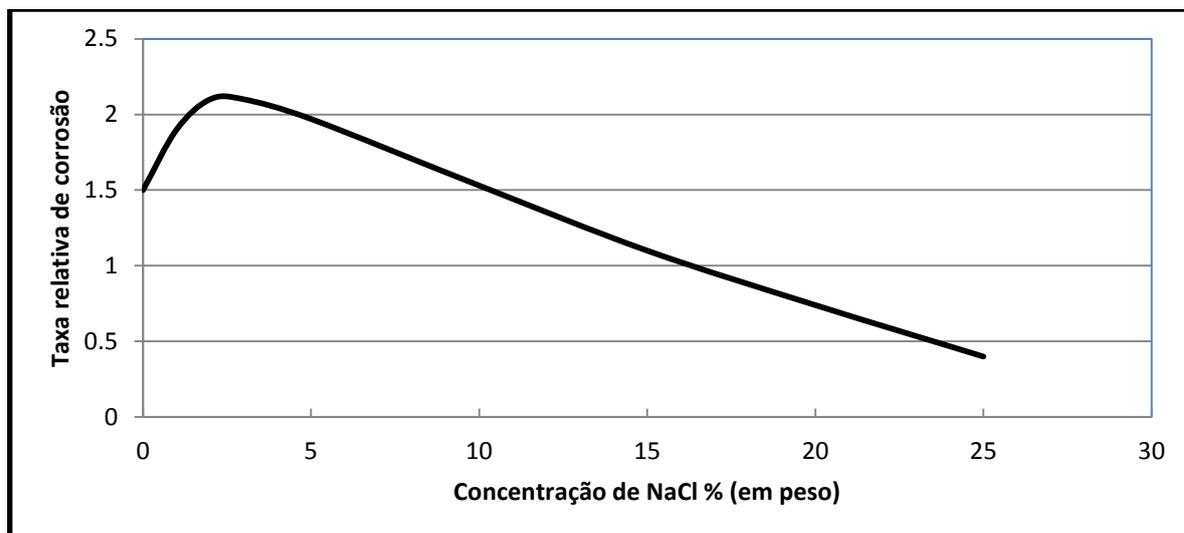
Tabela 8- Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl <sup>-</sup> ) no concreto % sobre a massa de cimento
<b>Todas</b>	Concreto protendido	<b>0,05</b>
<b>III e IV</b>	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	<b>0,15</b>
<b>II</b>	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	<b>0,30</b>
<b>I</b>	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	<b>0,40</b>

Fonte: NBR 12655 (2015)

Outro dado interessante trazido pelos autores Ribeiro e Cunha (2014) é a relação entre a concentração de cloreto de sódio e a corrosão. Os autores afirmam que o cloreto de sódio é um eletrólito forte, aumentando a condutividade, a qual é fundamental do processo corrosivo eletroquímico. Para exemplificar esta relação, observa-se no gráfico 5 a variação da taxa de corrosão com o aumento da concentração de cloreto de sódio em água. Pode-se observar que a concentração em torno de 3 a 4 % obtiveram os maiores valores de taxa de corrosão.

Gráfico 5- Relação entre concentração de cloreto de sódio e taxa de corrosão.



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Cunha (2014)

### 3.2. Penetração dos íons cloreto

Neville (2016) explica de forma simples a situação que ocorre com estruturas em regiões litorâneas de tempo quente. O concreto recebe a água do mar por absorção e pode ficar saturado. Após a secagem, a água evapora e os sais permanecem. Com o tempo essa concentração de sais aumenta na superfície, gerando um gradiente de transporte para o interior do concreto, por difusão.

Nepomuceno (2005) diz que as substâncias agressivas penetram através da rede de poros da microestrutura do concreto. Complementa que esse transporte pode ser causado por diferença de concentração, pressão, temperatura, densidade e potencial elétrico.

Nepomuceno (2005) ressalta ainda a complexidade da investigação dos mecanismos de transporte de fluidos no concreto e que esse processo depende de fatores como a porosidade, distribuição do tamanho dos poros e conectividade entre eles. Por sua vez, esses fatores estão ligados ao tipo de cimento, sua hidratação e detalhes na produção do concreto.

Segundo Ribeiro e Cunha (2014), o ingresso de cloretos  $\text{Cl}^-$  se dá por meio de difusão. Este fenômeno é o processo transporte de substâncias de um meio para o outro devido a uma diferença de potencial químico e concentração.

Crank (1975, apud ANDRADE, 2005, P.933) informa que a formulação para modelar difusão em materiais porosos, foi primeiramente proposta por Fick em 1855. Conhecida como segunda lei de Fick, conforme segue a equação 1.7.

$$C(x,t) = C_s [ 1 - \text{erf}^1(x/2\sqrt{tD}) ] \quad (\text{e. 1.7})$$

Onde:

$C(x,t)$ = Concentração de cloretos na profundidade  $x$  a partir da superfície do concreto em um dado tempo  $t$  (%)

$C_s$  = Concentração superficial de cloretos (admitida como sendo constant) (%);

$X$ = Profundidade (cm);

$D$ = Coeficiente de difusão de cloretos (admitindo como sendo constante) ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ );

$T$ = Tempo (anos);

$\text{Erf}$ = Função de erro de Gauss.

Contudo, Andrade (2005) alerta que certas premissas necessárias para a utilização da lei de Fick não refletem de forma adequada o comportamento da penetração de íons no concreto. Para a determinação da vida útil de uma estrutura precisa-se de modelos que contemplem os seguintes aspectos:

- Período de absorção;
- Variação do coeficiente de difusão e da concentração superficial no tempo;
- Dependência do coeficiente de difusão e concentração superficial;

- Influência do tipo de cimento do coeficiente de difusão de cloretos.

Atualmente se utiliza uma abordagem probabilística na previsão de vida útil das estruturas. Andrade (2001), em sua tese de doutorado, desenvolveu modelo que leva em consideração essas variações importantes. Segundo Ele, na abordagem probabilística, os principais pontos a considerar são:

- A geometria da estrutura;
- Os materiais utilizados na construção;
- O ambiente no qual a estrutura está localizada;
- A variabilidade dos parâmetros (ambientais e do concreto) envolvidos;
- A qualidade da mão-de-obra de execução do concreto;
- Os principais mecanismos de degradação, especialmente corrosão;
- O planejamento das atividades de inspeção da estrutura.

#### **4. Técnicas eletroquímicas de monitoramento de corrosão de armadura**

O processo corrosivo no concreto armado é um fenômeno “camuflado”, ou seja, os primeiros sintomas de corrosão só aparecem muito depois do processo corrosivo se ter iniciado e propagado e, por isso, a sua identificação precoce é difícil (RIBEIRO E CUNHA, 2014)

Visto isso, as técnicas eletroquímicas de monitoramento de corrosão se tornam as mais utilizadas, tendo em vista que analisam o fenômeno eletroquímico de corrosão propriamente dito, não geram grandes danos à estrutura para a aplicação e são de rápida execução.

Dentre as técnicas eletroquímicas, será discutido neste item a respeito da medição da resistividade elétrica e potencial de corrosão dos elementos de concreto armado.

#### 4.1. Resistividade

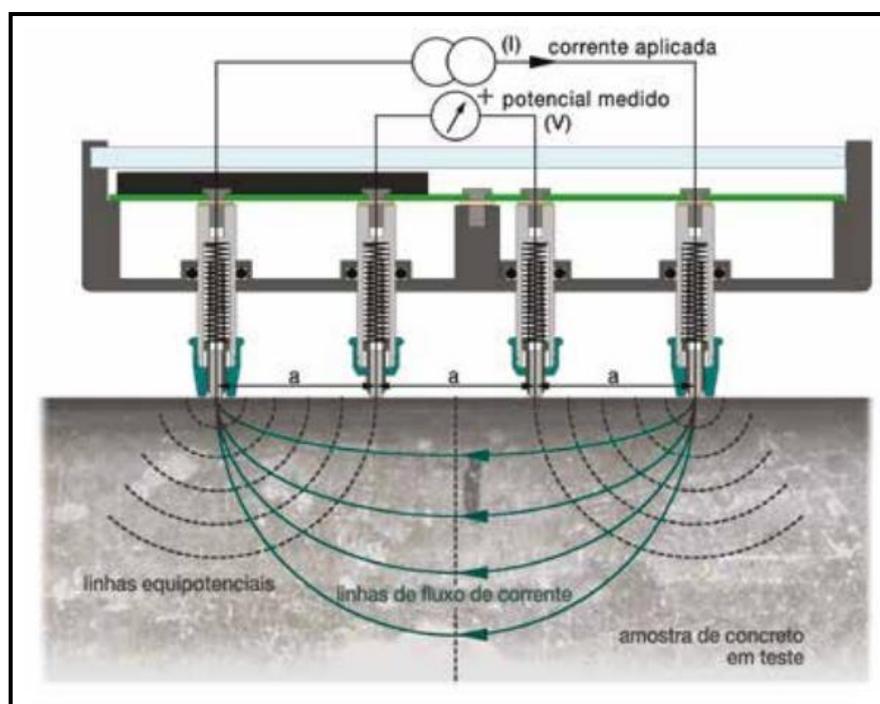
A resistividade elétrica do concreto é uma importante propriedade e caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica, que no caso do concreto, está relacionada com a velocidade do processo de corrosão das armaduras (SANTOS, 2006).

Cascudo (2005) ressalta a importância da resistividade elétrica do concreto, juntamente com o acesso de oxigênio no controle do processo eletroquímico que gere a corrosão de armaduras. De modo que a velocidade de corrosão do aço depende muito da resistividade elétrica do concreto.

Ribeiro e Cunha (2014) afirmam que a técnica utilizada para medição da resistividade do concreto é muito utilizada, tendo em vista a facilidade de execução por ser um método não destrutivo.

O procedimento de medida abordado é o conhecido pelo nome de Wenner. A técnica descrita por Ribeiro e Cunha (2014) consiste em fixar ou encostar fortemente quatro pinos metálicos no concreto, normalmente espaçados por 1 a 2 cm, e injetar uma corrente alternada nos pinos mais exteriores medindo, ao mesmo tempo a ddp entre os pinos interiores. Os valores característicos para a frequência da corrente oscilam entre 25 e 150 Hz e a tensão entre 6 a 12V ac. Na Figura 17 pode-se verificar o esquema do processo descrito.

Figura 17-Esquema da medição da resistividade pelo método de Wenner.



Fonte:www.proceq.com

Os autores definem que o valor da resistividade é obtido por meio da expressão  $\rho = 2\pi \cdot a \cdot R$ , sendo “a” a distância entre os pinos e “R” a resistência elétrica.

Vale informar que a medição da resistividade pode ser afetada por alguns fatores. Broomfield e Millard (2002) elencam a geometria e dimensão da peça, heterogeneidade do concreto, mau contato entre os pinos, posição das armaduras, bem como proximidade das arestas das faces como fatores intervenientes no processo.

Com relação à execução das medições, o RILEM<sup>7</sup> (2000) recomenda que sejam realizadas 5 leituras no mesmo local, movendo apenas poucos milímetros de distância entre cada leitura. O valor a ser assumido é a média dos 5 resultados.

<sup>7</sup> International Union of Laboratories and Experts in Construction materials, Systems and Structures.

Ribeiro e Cunha (2014) ainda complementam que a resistividade elétrica está relacionada com a microestrutura da matriz de cimento, como por exemplo, porosidade total, tamanho e conectividade dos poros e condutividade da solução aquosa presente em seus interiores.

Vale informar, conforme mostram os autores, que a presença de sais, como cloretos, sulfatos e nitratos possibilita a corrosão das armaduras, pois são eletrólitos fortes, permitindo que o meio apresente baixa resistividade.

Varela e Gonzales (1990) citados por Cascudo (2005) informam que o valor da resistividade em concretos contaminados com cloretos pode diminuir em até 10 vezes.

Santos (2006) cita ainda que o tipo de cimento, seu consumo, presença de adições e o grau de hidratação, bem como as características ambientais de temperatura e umidade também influenciam na resistividade elétrica do concreto.

Na Tabela 9 há valores de referência entre resistividade e o risco de corrosão, segundo CEB-192 (1989)<sup>8</sup> e o boletim europeu CE - COST 509<sup>9</sup>.

Tabela 9- Valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão do concreto,

Resistividade (KΩ.cm)		Risco de corrosão
CEB-192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
---	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	---	Muito Alto

Fonte: Ribeiro e Cunha (2014)

Cascudo (2005) cita outros valores de referência mostrados por outros autores, como por exemplo, o ACI 222 (1990), onde indicam que a

<sup>8</sup> Comité Euro-Internacional du Béton (CEB)

<sup>9</sup> Corrosion and protection of metals in contact with concrete.

corrosão é desprezível para valores de resistividade acima de 50 -70 K $\Omega$ .cm.

#### 4.2. Potencial de corrosão

De forma semelhante ao método de monitoramento da resistividade do concreto, o método para medição do potencial de eletrodo ou de corrosão é um procedimento qualitativo para avaliar a probabilidade de ocorrência da corrosão de armadura.

Cascudo e Helene (1992) informam que ao final da década de 50, o levantamento dos potenciais de corrosão passou a ser amplamente utilizado nos Estados Unidos e Europa, auxiliando nas inspeções de estruturas. A técnica possibilitou a identificação de zonas comprometidas da estrutura, com risco de estarem em processo de corrosão, mesmo ainda assintomáticos.

Cascudo (2005) disse que Van Daveer (1975) estabeleceu faixas empíricas de potenciais associadas ao risco de corrosão. Já em 1977 a ASTM<sup>10</sup> normalizou a técnica de medição de potenciais em concreto.

Cascudo e Helene (1992) descrevem a técnica de medição do potencial de corrosão de forma clara e de fácil entendimento. A técnica consiste em medir a diferença de potencial entre duas semi-células. Uma é o conjunto aço/concreto e a outra é o eletrodo de referência, onde no caso da figura 18 é um eletrodo de cobre/ sulfato de cobre.

Quando há formação do sistema, conforme figura 19, onde o eletrodo de referência e a semi-célula concreto/aço são interligadas por meio de um voltímetro de alta impedância, forma-se a pilha eletroquímica.

Cascudo e Helene (1992) afirmam que de forma geral o eletrodo de referência é mais nobre e tem valores de potencial mais positivos do que o aço. Com isso, os elétrons se deslocam do aço em direção ao eletrodo de referência, passando pelo milivoltímetro (onde haverá o registro sob forma de potencial). Os autores resumem o processo como sendo um

---

<sup>10</sup> American Society for Testing and Materials

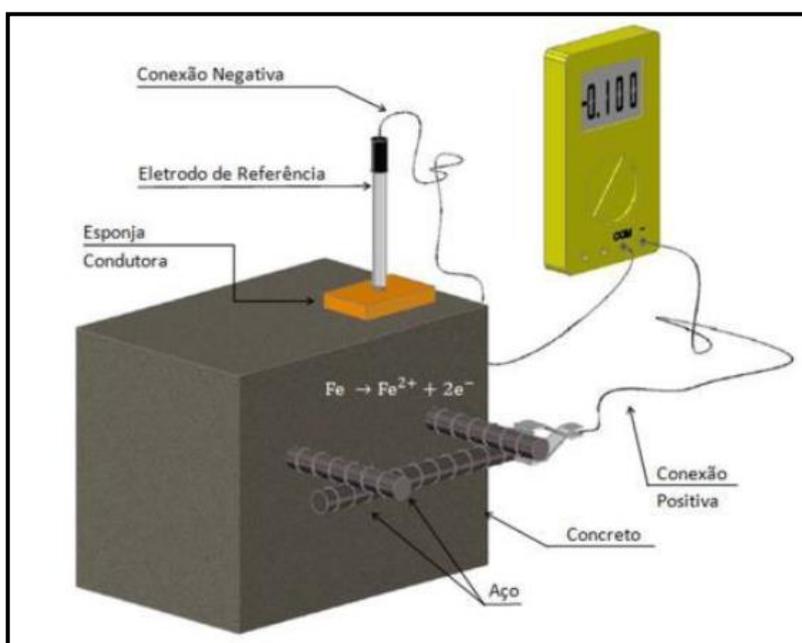
fluxo eletrônico que vai da armadura até o eletrodo de referência, com o fechamento do circuito das duas semi-células ocorrendo de forma iônica, por meio de uma interface de comunicação altamente condutiva.

Figura 18-Exemplo do eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre.



Fonte: Autor

Figura 19-Esquema do procedimento de medição do potencial de corrosão



Fonte: ASTM C876 (2009) apud Rocha (2012)

Na Tabela 10 encontram-se os valores de referência relacionados com a probabilidade de corrosão, propostos pela ASTM C876 (ASTM, 1999) apud Cascudo (2005).

Tabela 10- Critérios de avaliação dos resultados das medidas de potenciais.

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre $\text{Cu}/\text{CuSO}_4, \text{Cu}^{2+}$ (mv)	Probabilidade de corrosão
Mais negativo que -350	Superior a 90%
Mais positivo que -200	Inferior a 10%
De -200 a -350	Incerta

Fonte: ASTM C876 (1999) apud Cascudo (2005)

Vale informar que alguns fatores influenciam nas medidas do potencial de corrosão.

Cascudo e helene (1992) concluíram experimentalmente que as medidas de potencial tendem a ser mais negativas com o decréscimo do cobrimento da armadura e com o aumento da relação água cimento.

Os autores também conseguiram correlacionar, em um dos grupos de estudo, valores absolutos de potencial e perda de massa das barras de aço. Indicando que há a possibilidade de se ter dados quantitativos de corrosão a partir de medidas de potencial.

Rocha (2012) elencou alguns fatores que influenciam na medida do potencial de corrosão, conforme os autores (Browne et al. (1983); Elsener e Bohni (1990); Cascudo (1997) e Helene (1993)). Estes fatores estão expostos a seguir:

- Camadas superficiais de alta resistividade, bem como elevadas espessuras de cobrimento tornam o potencial menos negativo;
- Baixo teor de oxigênio devido à saturação do concreto pode levar a potenciais mais negativos;
- A carbonatação eleva a resistividade da região carbonatada, tornando o potencial menos negativo;

- Os cloretos tornam os potenciais mais negativos, tendo em vista que melhoram o movimento iônico.
- Níveis maiores de umidade aumentam a mobilidade dos íons que participam do processo eletroquímico, o que torna os valores de potencial de corrosão mais negativos.

## CAPÍTULO 3

### 5. METODOLOGIA

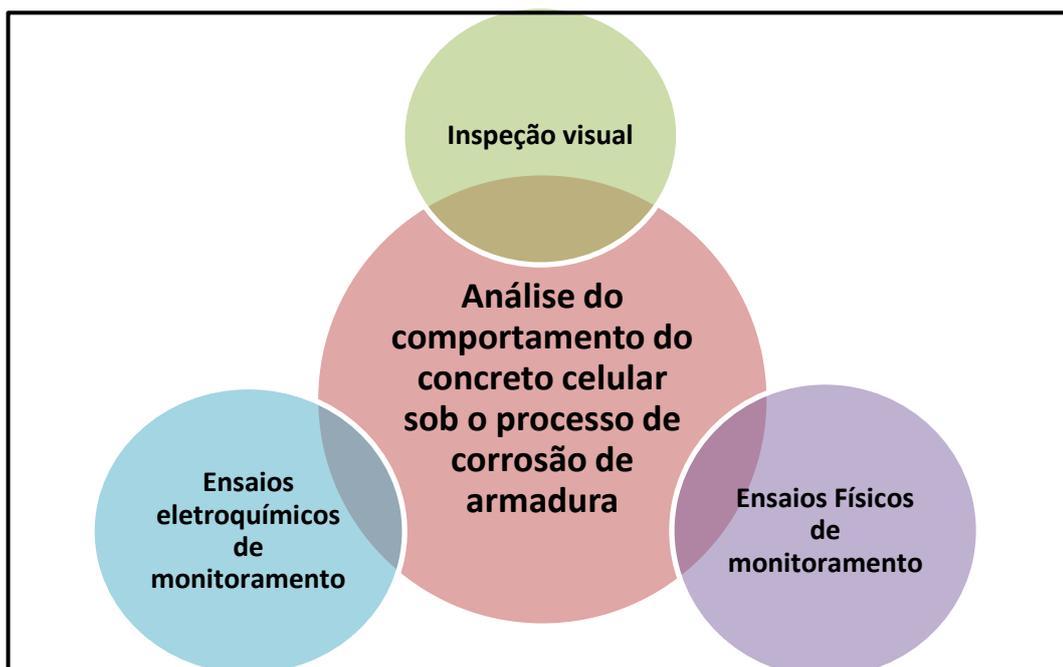
A metodologia de desenvolvimento desta pesquisa foi organizada para criar condições de se avaliar o comportamento de elementos de concreto armado leve (concreto celular) sob o processo de corrosão de armadura.

No decorrer do processo os elementos de concreto foram avaliados das seguintes formas:

- a) Visualmente (surgimento de fissuras ou mancha de corrosão),
- b) Por meio de ensaios eletroquímicos (potencial de corrosão e resistividade)
- c) Ensaios físicos nas barras de aço (perda de massa e resistência à tração).

A Figura 20 representa um esquema resumo de como foi fundamentada a pesquisa.

Figura 20-Esquema resumo do procedimento experimental.



Fonte: Autor.

A descrição de como será desenvolvido o trabalho experimental foi dividida em: Variáveis independentes e dependentes, materiais utilizados e os ensaios realizados.

### 5.1. Variáveis independentes

A seguir, na Tabela 11 encontram-se as variáveis independentes escolhidas para esta pesquisa.

Tabela 11-Variáveis independentes da pesquisa.

Variáveis independentes	
Requisito	Critério
Massa específica fresca almejada do concreto (Kg/m <sup>3</sup> )	2.300
	1.900
	1.700
	1.500
Bitola do Aço (mm)	6.3
	8.0
	10.0

Espera-se verificar as modificações das características do concreto com a variação da massa específica, bem como possíveis diferenças de comportamento quanto à corrosão quando se varia a bitola do aço, e, por conseguinte, o valor do cobrimento das armaduras, tendo em vista que espessura das placas é igual para todos os grupos.

### 5.2. Variáveis dependentes

A Tabela 12 mostra as variáveis dependentes desse trabalho.

Tabela 12--Variáveis dependentes da pesquisa

Variáveis dependentes	
Requisito	Critério
Propriedades do concreto	Absorção de água por imersão
	Índice de vazios
	Teor de ar %
	Resistência à compressão
Inspeção visual	Fissuras e formação de produtos de corrosão
Ensaio de monitoramento eletroquímico	Potencial de corrosão e resistividade
Ensaio de monitoramento mecânico no aço	Resistência à tração e perda de massa

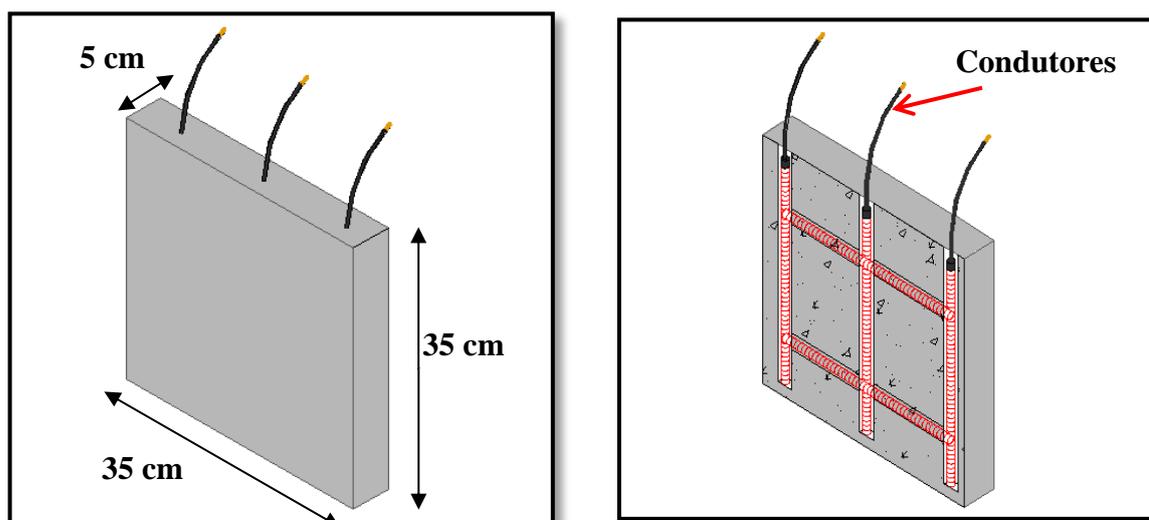
Fonte: Autor

### 5.3. Materiais utilizados

#### 5.3.1. *Corpo de prova*

Os corpos de prova são de concreto e foram concebidos em forma de placa, com 35 cm de largura x 35 cm de altura x 5 cm de espessura (figura 21).

Figura 21- Esquema da configuração do corpo de prova.



Observa-se que no topo do elemento há condutores de cobre para fazer a ligação dos aços com o exterior. A presença destes condutores é para

possibilitar a realização do monitoramento do potencial de corrosão das armaduras.

A escolha da espessura da placa, apenas 5 cm, foi feita com o intuito de facilitar o desencadeamento do processo corrosivo por meio do ingresso de íons cloreto, com a diminuição da distância entre a barra e a superfície externa.

Os corpos de prova foram distribuídos para cada massa específica de concreto. Lembrando que haverá uma família de referência, com concreto de massa específica normal, chamada de família R. Além dessa, mais três famílias com concreto leve, chamadas de L1, L2 e L3. Essa distribuição pode ser vista na Tabela 13.

Tabela 13-Quantidade de placas confeccionadas.

Nomenclatura de cada família	Massa específica fresca almejada (Kg/m <sup>3</sup> )	Bitola do aço- CA 50 (mm)			Total de placas
		6.3	8.0	10.0	
R	2.300	6	6	6	18
L 1	1.900	6	6	6	18
L 2	1.700	6	6	6	18
L 3	1.500	6	6	6	18
<b>Total de placas</b>					<b>72</b>

Fonte: Autor.

### **5.3.2. Aço**

O aço escolhido foi CA-50, com bitolas de 6.3, 8.0 e 10.0 mm, vendidos em vergalhões em distribuidora da região do Recife.

Como mostrado no esquema da figura 25, no tópico anterior, decidiu-se montar uma malha de aço com 3 barras na vertical e 2 na horizontal, totalizando 5 barras para ficar dentro de cada placa de concreto. As barras

posicionadas na horizontal têm função de servir como elementos de ligação das três barras verticais, obtendo-se uma densidade de aço maior dentro da placa, e, conseqüentemente, aumentando a possibilidade de observação dos sintomas da corrosão do aço.

A escolha destas bitolas se deu devido à condição limitadora das dimensões do corpo de prova. As bitolas maiores demandariam maiores comprimentos de barra e assim maiores placas de concreto.

A seguir será mostrado todo o procedimento de tratamento do aço até sua utilização propriamente dita.

- Medição e marcação do tamanho de cada barra para realização do corte (figura 22). As barras na vertical foram cortadas com 30 cm e as na horizontal com 20 cm. O comprimento das barras verticais foi padronizado neste valor para atender ao requisito mínimo do ensaio de resistência à tração.

Quanto às barras horizontais, diminuiu-se o tamanho para concentrar a armadura no centro e facilitar a colocação dentro da fôrma.

Figura 22-Marcação das barras de aço para realização do corte.



- Corte das barras com disco tipo lixadeira para aço. Foram cortadas 72 barras de cada bitola (6.3, 8.0 e 10.0 mm), com 30 cm de comprimento e 48 barras de cada bitola com 20 cm (figura 23).

Figura 23-Realização do corte dos varões de aço com lixadeira e disco para aço.



- Divisão e separação das barras por bitola e por comprimento. Lembrando que são 5 barras por cada placa (3 verticais de 30 cm e 2 horizontais de 20 cm), sendo 120 barras por bitola e 360 ao todo (figura 24).

Figura 24-visão geral dos grupos de barras após o corte.



- Preparação para limpeza das barras com solução de ácido clorídrico e água na proporção de 1:1, conforme visto em Mota (2011) (figura 25).

Figura 25-Colocação das barras dentro de recipiente plástico para limpeza.



- Colocação da solução ácida sobre as barras. As mesmas são deixadas imersas por cerca de 15 minutos. O intuito é retirar todo o produto de corrosão superficial que possa haver (figura 26).

Figura 26-Colocação das barras dentro da solução ácida para limpeza.



- Detalhe da reação da solução com as barras de aço (figura 27).

Figura 27-Detalhe da reação do ácido com as barras de aço.



- Limpeza de todas as barras com água corrente e escova de aço após o banho na solução ácida (figura 28).

Figura 28-Limpeza das barras com água corrente e escova de aço.



- Secagem das barras com ar quente para retirada da umidade retida após a lavagem (figura 29).

Figura 29-Secagem das barras após limpeza.



- Todas as barras foram pesadas, agora sem resquícios de oxidação superficial, sendo registrada a massa inicial( $m_0$ ) antes do início da indução do processo corrosivo, no tempo  $t=0$  (figura 30).

Figura 30-Detalhe da pesagem das barras antes do início do processo de corrosão.



- Visão geral de como ficou a superfície das barras após a limpeza com solução de ácido clorídrico (figura 31).

Figura 31-Detalhe do aspecto final das barras após limpeza e secagem.



- Depois da pesagem, todas as barras foram embaladas em papel filme e etiquetadas com uma referência. O papel filme teve por objetivo de proteger as barras contra sujeiras e possível oxidação superficial enquanto as barras eram mantidas estocadas até sua montagem e concretagem (figura 32).

Figura 32-Proteção das barras com plástico filme.



- Detalhe das barras embaladas no papel filme e etiquetadas. Foram nomeadas de acordo com a Família de concreto, número da placa, bitola e posição dentro da placa. Ex: PL01-R-6.3(1) (figura 33).

Figura 33- Identificação de cada barra.



- Ligação das barras para formação da malha. As barras foram ponteadas com arame 18 galvanizado / plastificado. Optou-se pela utilização deste tipo de arame na tentativa de evitar/ dificultar que o mesmo viesse a corroer e provocar manchas na superfície do concreto que poderiam ser confundidas com as manchas de corrosão do próprio aço (figura 34).

Figura 34-Processo de organização e ligação das barras.



- Detalhe das ligações entre as barras (figura 35).

Figura 35-Detalhe da amarração com arame 18 galvanizado e plastificado.



### 5.3.3. *Fôrma*

Para a confecção das fôrmas, utilizou-se 8 chapas de madeirite plastificado de 2,10x 1,20m, com 18 mm de espessura. Optou-se pelo modelo plastificado visando um melhor acabamento superficial das placas de concreto.

Buscou-se elaborar um modelo de fôrma para otimizar sua confecção, transporte e concretagem das placas. Logo, chegou-se ao modelo de dois retângulos de 1,50 m x 0,65m por 0,35 m de altura, com divisórias internas, conforme o projeto da figura 36. Cada retângulo comporta 36 placas. Este projeto foi enviado para empresa especializada em confecção de fôrmas, estando o modelo pronto nas figuras 37 e 38.

Figura 36-Projeto das fôrmas.

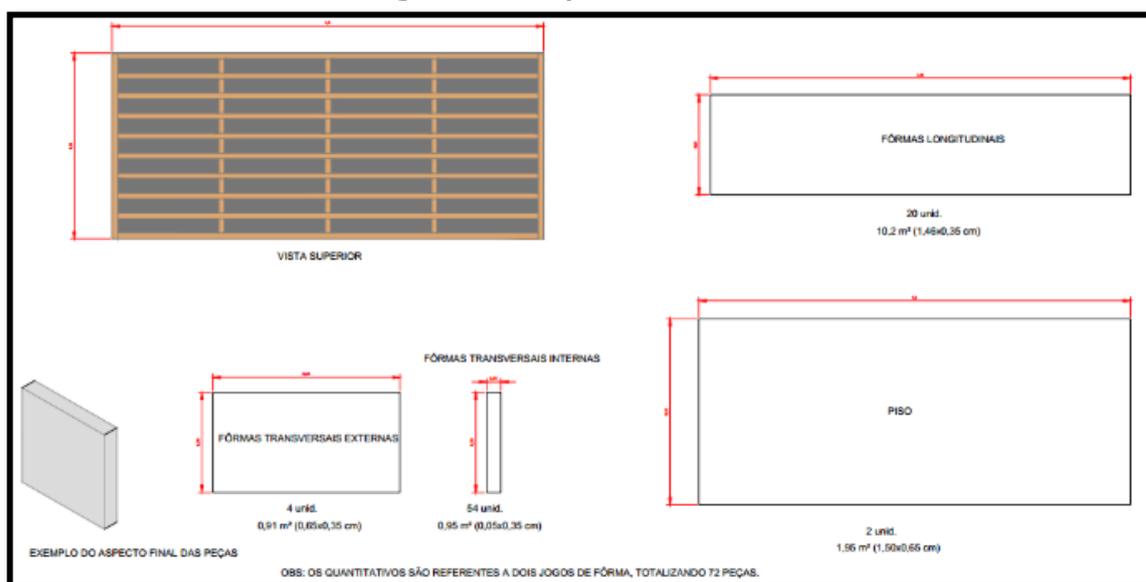


Figura 37-Foto de um dos jogos de fôrma (36 unidades).



Figura 38- Detalhe das fôrmas e identificação das placas.



#### 5.3.4. Concreto

Para fabricação do concreto celular, seguiu-se como base inicial para os testes de dosagem, os parâmetros utilizados por Mariz (2013), onde o autor realizou avaliações de durabilidade em concreto celular. Seus resultados de massa específica foram muito similares aos que são almeçados nesse trabalho.

- Cimento

O cimento utilizado foi o CPV-ARI MAX da cimento Nacional. Escolheu-se esse tipo tendo em vista seu rápido ganho de resistência e ausência de adições. O teor de adições de outros tipos de cimento poderiam contribuir para o refino e colmatação dos poros do concreto, dificultando o ingresso do agente agressivo e, por conseguinte, o desencadeamento do processo corrosivo das armaduras (figura 39 e 40).

Figura 39-Identificação do cimento utilizado.

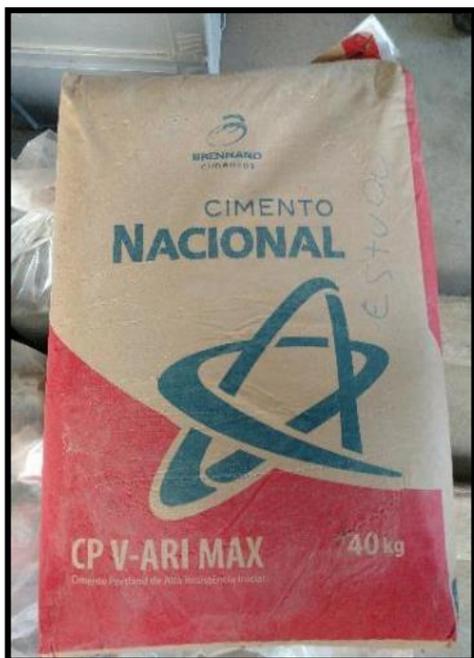


Figura 40-Armazenamento do cimento.



- Agregados

Os agregados miúdo e graúdo (figura 41) foram obtidos em armazém de material de construção de pequeno porte na cidade de Recife. A seguir encontram-se os ensaios de caracterização destes materiais, realizados nos laboratórios da TECOMAT ENGENHARIA LTDA.

Figura 41-Estocagem da areia e brita utilizadas no estudo.



Nas figuras 42 e 43, observam-se resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo. Como visto, o seu diâmetro máximo é de 12,5 mm. Optou-se por este valor, tendo em vista a espessura de apenas 50 mm das placas.

A execução detalhada dos ensaios pode ser verificada nas normas mostradas na figura 42. Em linhas gerais a execução da composição granulométrica e obtenção dos módulos de finura e diâmetro máximo segue:

- Dimensão máxima característica (NBR248:2003): Corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresenta um percentual retido acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%.
- Módulo de finura: Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100.
- Composição granulométrica: A amostra de agregado é seca em estufa. As peneiras são encaixadas, formando um conjunto com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. O material é colocado no topo e o conjunto de peneiras é agitado. Ao final, é verificada a massa de material que fica retida em cada uma das peneiras.

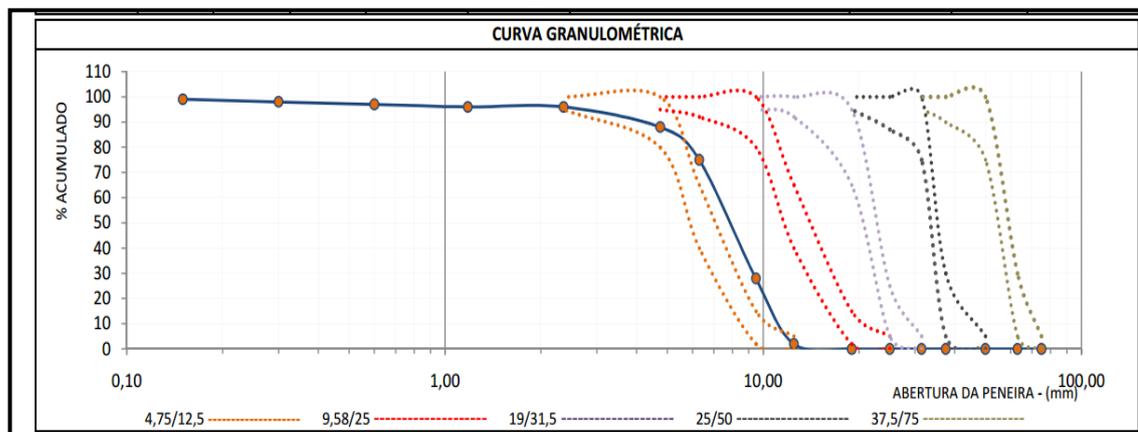
Figura 42-Resultados da caracterização do agregado graúdo.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETO										
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (NBR NM 248/2003)					ENSAIOS REALIZADOS - AGREGADO GRAÚDO					
PENEIRA (mm)	PENEIRAMENTO PESO RETIDO (g)			PERCENTUAL RETIDO	PERCENTUAL ACUMULADO	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS	
	01	02	MÉDIA	(%)	(%)					
75	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPEC. DO AGREGADO SECO	NBR NM 53:2009	g/cm <sup>3</sup>	2,68	
63	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO EM CONDIÇÃO (SSS) <sup>3</sup>			2,66	
50	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPECÍFICA APARENTE			2,65	
37,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0	ÍNDICE DE FÔRMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO	NBR 7809:2006	-	-	
31,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA UNITÁRIA DO AGREGADO	NBR NM 45:2006	kg/m <sup>3</sup>	1480	
25	0,00	0,00	0,00	0,0	0				SOLTO	1380
19	0,00	0,00	0,00	0,0	0	ÍNDICE DE VAZIOS	NBR NM 46:2003	%	-	
12,5	41,10	72,00	56,55	2,2	2				SOLTO	-
9,5	662,20	637,00	649,60	25,8	28	MATERIAL PULVERULENTO	NBR NM 46:2003	%	0,9	
6,3	1188,30	1162,00	1175,15	46,7	75				SOLTO	-
4,75	345,30	343,60	344,45	13,7	88	MÓDULO DE FINURA	NBR NM 248:2003	-	6,02	
2,36	161,40	203,00	182,20	7,2	96				DIÂMETRO MÁXIMO	12,5
1,18	20,40	18,00	19,20	0,8	96	ABSORÇÃO DE ÁGUA	NBR NM 53:2009	%	0,5	
0,6	18,80	18,20	18,50	0,7	97				ARGILA EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS	-
0,3	23,10	21,10	22,10	0,9	98	TOTAL	NBR 7218:2010	%	-	
0,15	20,50	13,70	17,10	0,7	99				2517,9	2518,6

(SSS) - Condição saturado superfície seca.

Os resultados em branco não se aplicam a esta caracterização.

Figura 43-Curva granulométrica do percentual retido acumulado do agregado graúdo.

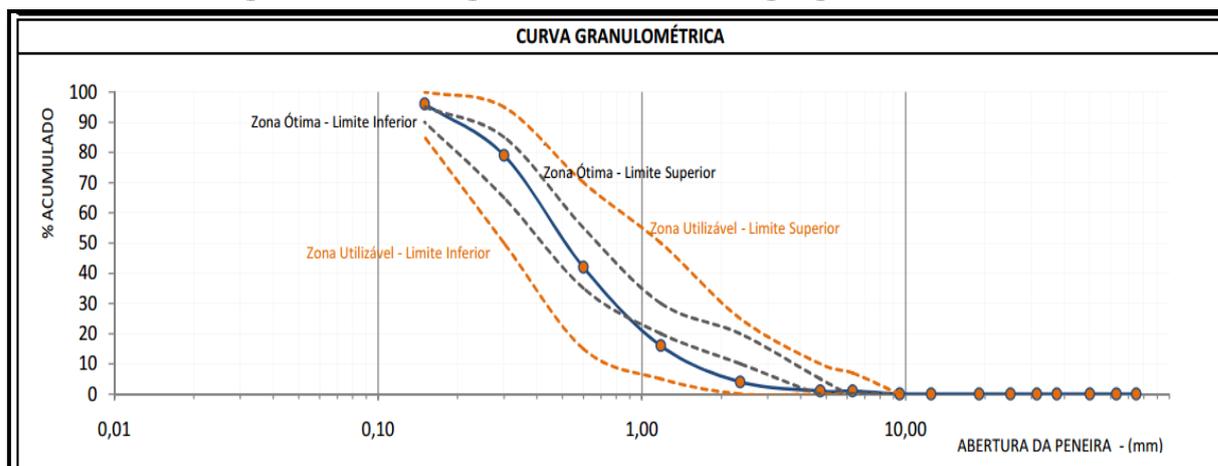


Nas figuras 44 e 45, estão os resultados de caracterização do agregado miúdo utilizado. Os ensaios são realizados de maneira análoga ao agregado graúdo, conforme explicado brevemente acima.

Figura 44- Resultados da caracterização do agregado miúdo.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO									
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (NBR NM 248/2003)					ENSAIOS REALIZADOS - AGREGADO MIÚDO				
PENEIRA (mm)	PENEIRAMENTO PESO RETIDO (g)			PERCENTUAL RETIDO	PERCENTUAL ACUMULADO	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS
	01	02	MÉDIA	(%)	(%)				
75	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPEC. DO AGREGADO SECO	NBR NM 52:2009	g/cm <sup>3</sup>	2,49
63	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO EM CONDIÇÃO (SSS) <sup>3</sup>			2,51
50	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA ESPECÍFICA APARENTE			2,55
37,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0	MASSA UNITÁRIA DO AGREGADO	NBR NM 45:2006	kg/m <sup>3</sup>	1460
25	0,00	0,00	0,00	0,0	0				SOLTO ÚMIDO
19	0,00	0,00	0,00	0,0	0	ÍNDICE DE VAZIOS		%	-
12,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0				SOLTO ÚMIDO
9,5	4,00	0,00	2,00	0,3	0	MATERIAL PULVERULENTO	NBR NM 46:2003	%	1,4
6,3	4,10	4,20	4,15	0,5	1				
4,75	4,10	3,40	3,75	0,5	1				
2,36	20,30	20,40	20,35	2,7	4	MÓDULO DE FINURA	NBR NM 248:2003	-	2,38
1,18	87,60	89,90	88,75	11,7	16				
0,6	199,80	198,90	199,35	26,2	42	DIÂMETRO MÁXIMO		mm	2,36
0,3	277,70	285,50	281,60	37,0	79	ABSORÇÃO DE ÁGUA	NBR NM 30:2001	%	0,9
0,15	133,60	130,90	132,25	17,4	96				
FUNDO	28,20	28,10	28,15	3,7	100	ARGILA EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS	NBR 7218:2010	%	-
TOTAL	759,4	761,3	760,4	100	339				

Figura 45-Curva granulométrica do agregado miúdo.



- Água

A água utilizada na preparação do concreto foi da rede de abastecimento do Recife, a companhia Pernambucana de saneamento (compesa).

- Aditivos

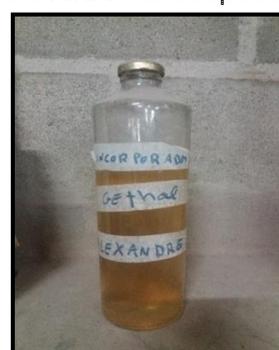
**Aditivo 1:** Techniflow 520, da MC Baushemie (figura 46). Este é um aditivo plastificante que melhora a trabalhabilidade do concreto e seu adensamento junto à armadura. Foi utilizado na dosagem do concreto de massa específica normal (família R).

**Aditivo 2:** Gethal 2011, da Gethal (figura 47). Este é um aditivo concentrado incorporador de ar, com base orgânica/química. Foi utilizado para produção dos concretos de massa específica menor que 2000 kg/m<sup>3</sup> (famílias leves. L1, L2 e L3).

Figura 46-Aditivo plastificante.



Figura 47-Aditivo incorporador de ar.



Baseado na experiência e nos resultados obtidos por Mariz (2013) decidiu-se fixar a quantidade de aditivo incorporador de ar em 0,1% da massa de

cimento. A diferença entre as três massas específicas leves (famílias L1, L2, e L3) foi obtida aumentando a duração do tempo de mistura do concreto na betoneira.

Após período de testes em laboratório, conseguiu-se ajustar os tempos de mistura de cada família de acordo com a massa específica fresca almejada. A Tabela 14 expressa esses valores de tempo. Todos os valores das massas específicas frescas obtidas, bem como os respectivos abatimentos (slump test) estão no capítulo de resultados e discussões.

Tabela 14-Resultados dos testes de tempo de mistura.

Família	Aditivo	Tempo de mistura (Minutos)
R	Tecniflow 520 (0,6%)	15
L1	Gethal (0,1%)	2
L2	Gethal (0,1%)	8
L3	Gethal (0,1%)	15

Depois dos testes preliminares, a dosagem final utilizada na produção do concreto de referência foi:

TUP = 1: 2,2: 2,6 (Traço unitário em peso)

- $A/C = 0,60$  (Relação água cimento)
- $a \% = 55 \%$  (Teor de argamassa)
- $H\% = 10,5\%$  (Relação água materiais secos)
- $C = 353 \text{ Kg/m}^3$  (Consumo de cimento teórico)
- Aditivo = 0,6 % de plastificante

Para os concretos de classe leve, apenas substituiu-se o aditivo plastificante pelo incorporador de ar (0,1% da massa de cimento), variando-se o tempo de mistura, conforme mostrado na tabela 14.

#### 5.4. Indução da Corrosão de armadura (tipo 1)

Utilizou-se dois procedimentos para induzir a corrosão de armadura das placas de concreto. Neste primeiro tipo, chamado de tipo 1, foi aplicado o princípio da corrosão galvânica. O cobre, mais nobre, funciona como cátodo e a armadura de aço trabalha com ânodo, perdendo elétrons (corrosão).

Foi realizada ligação do cobre à malha de aço de cada placa, localizada no fundo do corpo de prova.

O cobre utilizado foi obtido em loja de material de refrigeração (utilizado em sistema de ar-condicionado). Comprou-se tubos vazados, em seguida, os tubos foram cortados em partes com 10 cm de comprimento, cada.

Essas partes foram comprimidas diametralmente, com utilização de martelo e, unidas, em grupos de três, com fio de cobre (cobre retirado de fiação de iluminação encontrada comumente em armazém de construção).

Cada “barra” de cobre formada foi ligada à malha de aço e locada no fundo das placas. Essa descrição da preparação do cobre pode ser acompanhada nas figuras 48, 49, 50 e 51.

Figura 48-Tubo de cobre cortado e amassado diametralmente.



Figura 49-Chapas unidas com fio de cobre.



Figura 50-Detalhe da ligação do cobre com a armadura de aço.

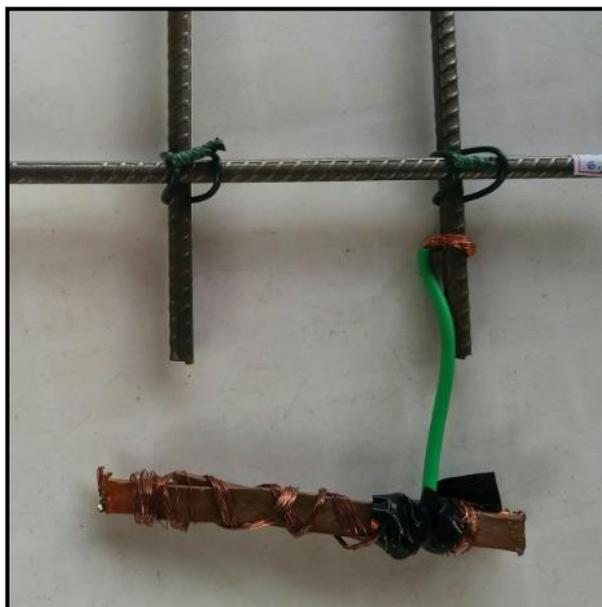
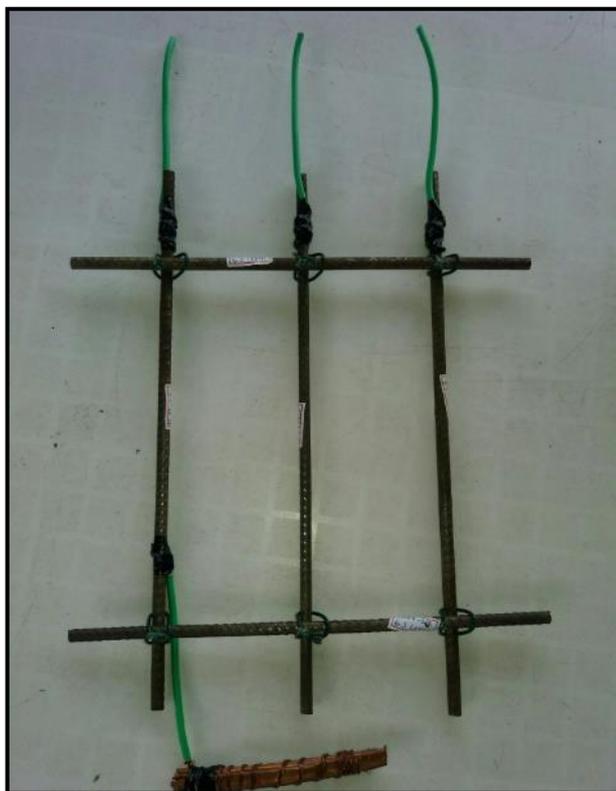


Figura 51-Configuração final da armadura que foi colocada dentro da fôrma.



### 5.5. Concretagem das placas e retirada da fôrma

A concretagem das placas foi feita em 5/3/16. A seguir será descrito todo o processo realizado no dia da concretagem das placas e, depois, no dia 7/3/16, a retirada das placas de dentro das fôrmas (Figuras 52 a 69)

Além das 72 placas (35 cm x 35 cm x 5 cm), foram também concretados corpos de prova cilíndricos para realização dos ensaios de caracterização do concreto.

Cabe informar que devido à pequena espessura da placa, apenas 5 cm, tendo em vista a facilitar a operação de concretagem e tentar garantir um bom acabamento e preenchimento das fôrmas, não utilizou-se espaçadores para alinhar a malha metálica. As barras foram centralizadas na fôrma manualmente, conforme figura 64.

Figura 52-Visão geral das fôrmas das placas e dos outros corpos de prova. Ainda antes da preparação para a concretagem.



Figura 53-Vista da fôrma com as armaduras dentro.



Figura 54-Vista da armadura dentro da fôrma.

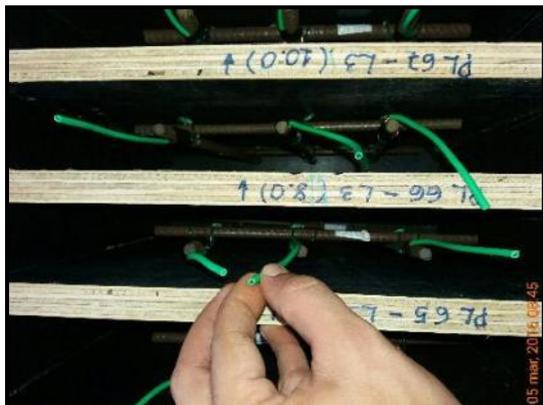


Figura 55-Detalhe da armadura dentro da fôrma.



Figura 56-Aplicação de desmoldante nas fôrmas



Figura 57-Balança utilizada na pesagem dos insumos do concreto.



Figura 58-Detalhe da areia já pesada separada em recipientes.



Figura 59- Betoneira de 400 litros utilizada na mistura do concreto.



Figura 60- Processo de preenchimento das fôrmas com concreto.



Figura 62-Detalhe da colocação do concreto na fôrma.



Figura 61-Outra vista da concretagem.



Figura 63-Adensamento feito com martelo de borracha batendo-se nas laterais e topo das fôrmas.



Utilizou-se essa técnica para adensar o concreto de todas as famílias, tendo em vista a possibilidade de “perda” das bolhas incorporadas por utilização de adensamento manual com haste, ou mecânico com vibrador.

Figura 65-Foto logo após término da concretagem.



Figura 64- Visão geral no dia seguinte à concretagem



Cerca de 48 horas após o fim da concretagem das placas, iniciou-se o processo de retirada das fôrmas tanto das placas como dos corpos de prova cilíndricos. A retirada foi feita das faces mais externas até as mais internas, com auxílio de martelo e talhadeira, conforme figuras 66 a 69.

Figura 66- Retirada lateral de uma das fôrmas.



Figura 67- Outra visão da retirada das fôrmas.



Figura 68- Aspecto final da placa após retirada da fôrma.

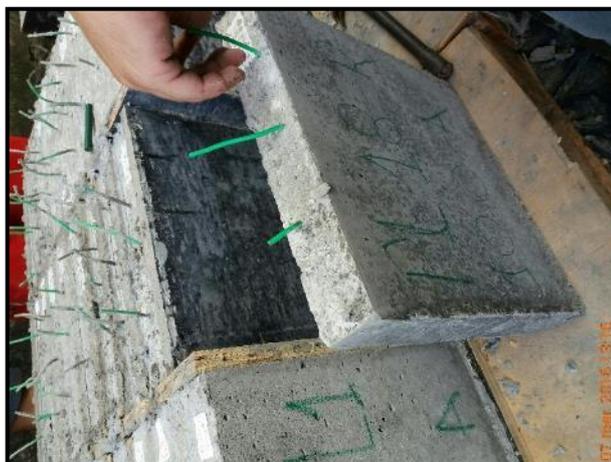


Figura 69-Visão dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de caracterização.



Após retirada das fôrmas, as placas foram mantidas acondicionadas abrigadas da incidência direta de chuva e sol, conforme mostrado na figura 70, até que atingiram a maior idade (28 dias) e foi iniciado o processo de molhagem e secagem em água salgada.

É importante informar que todas as placas foram inspecionadas visualmente e foram registradas fotograficamente no dia 8/3/16, com o intuito de guardar as características físicas externas iniciais das placas antes do início do procedimento de indução da corrosão por molhagem e secagem. Ensaio de medição da resistividade e potencial de corrosão também foram feitos nessa época.

Figura 70- vista do acondicionamento inicial das placas nos primeiros 28 dias.



### 5.6. Indução da Corrosão de armadura (tipo 2)

O segundo tipo de indução de corrosão utilizado foi a realização de ciclos de molhagem e secagem das placas de concreto em água com tendo 5% de sal de cozinha, baseado na literatura mostrada anteriormente e também em experimentos de Moraes Neto (2015).

Depois de completados os 28 dias de amadurecimento do concreto das placas (cura ao ar protegida do sol e chuva), realizou-se mais uma inspeção visual e monitoramento eletroquímico (potencial e resistividade) antes do início da imersão das placas.

O período de início do processo de ciclos de molhagem e secagem em água contaminada com cloretos foi de 3/4/16 a 3/7/16 (91 dias de exposição ao agente agressivo em ciclos alternados, totalizando cerca de 120 dias de idade total das placas).

Um ciclo completo se resume em 3 dias de imersão (cerca de 25 cm de altura de lâmina d'água sobre as placas) e 4 dias de secagem ao ar (protegido do sol), conforme figuras.71 a 74.

Figura 71-Visão geral da configuração da “piscina” para imersão das placas.



Figura 72-Detalhe da colocação do sal de cozinha.



Figura 73-Detalhe da colocação das placas dentro d'água.



Figura 74- Visão geral das 72 placas dentro da água salgada.



Cabe informar que a água da “piscina” foi substituída (renovada) duas vezes. A primeira ao término do primeiro mês e a segunda ao término do segundo mês.

Após cada período de imersão na piscina, as placas eram secas ao ar, conforme figura 75, protegidas a incidência direta do sol e chuva.

Figura 75- Forma de acondicionamento das placas durante o período de secagem.



## 5.7. Ensaios

### *5.7.1. Ensaios de controle de produção do concreto*

Durante a produção do concreto, utilizou-se dois ensaios para controlar suas características no estado fresco. Foram eles:

- Massa específica no estado fresco, realizado conforme NBR9833 (2008) para o concreto de massa específica normal e NBR 12644 (2014) para as classes de concreto leve.
- Consistência pelo abatimento do tronco de cone, realizado conforme NBR NM 67 (1998).

O procedimento para verificação da massa específica no estado fresco, em linhas gerais, consiste em preencher um cilindro metálico, de massa e volume conhecidos, com o concreto, adensar (no caso no concreto normal), realizar rasamento do topo do cilindro e depois pesá-lo cheio. A massa específica do concreto é obtida subtraindo-se a massa do cilindro vazio do cheio e dividindo pelo volume do recipiente, conforme figuras 76 a 79.

Figura 77-Colocação inicial do concreto dentro do cilindro.



Figura 76- Adensamento com haste metálica.



Figura 78- Finalização do enchimento.



Figura 79-Etapa de rasamento.



Já com relação à consistência do concreto, verificou-se este parâmetro por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme figuras 80 e 81.

Figura 80-Preenchimento do tronco de cone com concreto.



Figura 81-Verificação da consistência por meio do abatimento do tronco de cone.



### ***5.7.2. Ensaios de caracterização do concreto***

Foram realizados ensaios de caracterização do concreto para cada família de massa específica, no intuito de se ter parâmetros para comprar cada concreto utilizado e seu respectivo comportamento durante o processo de corrosão das armaduras. São eles:

- Teor de ar incorporado, rendimento e consumo de cimento (NBR9833:2008);
- Resistência à compressão (NBR 5739:2007).
- Absorção de água por imersão (NBR 9778 : 2005).
- Índice de vazios (NBR 9778 : 2005).
- Massa específica no estado endurecido (NBR 9778 : 2005).

É importante deixar claro a diferença conceitual entre o teor de ar incorporado no estado fresco e o índice de vazios no estado endurecido.

Na NBR9833 (ABNT,2008) o conceito de **teor de ar** é: “Volume de ar aprisionado ou incorporado ao concreto fresco, expresso em porcentagem do volume total de concreto adensado.”

Na NBR 9778 (ABNT, 2005) o conceito de **índice de vazios** é: “Relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.” Lembrando que o índice de vazios é para argamassas e concretos no estado endurecido.

Para obtenção dos teores de ar incorporado foi necessário obter as massas específicas frescas dos concretos, calcular o rendimento, consumo de cimento e volume total dos componentes da betonada.

No caso do ensaio de resistência à compressão, moldou-se 3 corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) para cada família, totalizando 12 unidades. Os quais foram rompidos aos 28 dias.

Os corpos de prova cilíndricos foram retirados da fôrma no mesmo dia das placas, cerca de 48h após a concretagem. Todos eles foram mantidos protegidos do sol e chuva e ficaram curando ao ar, nas mesmas condições das próprias placas.

A seguir observa-se a sequência de realização do ensaio (figuras 82, 83 e 84). É interessante informar que devido à porosidade do concreto das famílias L1, L2 e L3, não foi possível realizar a devida retificação. Com isso, decidiu-se utilizar um “capacete” metálico com preenchimento de

neoprene em todos os corpos de prova de todas as famílias, mantendo-se assim uniforme as condições de ensaio.

Figura 82-Detalhe dos 3 corpos de prova de cada família preparados para serem rompidos.



Figura 83-Detalhe do “capacete” de neoprene colocado para uniformizar o topo dos corpos de prova.



Figura 84-Detalhe da prensa utilizada para o ensaio.



Para os ensaios de massa específica seca, índice de vazios e absorção de água por imersão, em linhas gerais, seguiu-se desta forma:

Colocação dos corpos de prova em estufa em temperatura de 105°C por 72 horas. Em seguida, é realizada pesagem (massa seca). Depois os corpos de prova são colocados dentro da água à temperatura de 23°C por

mais 72 horas. Após essa etapa, os corpos de prova vão para banho de água fervente por 5 horas. Em seguida é realizada nova pesagem com auxílio de balança hidrostática. Por fim, o corpo de prova é retirado da água, enxuto com pano e pesado (massa específica saturada), conforme figuras 85 a 90.

Figura 85- Colocação dos corpos de prova na estufa.



Figura 86-1ª pesagem (massa seca).



Figura 87-Imersão dos corpos de prova por 72 h.



Figura 88-Colocação dos corpos de prova em fervura por 5 h.



Figura 89- Pesagem após fervura em balança hidrostática.



Figura 90- Secagem com pano e pesagem da massa específica saturada.



A norma ainda define como calcular os parâmetros citados.

### Absorção

$$A = \frac{ms_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100$$

### Índice de vazios

$$I_v = \frac{ms_{\text{sat}} - m_s}{ms_{\text{sat}} - m_i} \times 100$$

### Massa específica da amostra seca

$$\rho_s = \frac{m_s}{ms_{\text{sat}} - m_i}$$

### Massa específica da amostra saturada

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{ms_{\text{sat}}}{ms_{\text{sat}} - m_i}$$

### Massa específica real

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

$m_{\text{sat}}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão em água e fervura.

$m_s$  é a massa da amostra seca em estufa.

$m_i$  é a amostra da amostra saturada imersa em água após a fervura (balança hidrostática).

### 5.7.3. *Temperatura e umidade*

Com intuito de representar e registrar o microclima de exposição que as placas foram submetidas durante o período de estudo, utilizou-se um termohigrômetro datalogger, da marca impac, modelo IP-747RH (figura 91). Este aparelho registra a temperatura e humidade do ambiente. Nesse caso, ele foi configurado para registrar estes parâmetros a cada 2 minutos, durante os 3 meses de experimento.

Figura 91-Detalhe do termohigrômetro utilizado no experimento.



#### 5.7.4. *Cobrimento das armaduras e espessura das placas*

Como mostrado sobre o procedimento de concretagem das placas, optou-se por não utilizar espaçadores e alinhar manualmente as armaduras. Com o intuito de verificar o cobrimento das barras em ambas as faces das placas após a concretagem, utilizou-se equipamento à base de sensores eletromagnéticos.

Este equipamento, o Ferroskan PS200 da Hilti, foi utilizado para estimar o cobrimento médio das barras em cada uma das placas. Em adição a isso, ainda realizou-se algumas imagens para verificar o posicionamento das barras. A e B foram nomenclaturas dadas às faces das placas para representar o posicionamento da malha de aço, conforme indicado na figura 92. As barras horizontais estão amarradas e voltadas para a face A.

Figura 92-Esquema de representação das faces A e B das placas.



Depois disso, com a trena, mediu-se a espessura das placas para poder calcular o cobrimento das armaduras em relação à face A. Todo o processo pode ser verificado nas figuras 93, 94 e 95. Tanto as leituras de cobrimento como as medidas da espessura foram feitas no centro da placa.

Figura 93-escaneamento da face A para medida do cobrimento.



Figura 94-Outro detalhe do uso do equipamento.



Figura 95-Medindo a espessura da placa. Uma medida em cada lado.



### **5.7.5.      *Ensaio de monitoramento eletroquímicos***

Foram utilizados dois tipos de ensaio para monitorar a evolução e probabilidade de corrosão das armaduras das placas ao longo tempo. A medição do potencial de corrosão e resistividade superficial do concreto.

Para a o ensaio de potencial de corrosão existe a ASTM C 876 (2009) que orienta avaliação dos critérios de ensaio, os quais serão mostrados mais adiante. O equipamento utilizado foi o Canin + da marca proceq.

- Primeiramente é preciso preparar o eletrodo de referência, que consiste em uma haste de cobre imersa em solução de sulfato de cobre (figura 96). Em uma extremidade é conectado o cabo que é ligado ao equipamento e na outra existe uma esponja que fica em contato com a superfície do concreto.
- Para o preparo da solução de sulfato de cobre (líquido de cor azul na figura 96), dissolve-se o sulfato de cobre granular em água. Deve-se dissolver até que a solução fique saturada e seja possível ver no fundo do recipiente pequenos grânulos não dissolvidos.
- Entre a esponja e o interior do tubo, há uma espécie de rolha de madeira que faz essa ligação. É importante que antes do ensaio essa rolha, já dentro do tubo, fique dentro da água por cerca de 2 horas.
- Em seguida conecta-se o cabo chamado de “aterramento” na ligação com o aço no interior do concreto. Neste caso foram as esperas de fios de cobre que ficaram expostas, conforme figura 97.
- Antes de iniciar as leituras, com um aspersor, borrifou-se água para umedecer a superfície da placa e “quebrar” essa resistência superficial (figura 98).
- É importante que a esponja esteja bem úmida para fazer esse contato com o concreto.
- Em cada uma das placas foram realizados 12 pontos de ensaio. Sendo 3 linhas horizontais, distribuídas uma no topo, uma no meio e uma no fundo da placa, com 4 pontos em cada (figura 99). Estes pontos foram feitos distantes 10 cm uns dos outros. Desta forma foi possível mapear todo o potencial da placa em diferentes partes.

Figura 96-Eletrodo de cobre e sulfato de cobre.



Figura 97-equipamento com eletrodo e ligação com o aço.



Figura 98-Umedecimento da superfície da placa antes das leituras.



Figura 99-Execução do ensaio. 12 pontos por placa.



Com relação à resistividade superficial do concreto, foi utilizado o método dos 4 eletrodos (Método de Werner) com o equipamento resipod da proceq. De forma análoga ao ensaio de potencial de corrosão, também foi aspergida água (figura 100) na superfície do concreto antes da realização das leituras (figura 101).

Conforme recomendação do RILEMTC154-EMC<sup>11</sup>, cada medida de resistividade foi tomada a partir da média de 5 leituras realizadas poucos milímetros de distância entre si.

Figura 100- Umedecimento da superfície da placa antes das leituras.



Figura 101-Medição da resistividade superficial.



Antes do início de cada ciclo de molhagem e secagem, ou seja, depois do período de 4 dias de secagem, logo antes de imergir novamente as placas dentro da água, eram feitos os ensaios de monitoramento eletroquímico citados.

#### **5.7.6. Ensaios de monitoramento Físico**

Os ensaios de monitoramento físico foram divididos em três etapas. Inspeção visual das placas, perda de massa e resistência à tração das barras de aço.

Com relação à inspeção visual das placas, realizou-se uma primeira vistoria poucos dias depois da concretagem e antes do início dos ciclos de molhagem e secagem. Durante o período de pesquisa foram feitas mais

---

<sup>11</sup> Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion

inspeções visuais ao fim de cada ciclo de imersão das placas para acompanhar a evolução da degradação das armaduras.

Como forma de poder analisar melhor, qualitativamente, o aspecto visual das placas, para este trabalho em específico, criou-se requisitos e critérios de avaliação baseado na existência de manchas características de corrosão e fissuras que poderiam surgir na superfície, conforme quadro 1.

Quadro 1-Requisitos e critérios de avaliação qualitativa visual das placas.

Sem manchas e fissuras	Sem relevância	
Até 3 manchas pequenas	Grau de deterioração Leve	
Entre 4 e 5 manchas pequenas e/ou 1 grande	Moderado	
Mais de 5 manchas pequenas e/ou mais de 1 grande	Alto	
Fissuras e manchas de corrosão	Muito alto	

O segundo tipo de ensaio do monitoramento físico foi para avaliar a perda de massa das barras ao final do período de estudo. Com essa informação foi possível verificar quais placas e quais famílias de estudo “sofreram” mais com o período de exposição ao agente agressivo. Todas essas informações estão contidas no capítulo de resultados e discussões.

Como mostrado antes, todas as barras foram limpas, pesadas e identificadas antes do início do estudo. Chegado ao final do período de trabalho (cerca de 83 dias de exposição em ciclos intervalados), as placas foram quebradas para se poder retirar as barras de aço e avaliar a intensidade da corrosão também pela perda de massa delas.

A quebra das placas foi feita com auxílio de marreta de 2 kg e talhadeira. Evitou-se utilizar disco de corte para não correr o risco de seccionar algumas das barras e interferir na verificação da perda de massa. Foram

realizados impactos no centro da placa e aos poucos foi possível retirar as armaduras. Uma dificuldade maior foi encontrada na família R, mas as outras famílias, por serem mais porosas, não se teve tanta dificuldade para retirar a armadura (figuras 102, 103 e 105).

Após retirar todas as armaduras, realizou-se novamente limpeza com solução de ácido clorídrico e água, retirando todos os resquícios de concreto aderido às barras, bem como o excesso de produtos de corrosão (figuras 104 e 106). Ainda assim, foi preciso utilizar uma lixadeira mecânica para retirar completamente os produtos da corrosão, que por vezes se encrustam mais firmemente de tal forma que não é possível retirar manualmente (figuras 107, 108 e 109).

Figura 103- Ferramentas utilizadas na quebra das placas



Figura 102- Forma como as placas foram quebradas



Figura 105- Armadura recém-tirada de dentro da placa

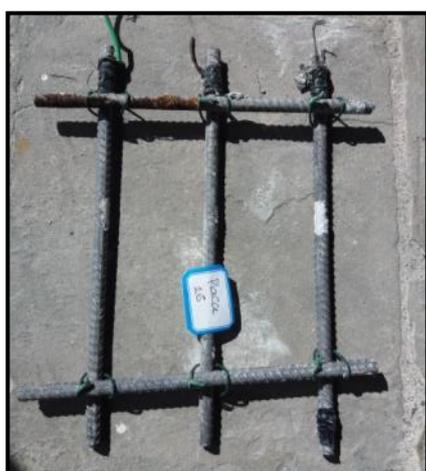


Figura 104-. Malha desfeita e barras prontas para a limpeza final e pesagem.



Figura 106- Barras no processo de limpeza em ácido. Madeiras divisórias para evitar misturas. Foram feitas 5 barras de cada vez.



Figura 107- Incrustações remanescentes após limpeza com ácido.



Figura 108-Utilização de lixadeira mecânica para retirar as incrustações mais aderidas.



Figura 109-Aspecto final da barra, pronta para ser pesada.



Após toda a limpeza, conforme mostrado nas figuras anteriores, cada barra foi pesada, sendo possível verificar a perda de massa comparando-se os valores antes e depois do período de estudo.

A NBR 7480 (2007)<sup>12</sup> indica requisitos e critérios quanto à utilização de barras de aço para concreto armado. Para este caso a norma estabelece o valor da massa das barras por unidade de comprimento, de acordo com cada bitola, e ainda estabelece valores de tolerância para tal.

<sup>12</sup> Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado- Especificação

O terceiro e último ensaio de monitoramento físico, foi o de resistência à tração, o qual foi realizado segundo a NBR ISO 6892-1(2013)-*Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente*. Figuras 110 e 111.

Figura 110-Barra devidamente acoplada ao equipamento e pronta para o ensaio.

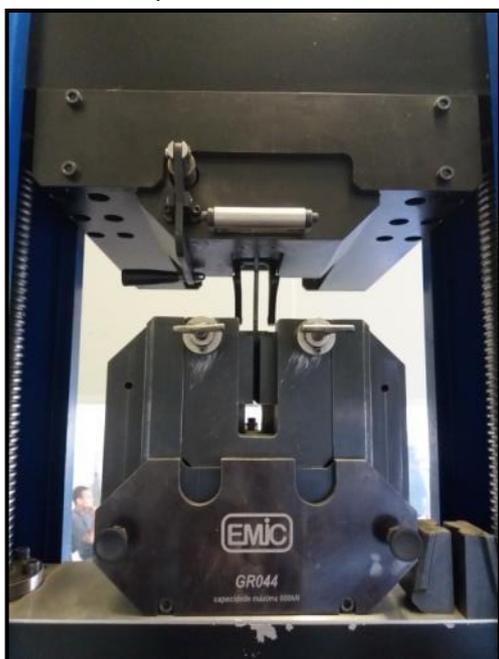


Figura 111-Imagem da barra após a ruptura.



De maneira análoga ao ensaio de perda de massa, antes do início dos trabalhos, logo após a compra do aço, pegou-se três amostras de cada bitola, totalizando 9 barras, para terem sua resistência à tração testadas. Além dos critérios normativos, esses valores iniciais serviram de base para comparar possíveis diferenças no comportamento mecânico das barras após a corrosão.

Depois de verificado a perda de massa de todas as barras, escolheu-se 3 barras de cada família que obtiveram as maiores perdas. Assim, ao todo foram ensaiadas 12 amostras como forma de verificar se mesmo após o processo corrosivo, as barras mantiveram ou não suas características mecânicas.

## CAPÍTULO 4

### 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados todos os resultados dos ensaios propostos na metodologia, bem como seus respectivos comentários e discussões.

#### 6.1. Ensaios de controle de produção do concreto.

- **Massa específica no estado fresco e consistência**

Como controle de aceitação para utilização do concreto, foram realizadas medidas da massa específica fresca e de consistência para cada família de concreto, conforme resultados na tabela.15.

Tabela 15- Resultados de ensaios de controle de produção do concreto.

Família	Aditivo (% em relação à massa de cimento)	Tempo de mistura (Minutos)	Massa específica fresca almejada (Kg/ m <sup>3</sup> )	Massa específica fresca obtida (Kg/ m <sup>3</sup> )	Abatimento do tronco de cone (mm)
R	Plastificante (0,6%)	15	2.300	<b>2.203</b>	230
L1	Incorporador de ar (0,1%)	2	1.900	<b>1.851</b>	180
L2	Incorporador de ar (0,1%)	10	1.700	<b>1.616</b>	195
L3	Incorporador de ar (0,1%)	20	1.500	<b>1.508</b>	220

Conseguiu-se obter massas específicas no estado fresco bem próximas às almejadas inicialmente. Observa-se uma redução de massa específica em relação ao concreto de referência de 16%, 29% e 37% para as famílias leves, L1, L2 e L3, respectivamente.

Com relação à consistência dos concretos, obteve-se níveis satisfatórios de trabalhabilidade, sem segregação e com boa coesão, que permitiram um adequado manuseio e preenchimento das fôrmas. Parâmetros importantes, tendo em vista a pequena espessura das fôrmas.

## 6.2. Ensaios de caracterização do concreto.

### 6.2.1. Estado fresco

- Teor de ar.

Na tabela 16, estão os parâmetros de teor de ar, massa específica e consumo de cimento, calculados, para os concretos no estado fresco, por meio das fórmulas contidas na NBR9833 (ABNT,2005).

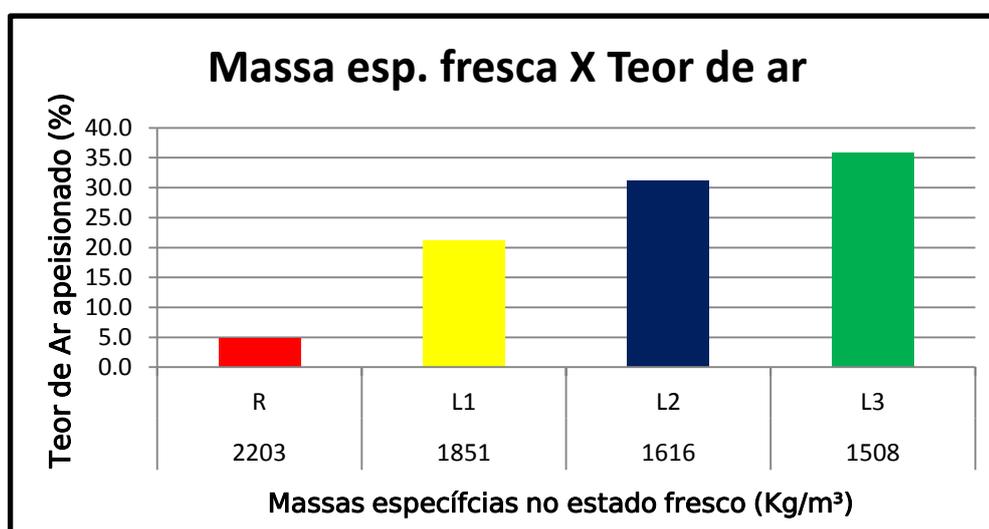
Tabela 16- Dados de massa específica fresca, consumo de cimento e Teor de ar para cada família.

Nomenclatura de cada família	Massa específica fresca (Kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Índice de ar	Teor de ar (%)
R	<b>2203</b>	342	1,051	<b>4,8</b>
L 1	<b>1851</b>	284	1,269	<b>21,2</b>
L 2	<b>1616</b>	248	1,453	<b>31,2</b>
L 3	<b>1508</b>	232	1,557	<b>35,8</b>

Com relação aos teores de ar incorporados, observa-se uma grande diferença entre o concreto de referência e os concretos leves. Quanto ao primeiro tipo, Neville (2016) encontrou valores na ordem de 2,3 % de ar aprisionado. Esse valor maior, de 4,8 %, pode estar associado ao tempo de mistura. Essa diferença pode ser melhor visualizada no gráfico 6.

Para os concretos leves, observa-se um significativo aumento do teor de ar conforme diminui a massa específica.

Gráfico 6- Relação entre teor de ar e massa específica fresca.



### 6.2.2. Estado endurecido

- Resistência à compressão

Na tabela 17, encontram-se os resultados de resistência à compressão aos 28 para cada família de concreto.

Tabela 17- Resistência à compressão aos 28 dias das famílias de concreto.

Resistência à compressão CP's (10x20 cm)	28 dias		
	Famílias	Carga (kg)	Tensão (MPa)
R	26940	<b>33,65</b>	<b>32,03</b>
R	24420	30,50	
R	25560	31,93	
L1	6360	7,94	<b>8,60</b>
L1	7130	8,91	
L1	7160	<b>8,94</b>	
L2	1630	2,04	<b>1,97</b>
L2	1720	<b>2,15</b>	
L2	1370	1,71	
L3	490	<b>0,61</b>	<b>0,58</b>
L3	460	0,57	
L3	440	0,55	

Comparando os níveis de resistência à compressão entre o concreto de referência e os concretos leves, observa-se uma drástica diferença. A família L1, por exemplo, a qual possui, em média, a maior resistência dentre os concretos leve, representa apenas cerca de 25% da resistência média do concreto de referência.

A família de concreto mais leve e com maior teor de ar aprisionado, a L3, apresentou valores extremamente baixos de resistência à compressão. Menores até do que blocos de vedação cerâmicos sem função estrutural. Esses valores, de certa forma, já eram esperados, tendo em vista o aspecto tátil visual bastante friável da superfície desses corpos de prova.

- **Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão.**

Na tabela 18 encontram-se os resultados de massa específica seca, índice de vazios e absorção por imersão de cada uma das famílias, conforme procedimentos e cálculos da NBR 9778 (ABNT,2005).

Tabela 18-Resumo dos resultados de caracterização dos concretos no estado endurecido.

Famílias	Massa específica seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)	Absorção de água por imersão (%)
R	2151	14,86	6,91
L1	1784	21,01	11,77
L2	1520	46,78	30,77
L3	1399	52,65	37,62

Os resultados exprimiram um comportamento coerente dos concretos de cada uma das famílias. Observa-se que com a diminuição da massa específica há um aumento do índice de vazios e, por conseguinte, do nível de absorção de água.

Uma relação interessante a ser mostrada é entre a resistência à compressão, o índice de vazios e a massa específica seca, conforme tabela 19 e gráficos 7, 8 e 9. Adotou-se para a resistência à compressão os maiores valores obtidos para cada uma das famílias, de acordo com a tabela 17.

Como mostrado por Neville (2016) e já esperado, a resistência à compressão diminuiu com o a diminuição da massa específica e incremento do índice de vazios.

Tabela 19- Relações entre algumas características dos concretos.

Famílias	Massa específica seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)	Resistência à compressão (MPa)
R	2151	14,86	33,5
L1	1784	21,01	8,94
L2	1520	46,78	2,15
L3	1399	52,65	0,61

Gráfico 7-Relação entre massa específica seca e resistência à compressão.

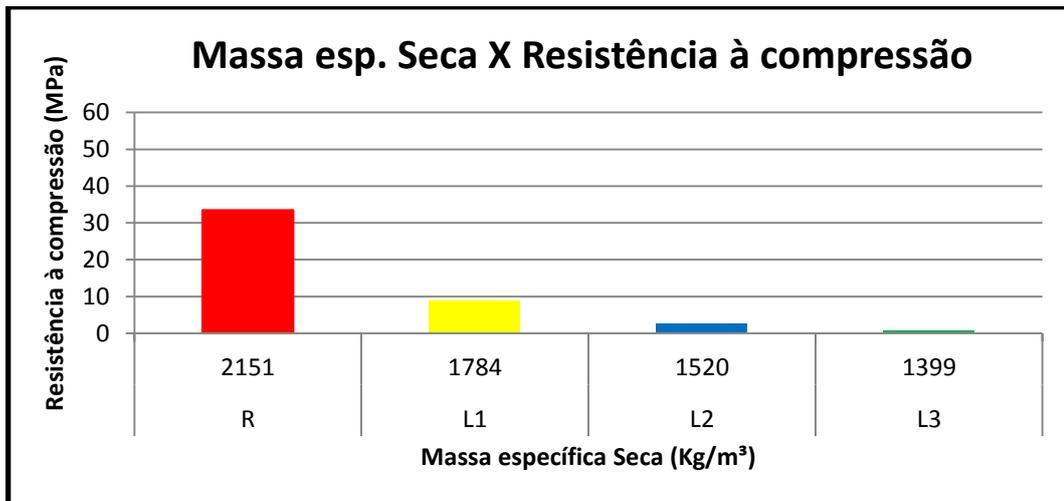


Gráfico 8- Relação entre massa específica seca e índice de vazios.

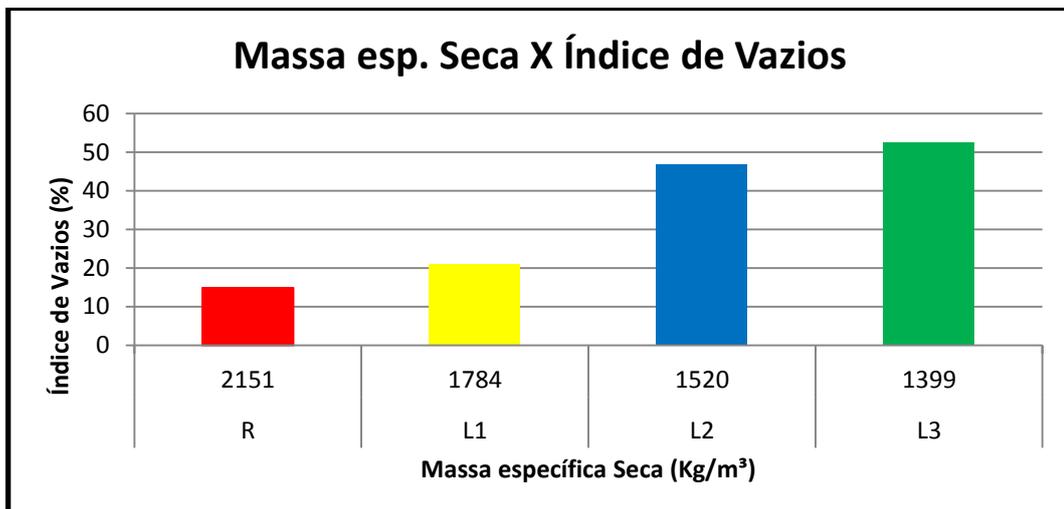
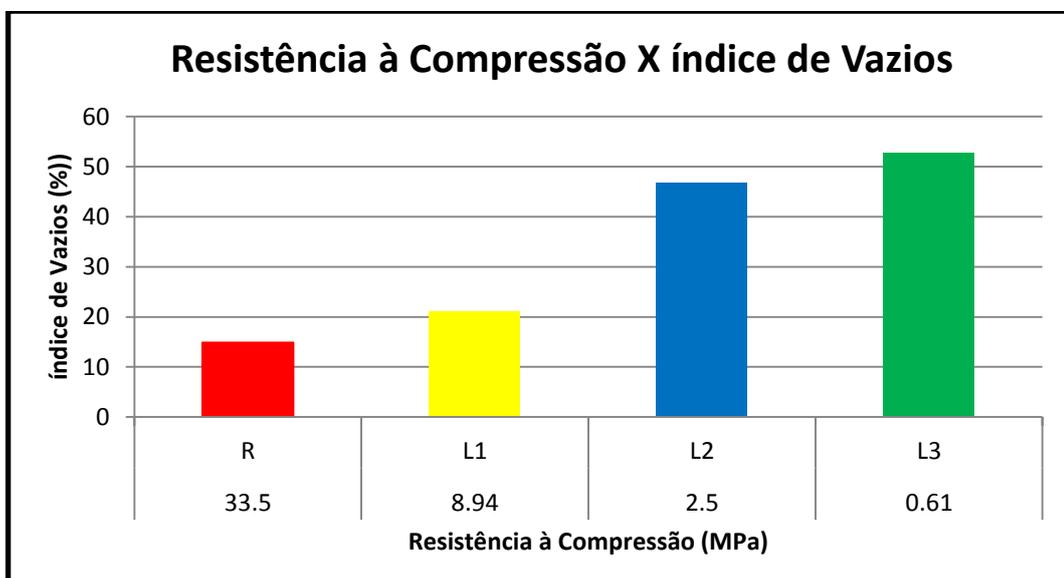


Gráfico 9- Relação entre resistência à compressão e índice de vazios.



Como forma de exemplificar esse comportamento mostrado em relação ao índice de vazios e a resistência à compressão, após o ensaio de compressão, seccionou-se o corpo de prova e registrou-se com câmera digital comum a porosidade no interior do concreto, conforme figuras 112, 113, 114 e 115. É possível observar uma sensível diferença entre a família R e as famílias leves, especialmente a L2 e L3.

Figura 113-Família R



Figura 112-Família L1



Figura 115-Família L2



Figura 114- Família L3



### 6.3. Temperatura e umidade

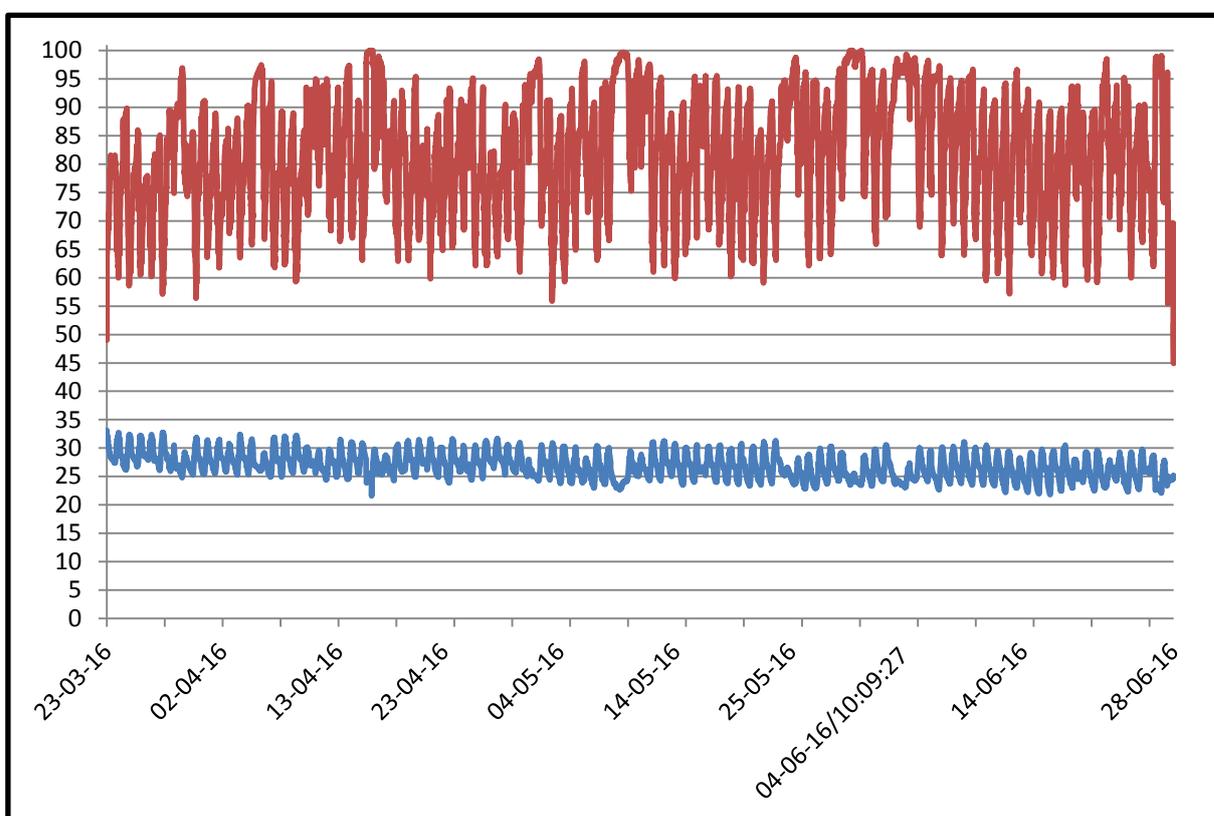
Instalou-se um termohigrômetro, localizado no mesmo lugar de acondicionamento das placas durante o período de ensaio de imersão e emersão, para registrar o microclima de exposição. Os valores de temperatura e umidade relativa estão na tabela 20 e no gráfico 10.

Tabela 20-Valores notáveis de temperatura e umidade durante o estudo.

Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa máxima (%)	Umidade relativa mínima (%)	Umidade relativa média (%)
<b>33,10</b>	<b>21,60</b>	<b>26,83</b>	<b>100,00</b>	<b>44,90</b>	<b>81,92</b>

O período de avaliação foi de 23/3/16 a 28/6/16. Nesse tempo o delta máximo de temperatura foi de 12 °C, onde a média no período foi de 26,8 °C. Já a umidade relativa atingiu rapidamente alguns picos de 100% e mais alguns acima de 95%, mantendo uma média de 81,9% durante o estudo. Observando o gráfico 10, nota-se que a temperatura ficou compreendida entre 25 e 30 °C, majoritariamente.

Gráfico 10- Variação de temperatura e umidade durante o período de estudo.



#### 6.4. Espessura das placas e cobrimento das armaduras

Como mostrado na metodologia, utilizou-se equipamento com sensor eletromagnético para estimar o cobrimento das armaduras. As informações geradas pelo equipamento estão exemplificadas nas figuras 116 e 117. A primeira é o quickscan, onde pode-se estimar o valor do cobrimento da armadura. A segunda é imagescan, que retrata fielmente a configuração e posicionamento das armaduras dentro do concreto.

Figura 116- Leitura da face B da placa 01, mostrando o cobrimento das três barras verticais (22 mm de média).

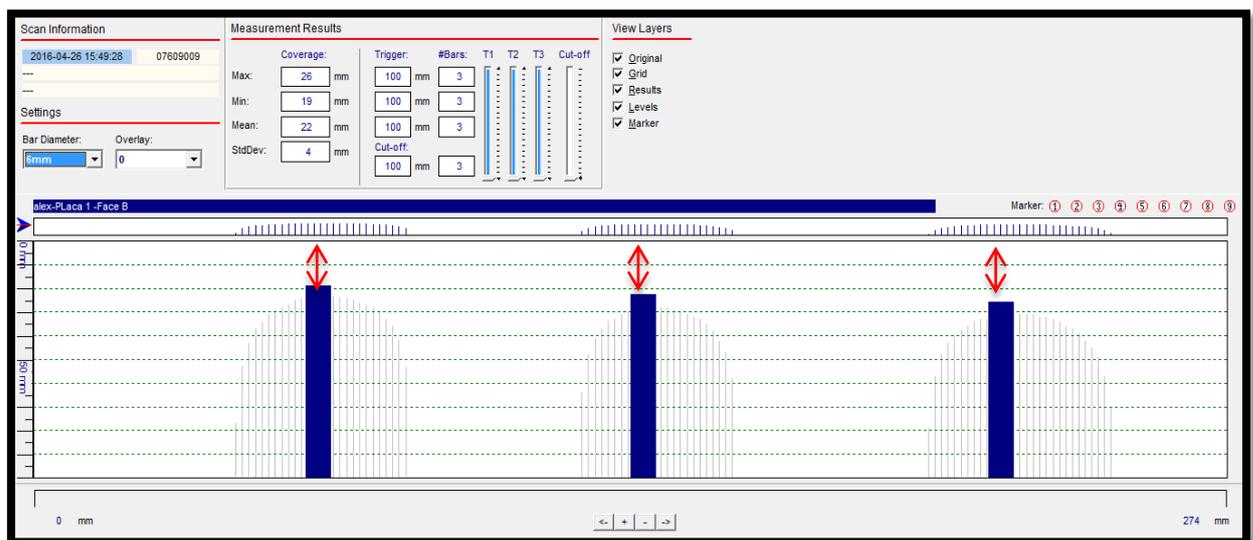
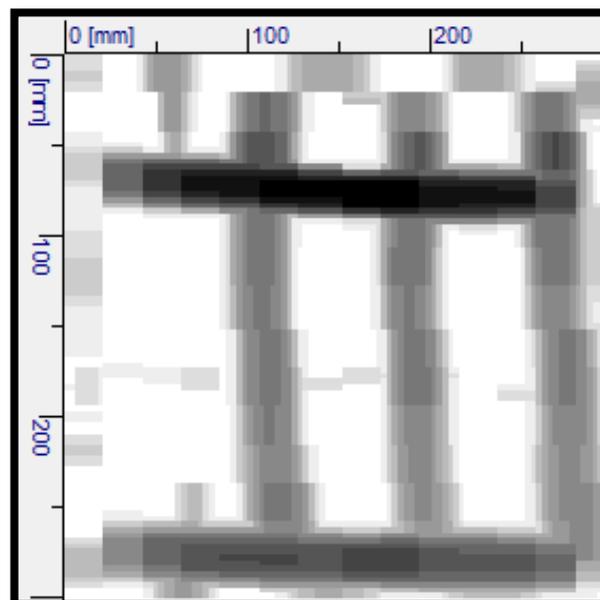


Figura 117-Imagem da face A da placa 9. As barras horizontais, mais escuras, encontram-se a frente das barras verticais.



Nas tabelas 21, 22, 23 e 24 estão os valores estimados de cobrimento médio das armaduras de cada face das 72 placas, separadas por famílias.

Tabela 21- Valores de espessura e cobrimentos médios das placas da **família R**.

Placas	Esp. Média placa (mm)	Cobrimento médio da Face B (mm)	Cobrimento médio da Face A (mm)
1	54.5	22.0	19.9
2	50.5	16.0	21.9
3	48.5	18.0	17.9
4	49.5	19.0	17.9
5	52.0	22.0	17.4
6	50.5	26.0	11.9
7	51.5	23.0	12.5
8	51.0	23.0	12.0
9	54.0	29.0	9.0
10	59.5	27.0	16.5
11	50.0	19.0	15.0
12	49.0	20.0	13.0
13	49.0	19.0	10.0
14	51.5	19.0	12.5
15	51.0	20.0	11.0
16	49.0	15.0	14.0
17	50.0	20.0	10.0
18	52.0	19.0	13.0

Tabela 22- Valores de espessura e cobrimentos médios das placas da família L1.

Placas	Esp. Média placa (mm)	Cobrimento médio da Face B (mm)	Cobrimento médio da Face A (mm)
19	59.5	33.0	13.9
20	49.5	18.0	18.9
21	49.0	12.0	24.4
22	49.5	22.0	14.9
23	50.5	12.0	25.9
24	52.0	20.0	19.4
25	47.5	17.0	14.5
26	49.0	17.0	16.0
27	53.0	14.0	23.0
28	62.5	21.0	25.5
29	42.0	15.0	11.0
30	48.0	22.0	10.0
31	50.0	12.0	18.0
32	50.5	22.0	8.5
33	51.5	24.0	7.5
34	51.0	15.0	16.0
35	50.0	19.0	11.0
36	52.0	16.0	16.0

Tabela 23- Valores de espessura e cobrimentos médios das placas da família L2.

Placas	Esp. Média placa (mm)	Cobrimento médio da Face B (mm)	Cobrimento médio da Face A (mm)
37	59.0	23.0	23.4
38	50.0	20.0	17.4
39	50.0	13.0	24.4
40	49.5	17.0	19.9
41	45.5	11.0	21.9
42	50.0	20.0	17.4
43	51.0	20.0	15.0
44	50.5	17.0	17.5
45	51.5	21.0	14.5
46	63.0	25.0	22.0
47	46.5	16.0	14.5
48	48.0	19.0	13.0
49	48.5	20.0	8.5
50	49.5	19.0	10.5
51	51.0	8.0	23.0
52	49.5	14.0	15.5
53	48.5	12.0	16.5
54	49.5	17.0	12.5

Tabela 24- Valores de espessura e cobrimentos médios das placas da família L3.

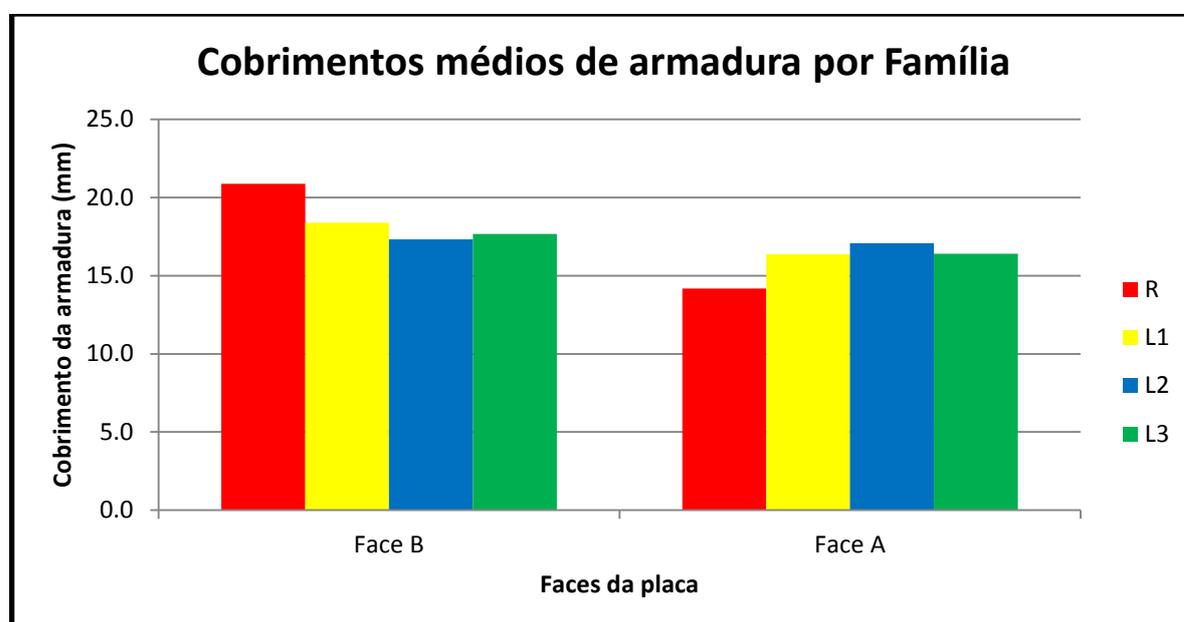
Placas	Esp. Média placa (mm)	Cobrimento médio da Face B (mm)	Cobrimento médio da Face A (mm)
55	63.5	21.0	29.9
56	48.0	18.0	17.4
57	48.0	14.0	21.4
58	50.0	17.0	20.4
59	48.5	13.0	22.9
60	48.5	14.0	21.9
61	50.0	22.0	12.0
62	47.0	19.0	12.0
63	50.0	16.0	18.0
64	59.5	20.0	23.5
65	48.5	21.0	11.5
66	46.5	23.0	7.5
67	51.5	14.0	17.5
68	48.5	15.0	13.5
69	50.0	17.0	13.0
70	48.0	18.0	10.0
71	47.5	22.0	5.5
72	51.5	14.0	17.5

Observa-se que além da variação do cobrimento inerente à mudança de bitola, verifica-se uma variação na espessura da final da placa, bem como no posicionamento da malha de aço. Na tabela 25 e no gráfico 11 encontra-se um resumo dos cobrimentos médios de cada família.

Tabela 25-Resumo das médias de cobrimento de cada família.

Famílias	Médias (mm)		Desvio Padrão	
	FACE B	FACE A	FACE B	FACE A
R	20.9	14.2	3.7	3.7
L1	18.4	16.4	5.2	5.7
L2	17.3	17.1	4.4	4.6
L3	17.7	16.4	3.3	6.3

Gráfico 11-Esquema gráfico que mostra os dados contidos na tabela 25.



Foram listados os dados estimados de cobrimento de cada face, individualmente por placa e agrupados por famílias. Estas informações são importantes para, juntamente com a inspeção visual, que será abordada mais adiante, e com os resultados de perda de massa das barras, verificar a possível influência do cobrimento nesses parâmetros.

Por exemplo, poderá ser feita uma relação entre as placas que apresentaram maior intensidade de manchamento superficial com as perdas de massas das barras e os valores de cobrimento apresentados aqui.

## 6.5. Monitoramento eletroquímico

### *6.5.1. Potencial de corrosão*

Durante o período experimental, foram realizados 6 ensaios para medir o potencial de corrosão das placas. O 1º poucos dias depois da concretagem e o 2º imediatamente antes do início dos ciclos de imersão. Os demais foram feitos ao longo do estudo para acompanhar a evolução da corrosão de armadura.

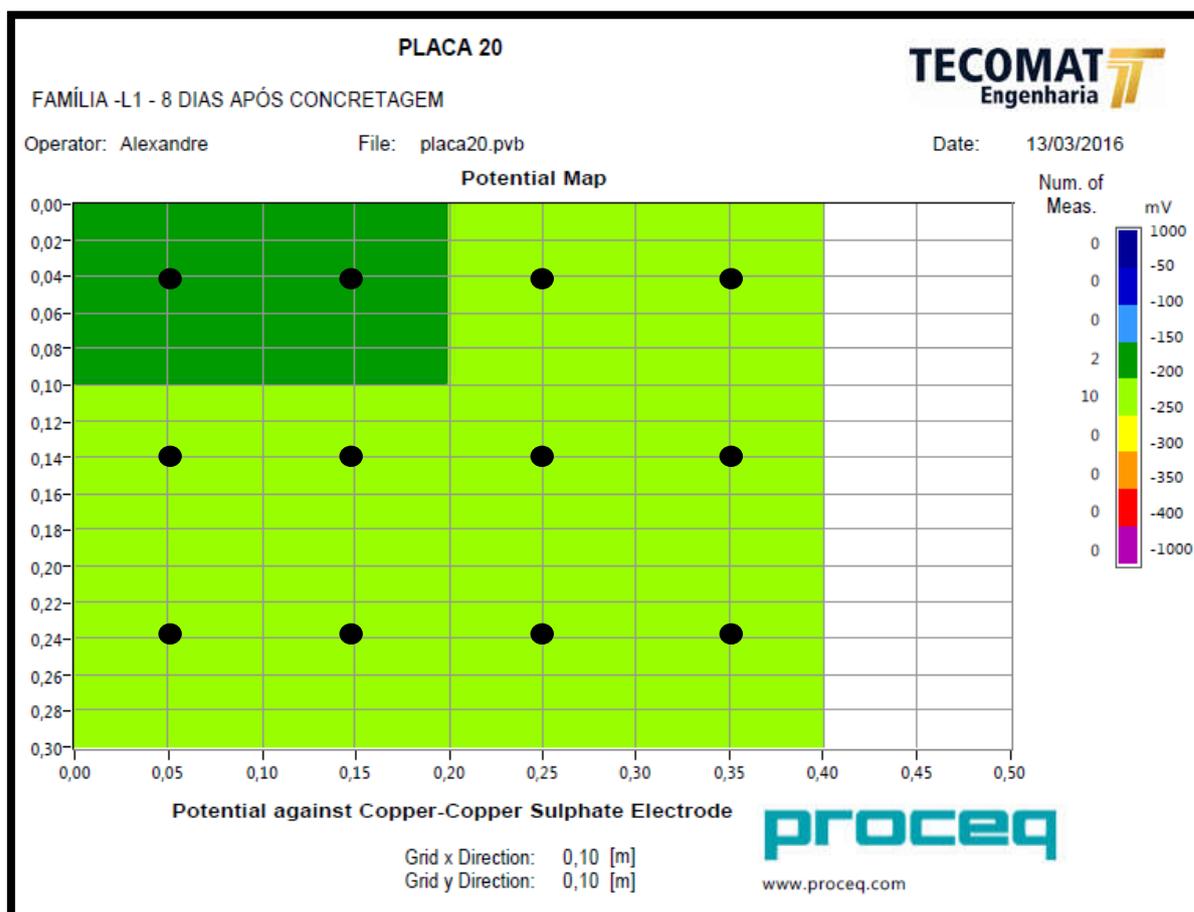
Como dito, em cada momento de ensaio, eram realizadas 12 leituras de potencial em cada placa.

Os resultados serão mostrados aqui de duas maneiras. Primeiro, graficamente, mostrando a evolução de cada placa e de suas famílias como um todo. Para isso, entende-se que o valor (dentre os 12) que deve representar o potencial da placa em certo momento deve ser o mais eletronegativo (pior situação) e não a média dos 12 valores. Essa escolha foi feita, pois, a média pode estar apresentando certo nível de probabilidade de corrosão, e, entretanto, pode haver algum local da placa que esteja mostrado uma maior probabilidade de corrosão.

A segunda forma de exposição dos resultados está apresentada no apêndice “A” deste trabalho. Lá pode-se verificar dois mapas de potencial de cada placa, conforme exemplo da figura 118. A primeira imagem foi realizada 8 dias de idade (antes do início do período de imersão) e a segunda ao final do trabalho, com 120 dias de idade. Estes mapas de potencial também estão acompanhados das fotos do aspecto superficial das placas.

O critério de avaliação seguido foi o proposto pela ASTM C876 (ASTM, 1999), mostrado no item 4.2 do referencial teórico. Em suma, para valores mais negativos que -350, a probabilidade de ocorrência da corrosão é de 90%. Os resultados mais positivos que -200 exprimem uma probabilidade de ocorrência menor que 10%. Já os valores entre esses limites, diz-se que é a faixa de incerteza.

Figura 118-Mapa de potencial da placa 20-Família L1 (13/3/16)



Os pontos escuros indicam os locais de leitura, mostrando o potencial ao redor do ponto em uma área de 10 x 10 cm. As cores são indicadas na escala do lado direito, de acordo com as faixas de potencial de corrosão. Nesse caso, das 12 leituras, 10 estão na região de incerteza, mas com valores mais próximos da região de segurança. Já os outros dois pontos, representados pela cor verde escura, estão na região de probabilidade menor que 10% de ocorrência.

O acompanhamento da variação do potencial de corrosão das placas está agrupado por bitola, sendo 3 grupos por família, conforme gráficos.12, 13 e 14, para a família R. Gráficos 15, 16 e 17, para a família L1. 18, 19 e 20, para família L2. 21, 22 e 23, para L3. Por fim, há a média do comportamento de cada família, no gráfico 24.

Gráfico 12- Potencial de corrosão das placas com armadura 6.3mm -R

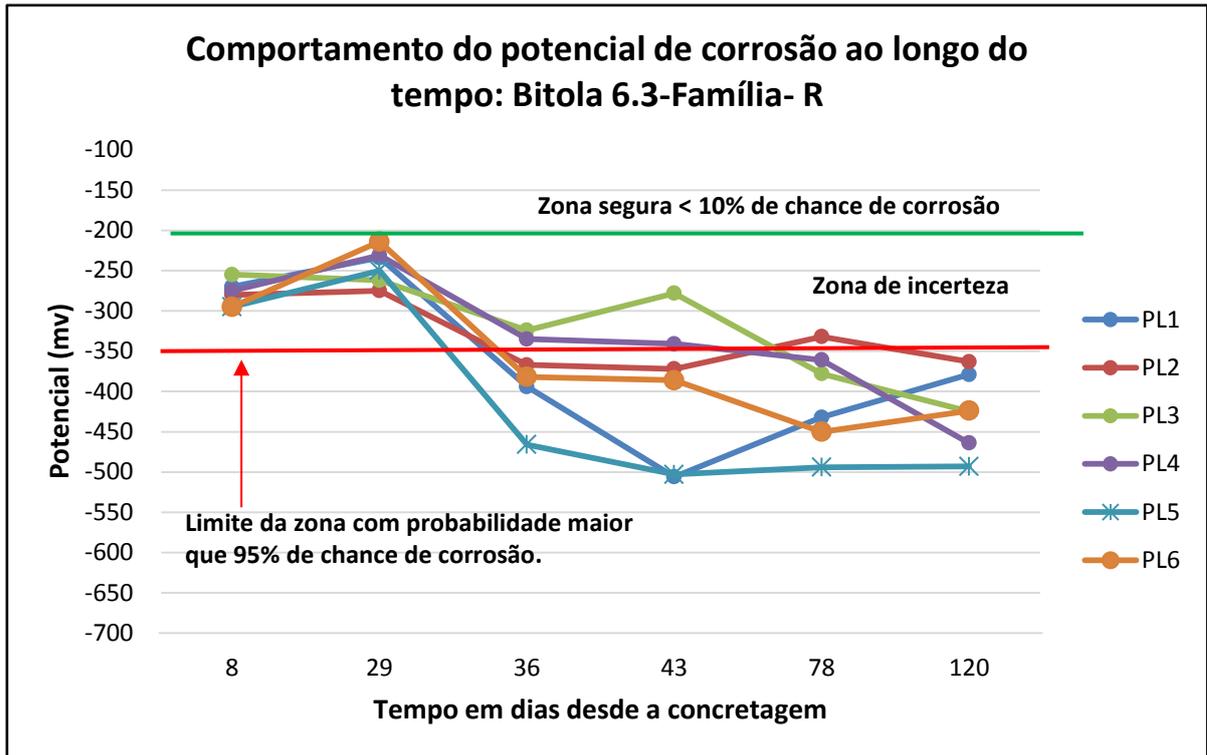


Gráfico 13- Potencial de corrosão das placas com armadura 8.0 mm -R

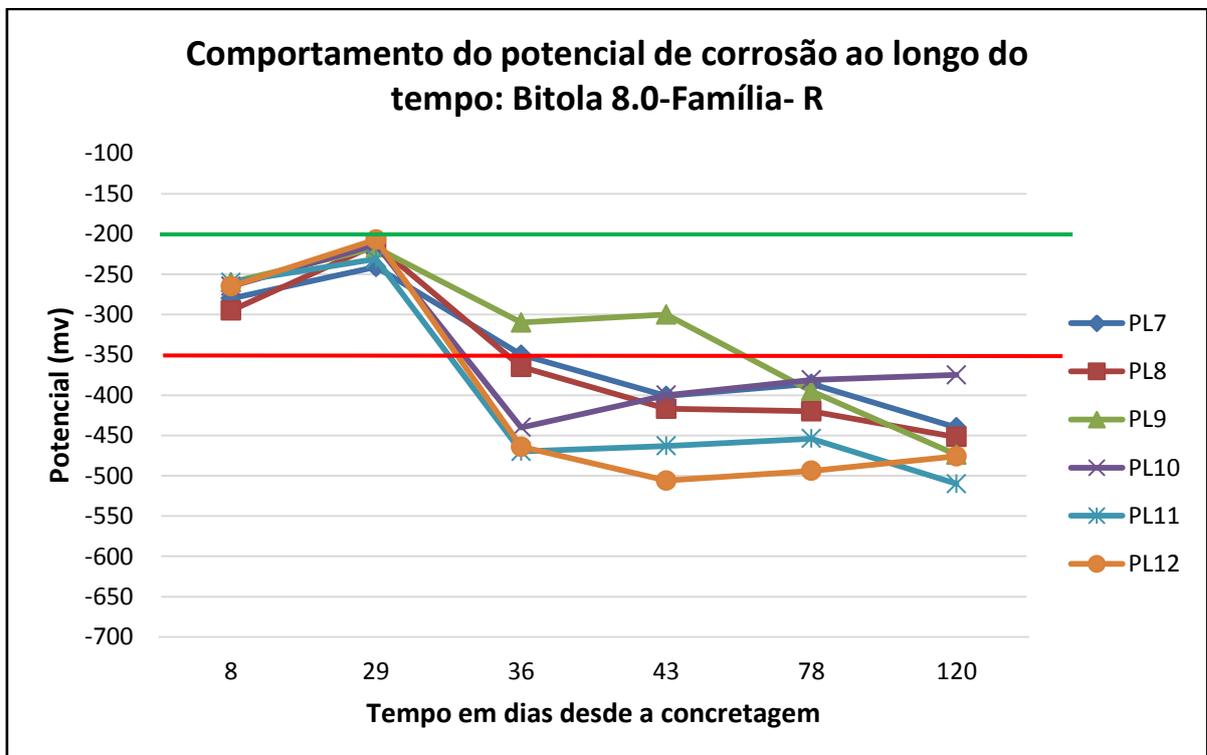


Gráfico 14- Potencial de corrosão das placas com armadura 10.0 mm -R

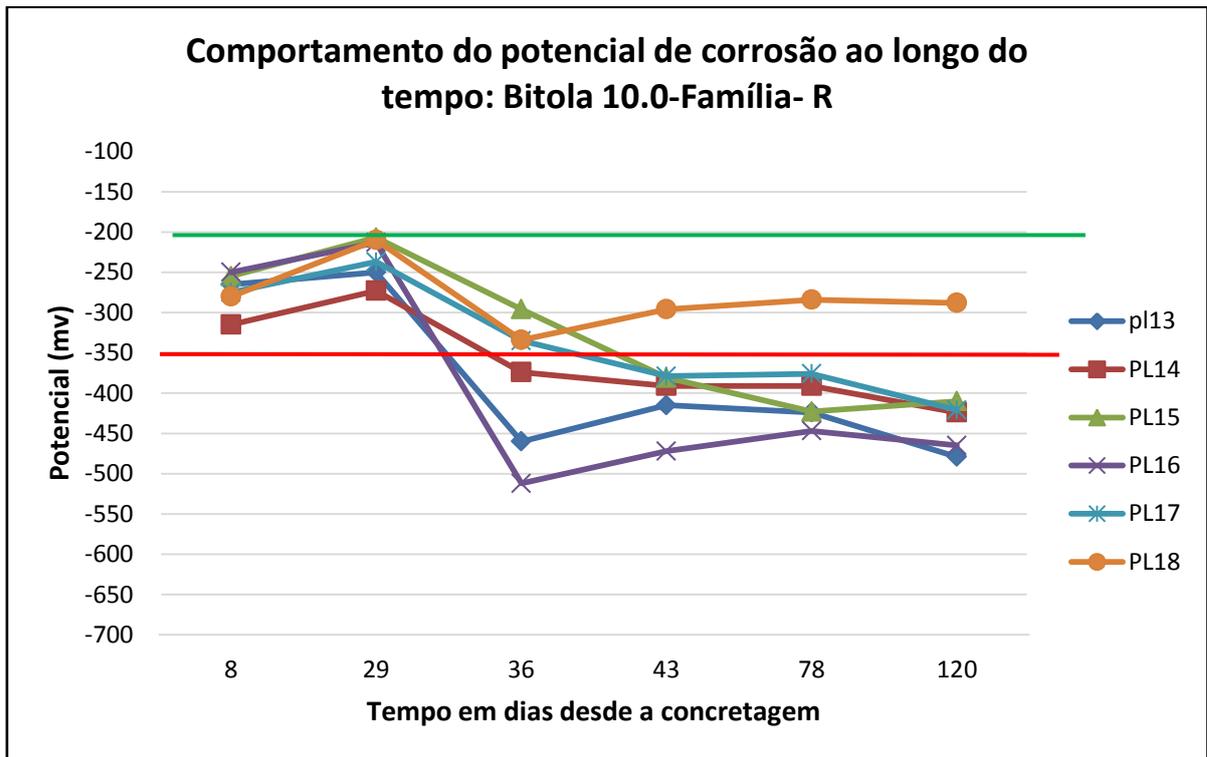


Gráfico 15- Potencial de corrosão das placas com armadura 6.3 mm -L1

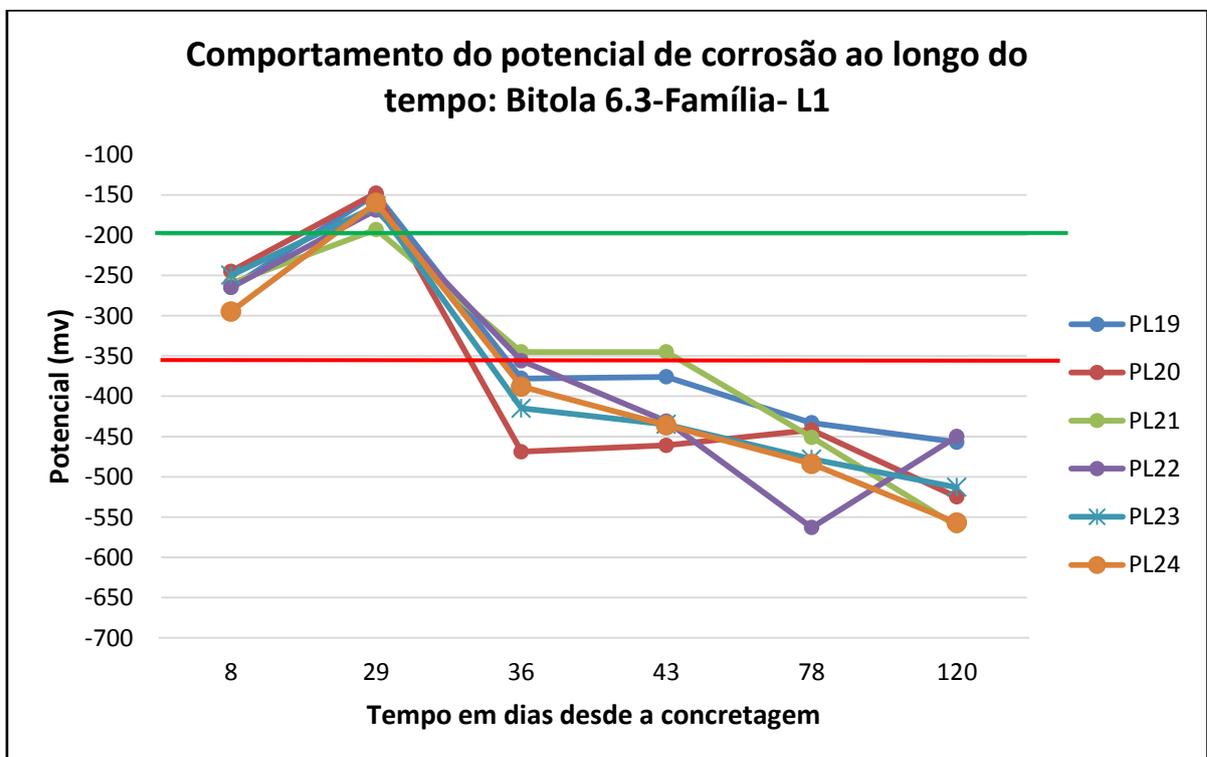


Gráfico 16- Potencial de corrosão das placas com armadura 8.0 mm –L1

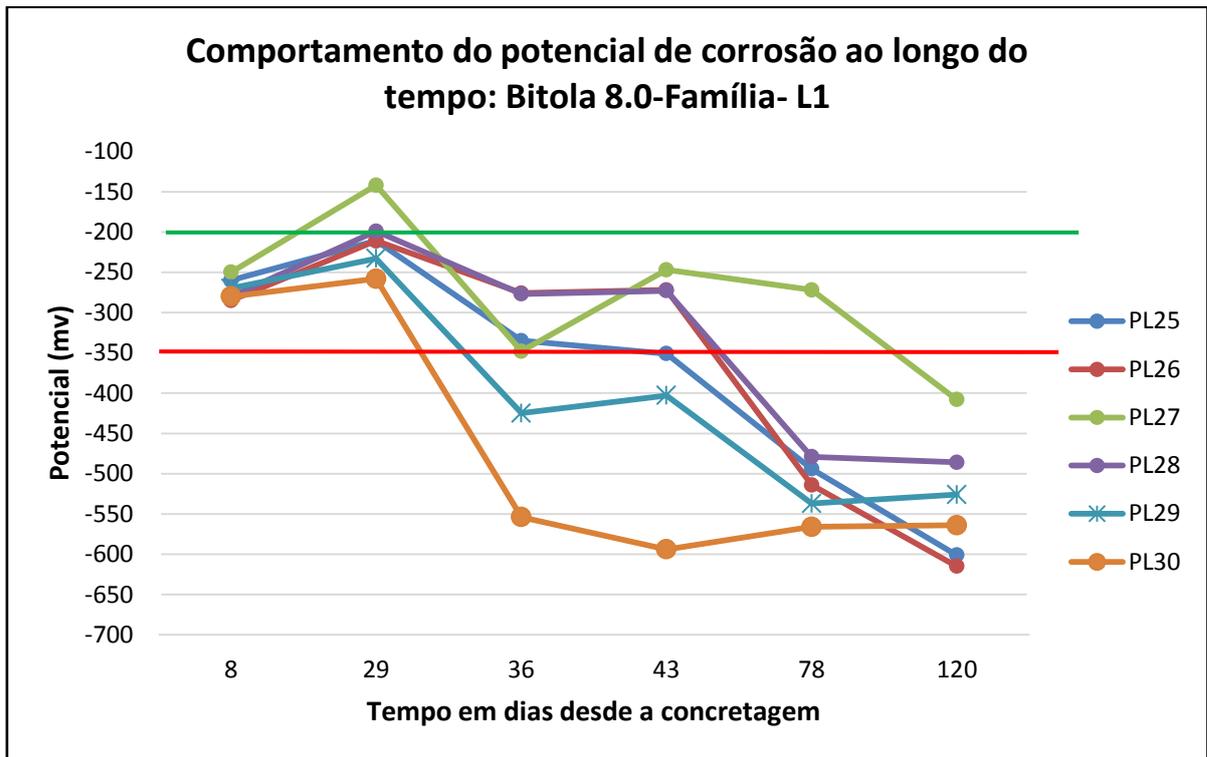


Gráfico 17- Potencial de corrosão das placas com armadura 10.0 mm –L1

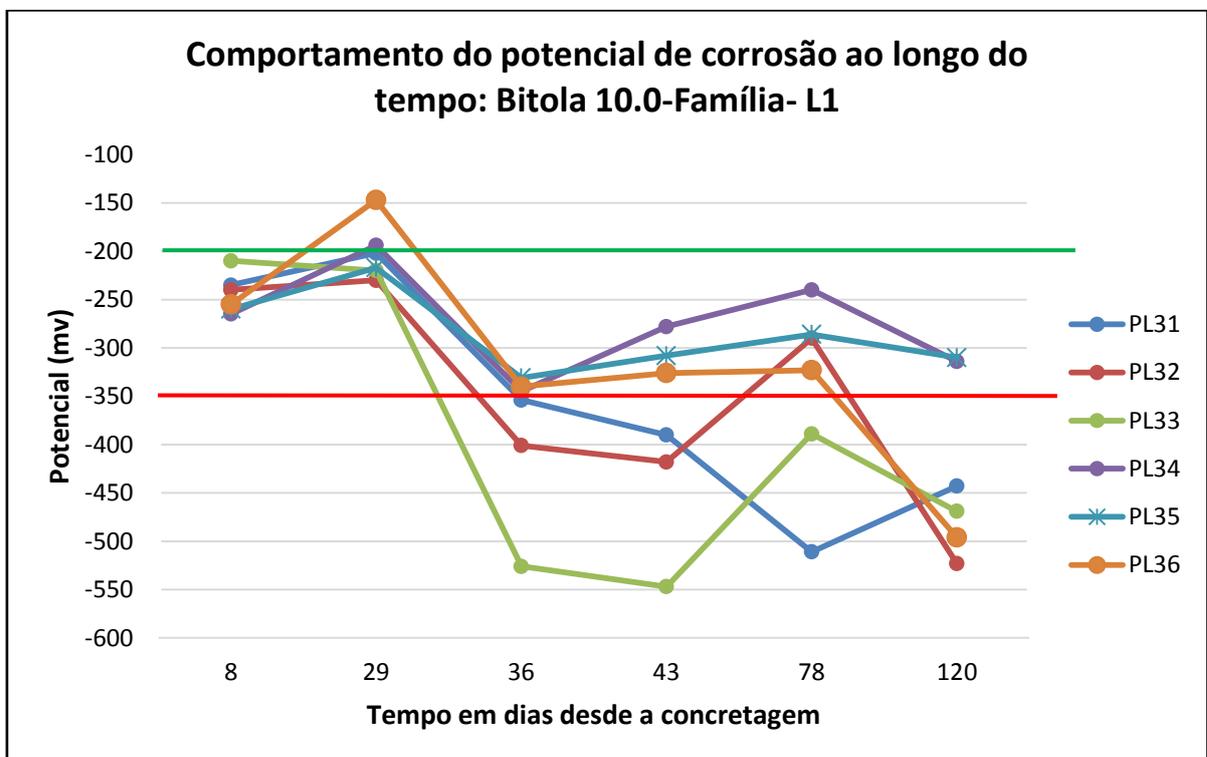


Gráfico 18- Potencial de corrosão das placas com armadura 6.3 mm –L2

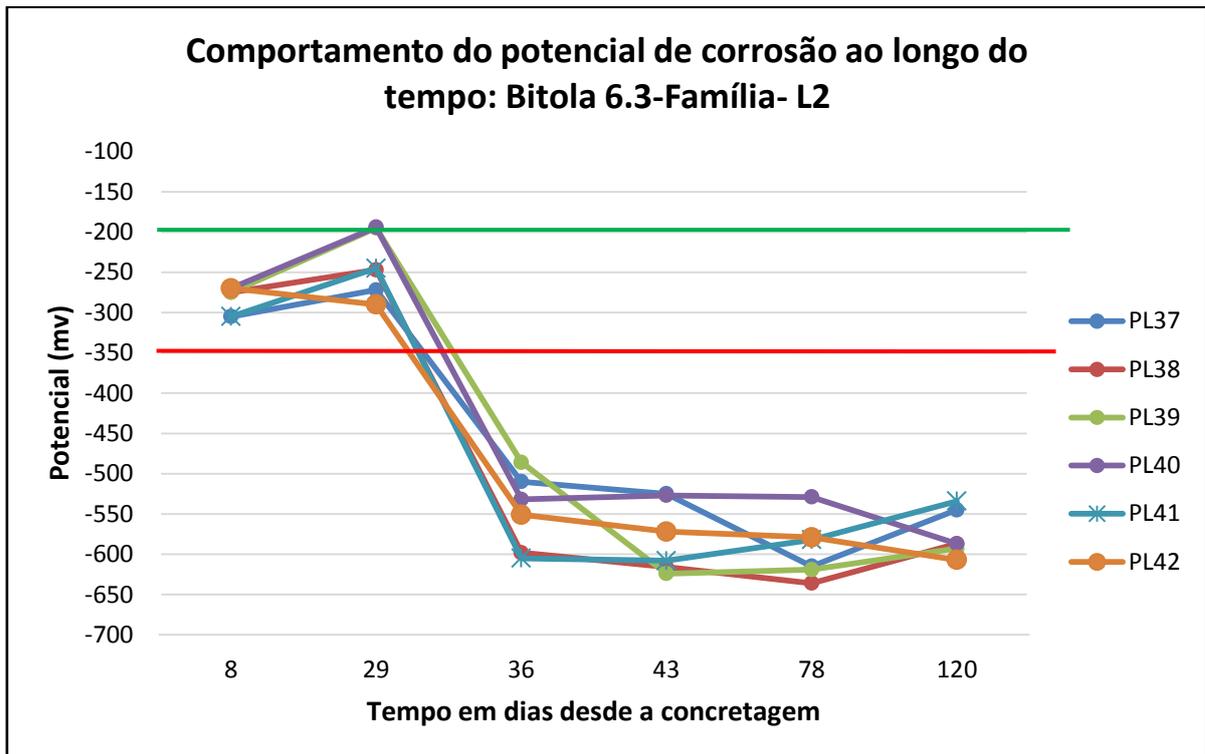


Gráfico 19- Potencial de corrosão das placas com armadura 8.0 mm –L2

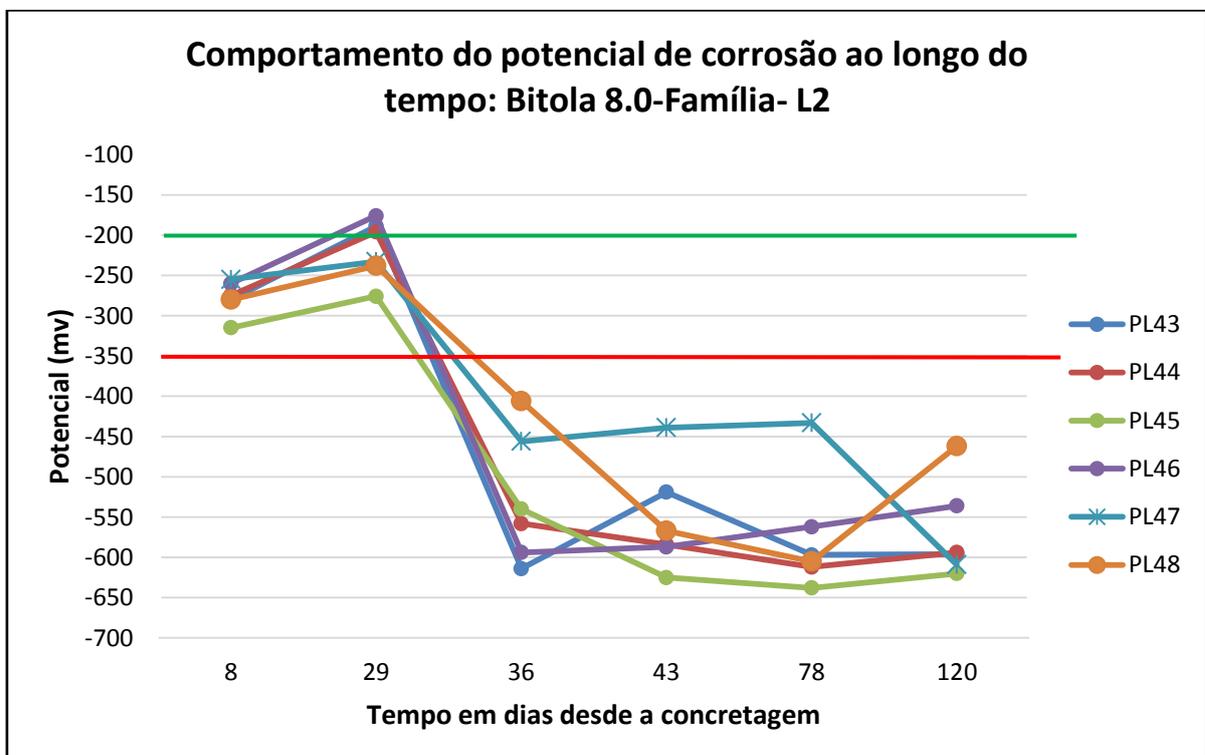


Gráfico 20- Potencial de corrosão das placas com armadura 10.0 mm –L2

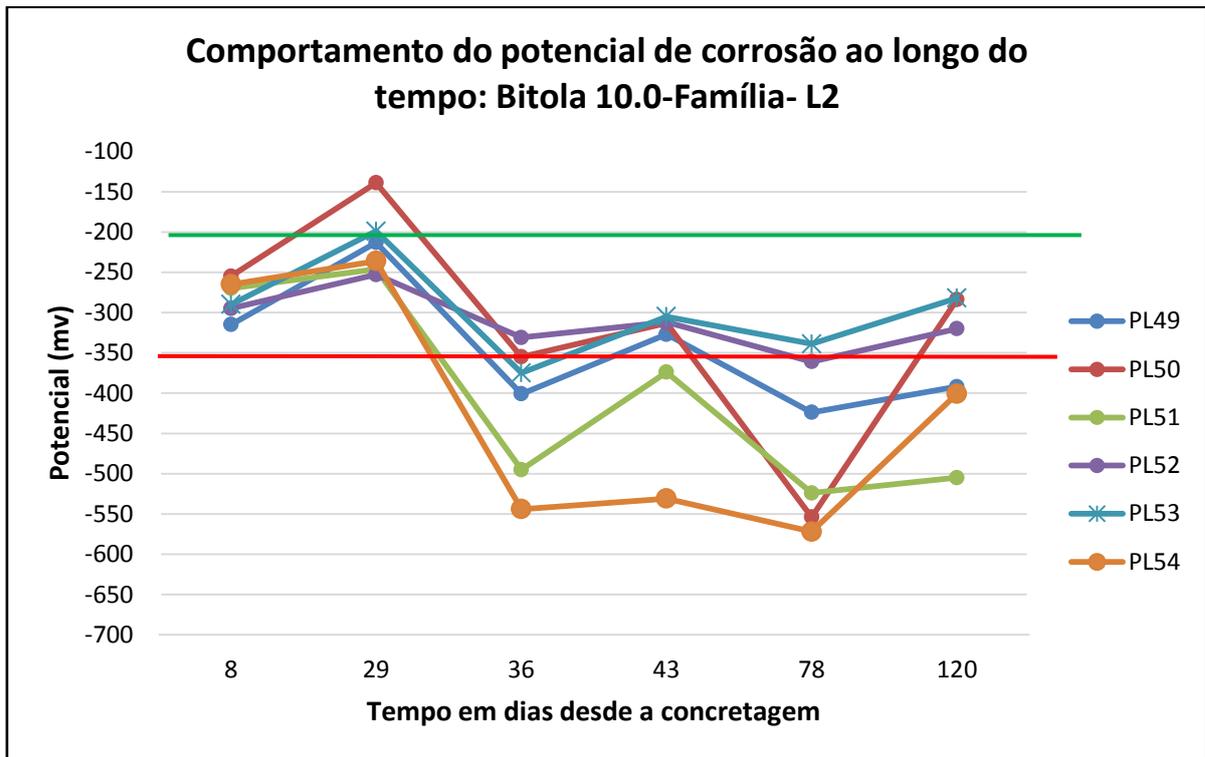


Gráfico 21- Potencial de corrosão das placas com armadura 6.3 mm –L3

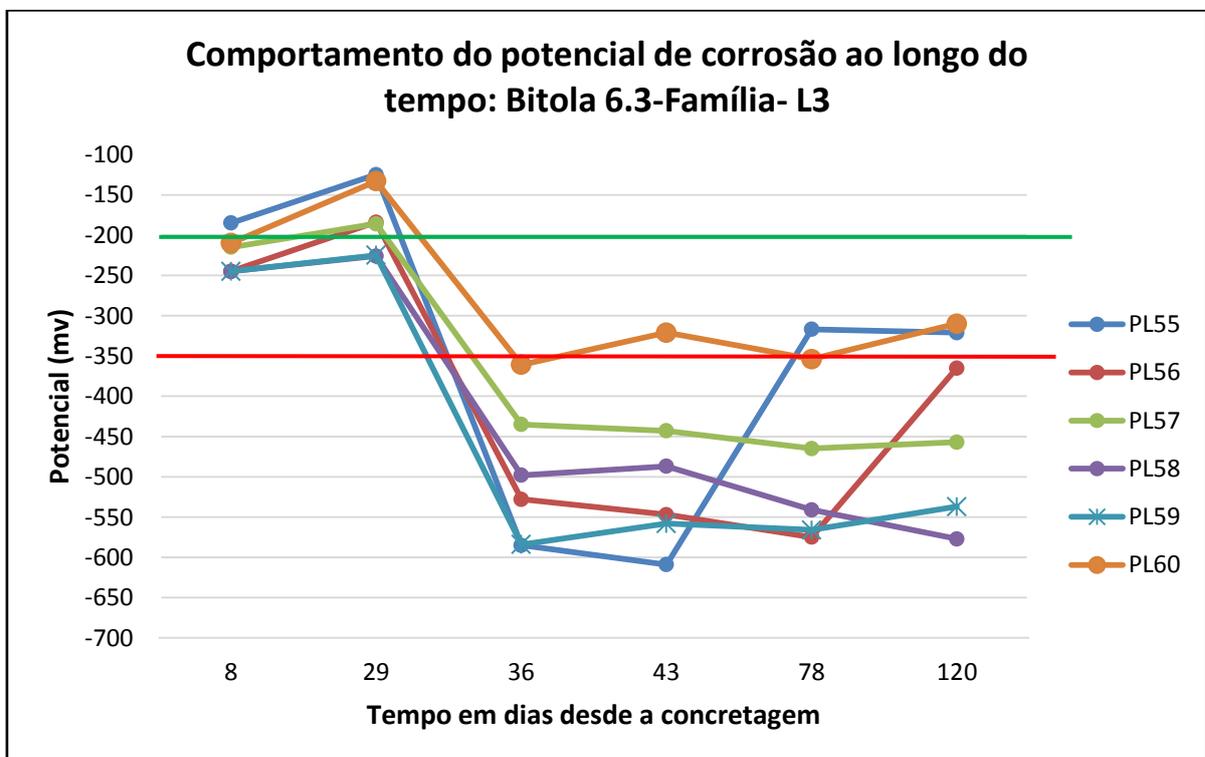


Gráfico 22- Potencial de corrosão das placas com armadura 8.0 mm -L3

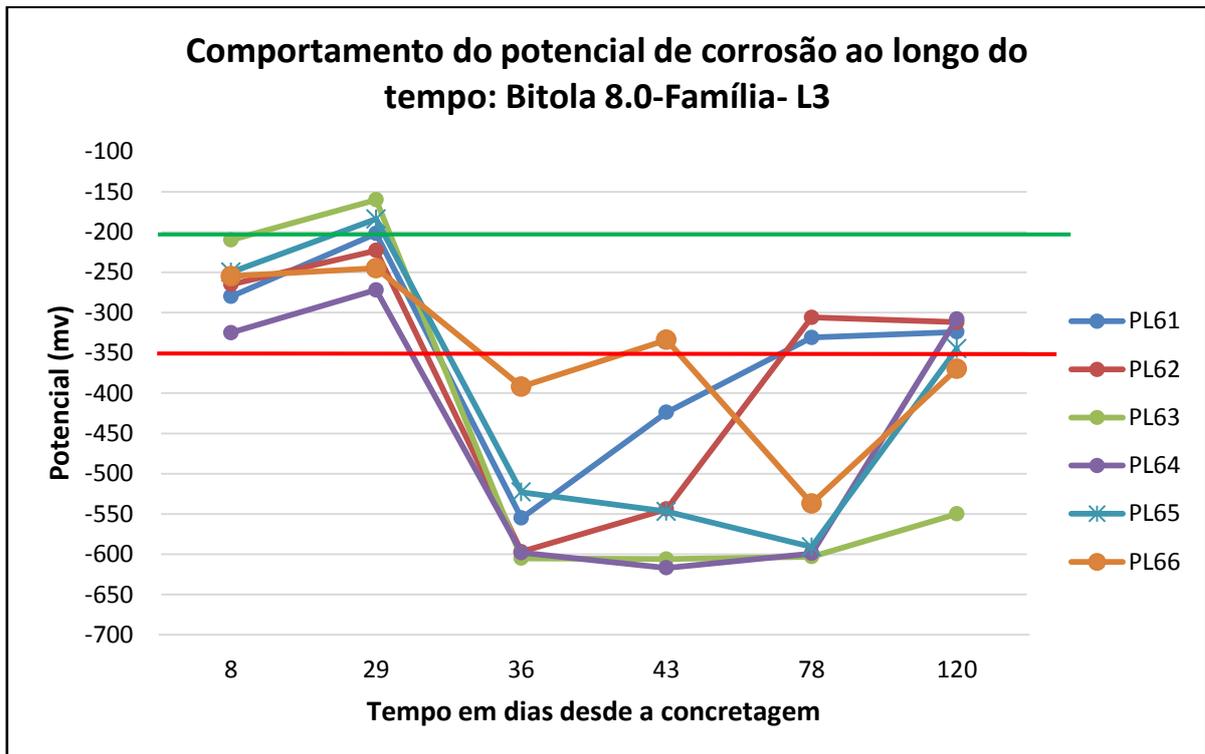


Gráfico 23- Potencial de corrosão das placas com armadura 10.0 mm -L3

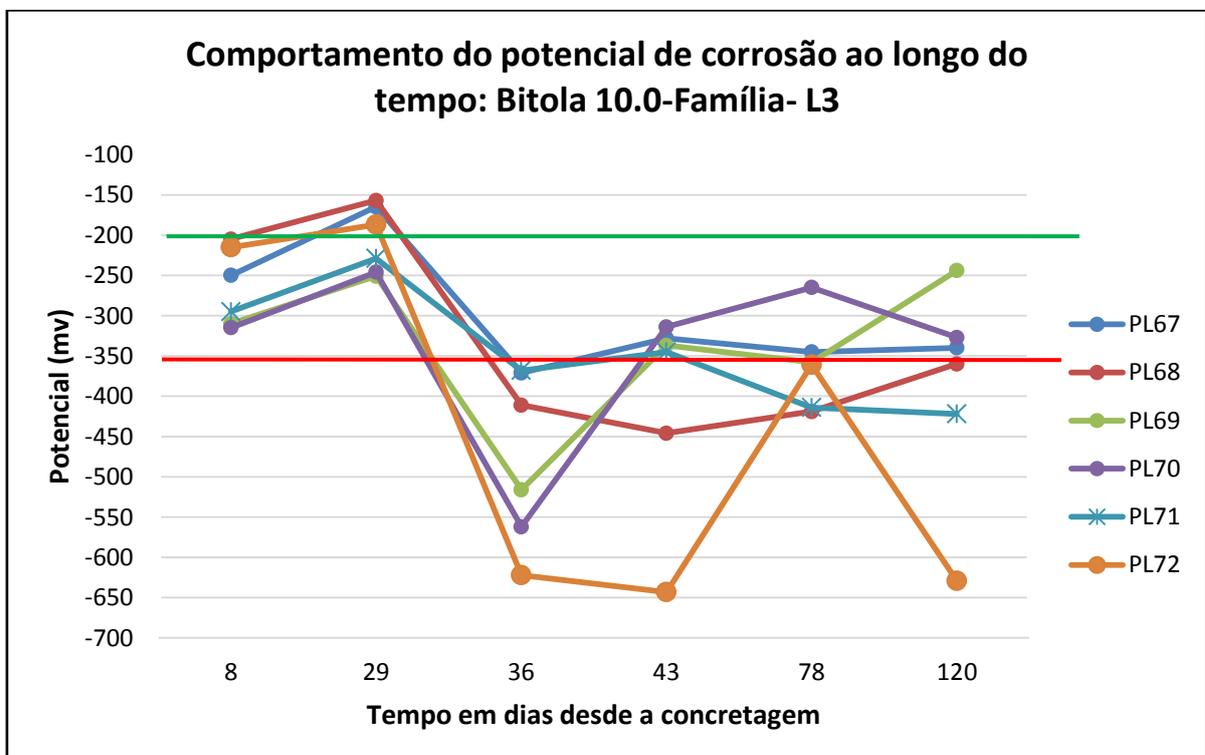
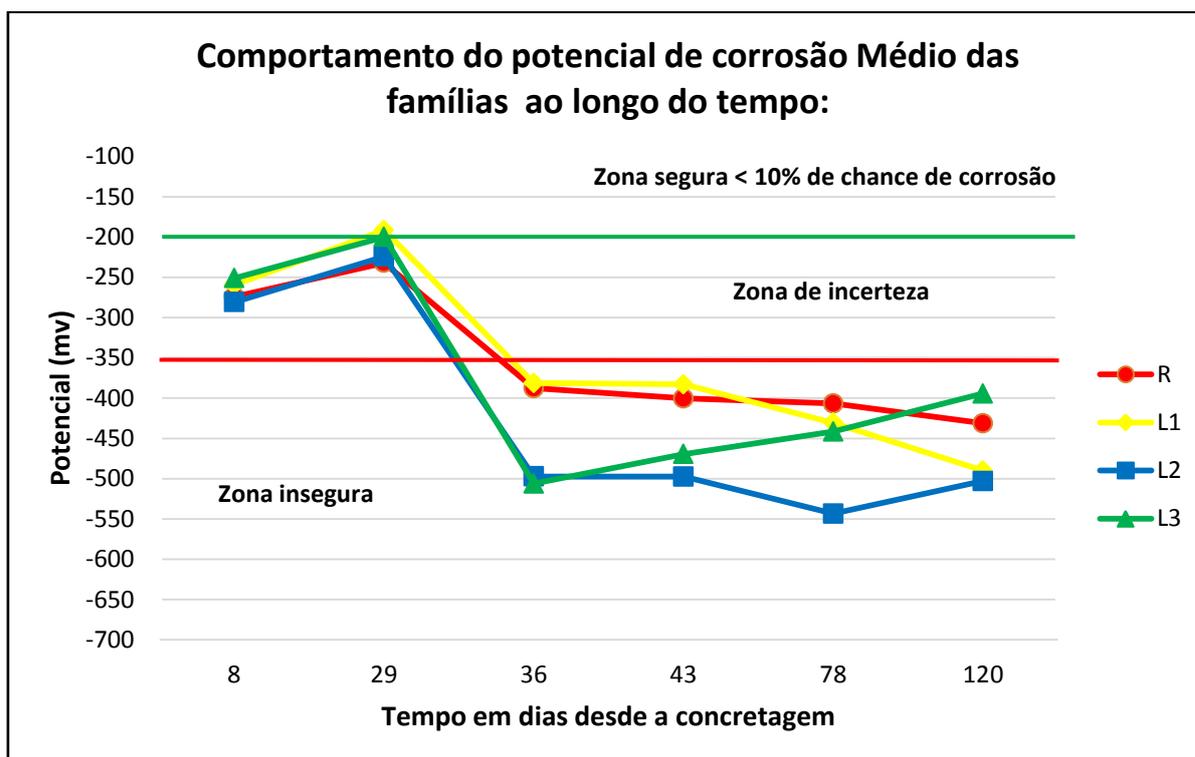


Gráfico 24- Potencial de corrosão médio das famílias.



Com relação à variação do potencial de corrosão das placas de todas as famílias, pode-se realizar alguns comentários. De forma geral, observando os valores médios por família no gráfico 24, nota-se um comportamento muito parecido.

A primeira leitura, poucos dias após a concretagem, está na zona de incerteza. Stratfull (1973) explica a possibilidade de tendência de valores mais negativos de potencial nas primeiras idades seja por formação de cal na superfície do concreto, ou por formação de película de água sobre a barra.

Já na segunda medição, observa-se uma tendência do potencial em ir para a zona “segura”, com probabilidade de corrosão menor que 10%. Este comportamento por ser atribuído devido ao período maior de cura, estando as placas mais “secas”.

Logo após a segunda leitura foi iniciado o período de imersão. Já na leitura seguinte, a terceira (aos 36 dias), é possível verificar uma queda brusca do potencial de corrosão, especialmente para as famílias mais porosas (L2

e L3) que absorvem mais água. Isso evidencia a elevada atividade como eletrólito dos cloretos.

Nas últimas leituras observa-se que a média dos potenciais da família L3 teve um aumento do seu potencial, indo para valores menos eletronegativos. A princípio, pode-se atribuir este comportamento à heterogeneidade de retenção de umidade de algumas placas nesse período.

Mesmo com esse aumento de potencial, em média, a família L3 continua com uma probabilidade de ocorrência de corrosão de mais de 95%. Contudo, vale salientar que parte das placas já se encontra na zona de incerteza.

### ***6.5.2. Resistividade elétrica***

De forma análoga ao ensaio de medição de potencial de corrosão, realizou-se um acompanhamento do comportamento da resistividade superficial elétrica do concreto das placas. Os gráficos 25 a 37 mostram esses resultados.

O critério de avaliação da probabilidade de corrosão utilizado foi o proposto pelo CEB 192-(1989). Aproveitou-se também para colocar a indicação da taxa de corrosão indicada no manual do próprio equipamento<sup>13</sup>, conforme tabela 26.

Tabela 26-Critérios de avaliação para a resistividade.

Resistividade (KΩ.cm)	Risco de corrosão	Taxa de corrosão
CEB-192		
> 20	Desprezível	Baixa taxa de corrosão
10 a 20	Baixo	De baixa a moderada taxa
5 a 10	Alto	Alta
< 5	Muito Alto	Muito alta

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Cunha (2014)

<sup>13</sup> Manual de operação do resipod-Proceq (2013)

Gráfico 25- Resistividade elétrica das placas com bitola 6.3-Família R

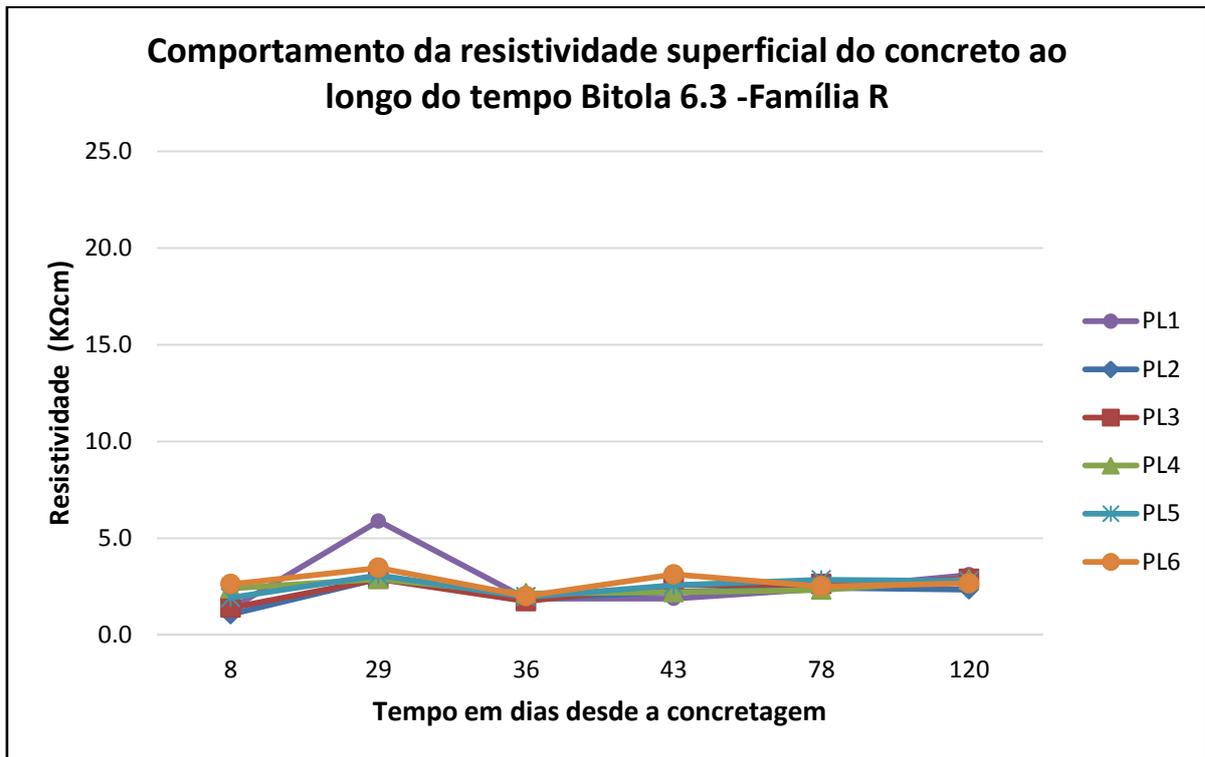


Gráfico 26- Resistividade elétrica das placas com bitola 8.0-Família R

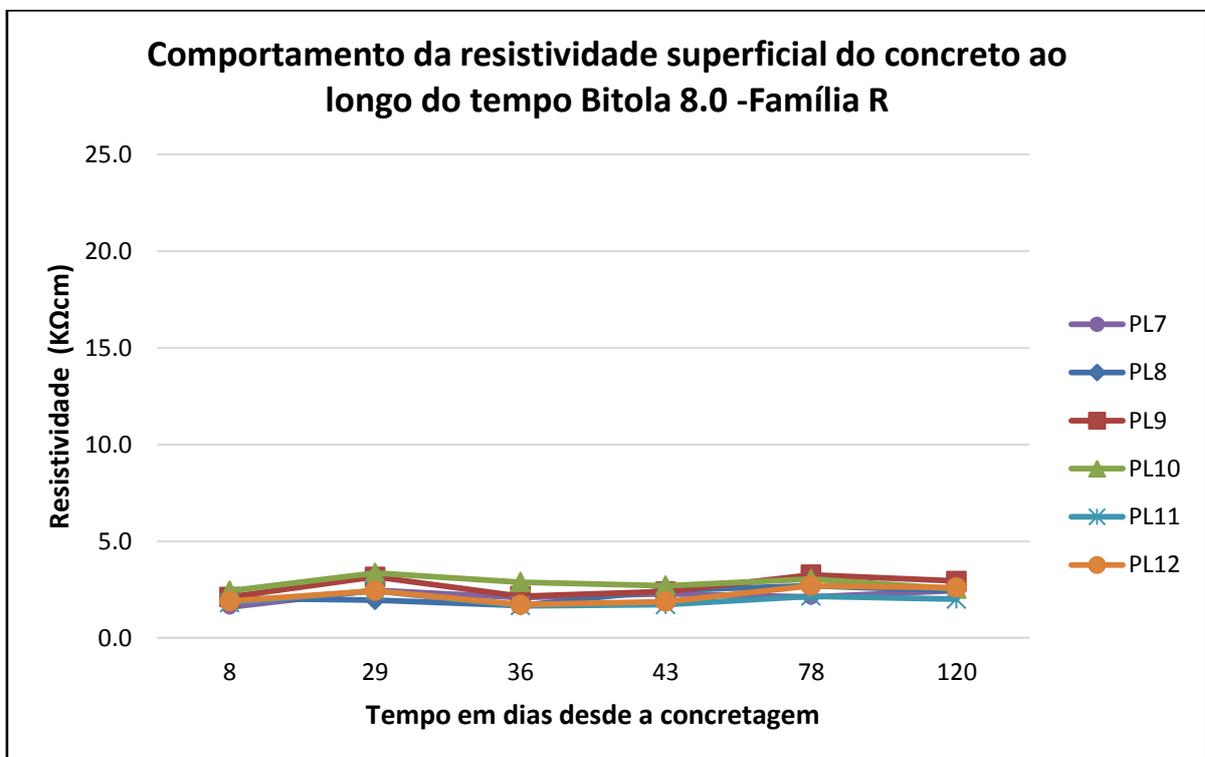


Gráfico 27- Resistividade elétrica das placas com bitola 10.0-Família R

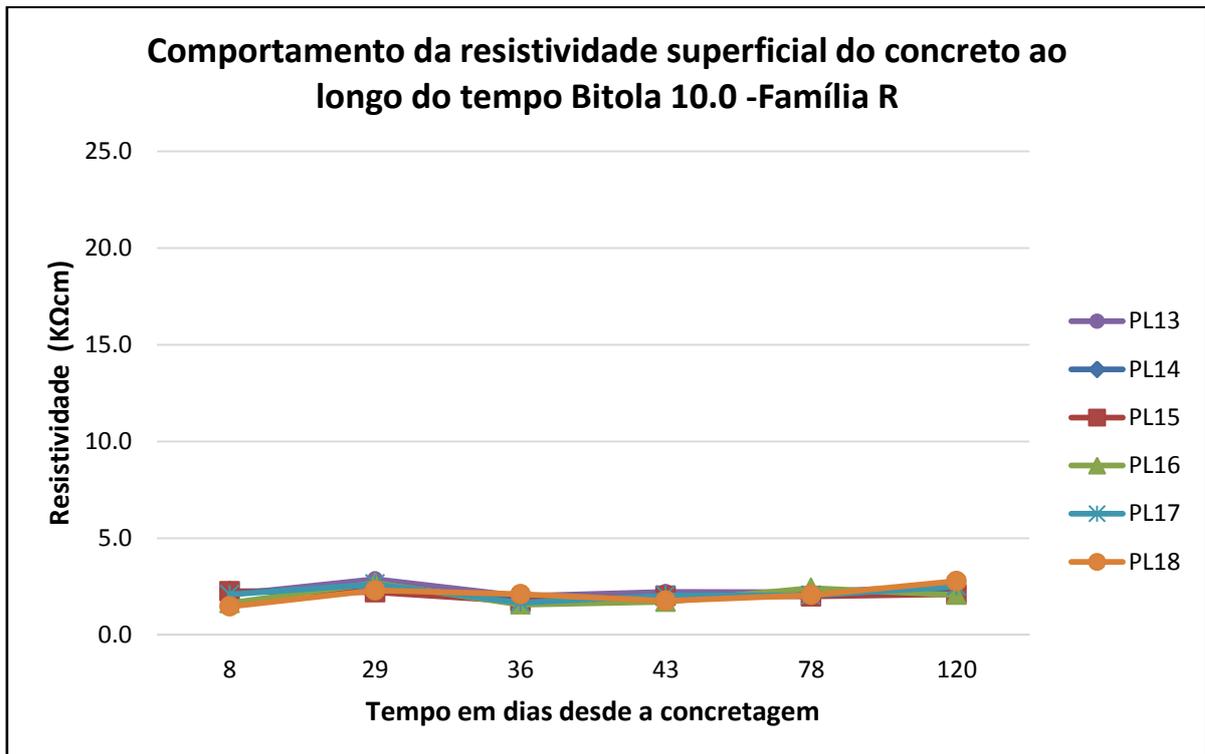


Gráfico 28- Resistividade elétrica das placas com bitola 6.3-Família L1

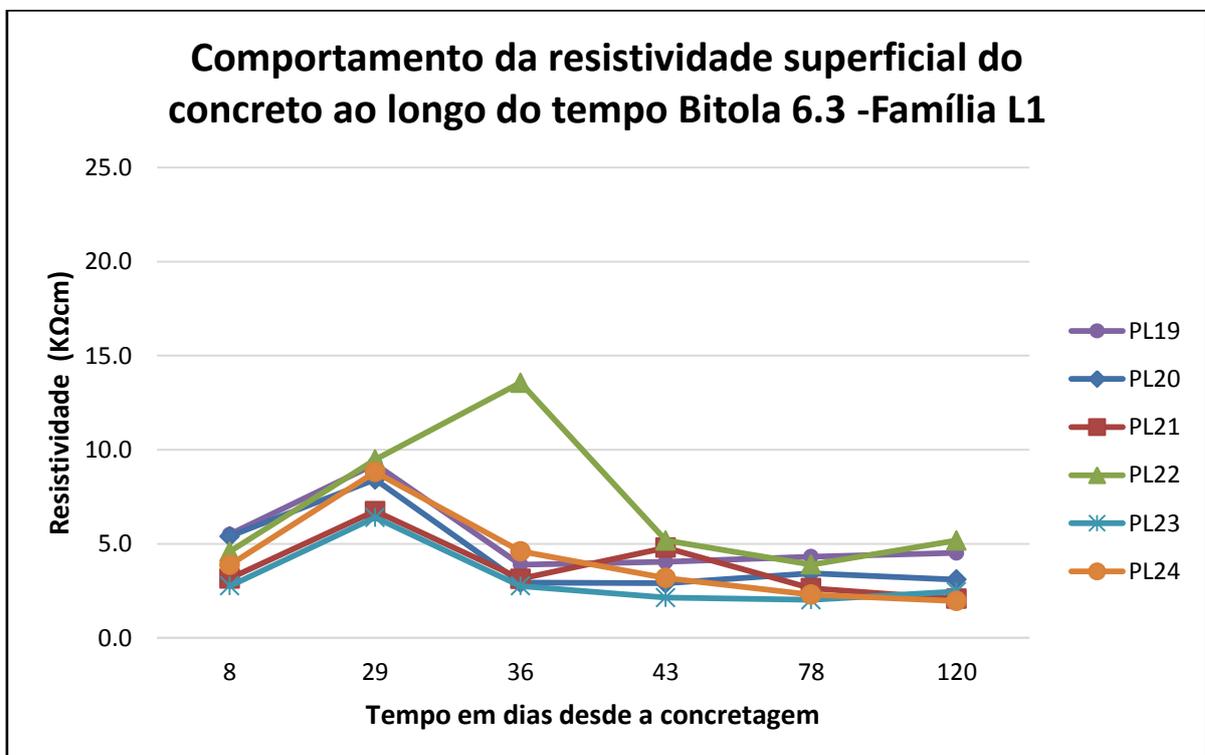


Gráfico 29- Resistividade elétrica das placas com bitola 8.0-Família L1

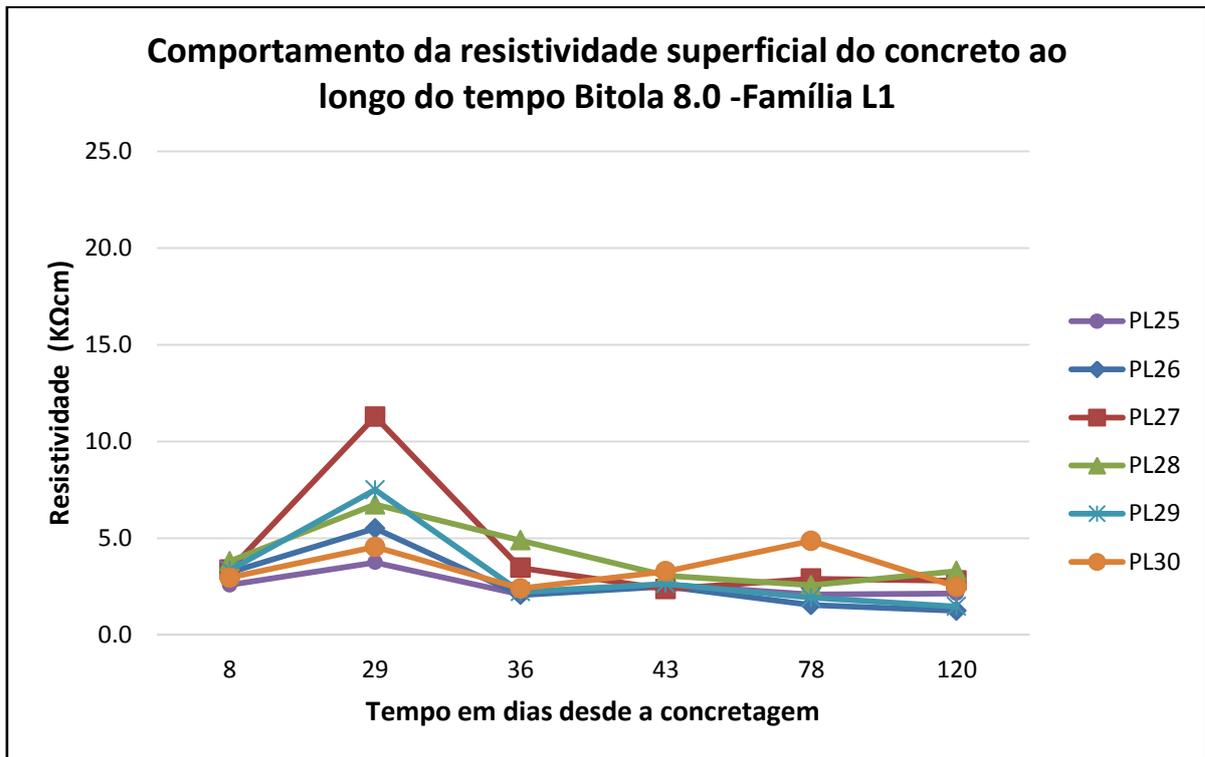


Gráfico 30- Resistividade elétrica das placas com bitola 10.0-Família L1

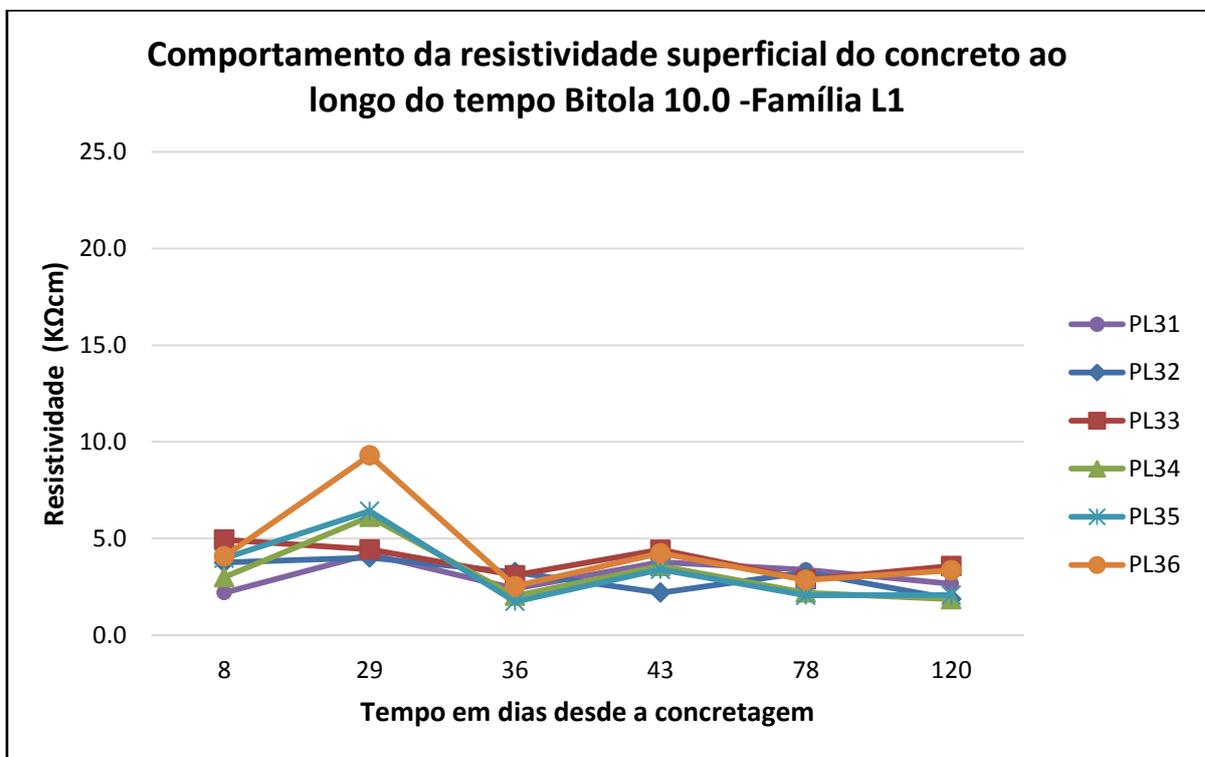


Gráfico 31- Resistividade elétrica das placas com bitola 6.3-Família L2

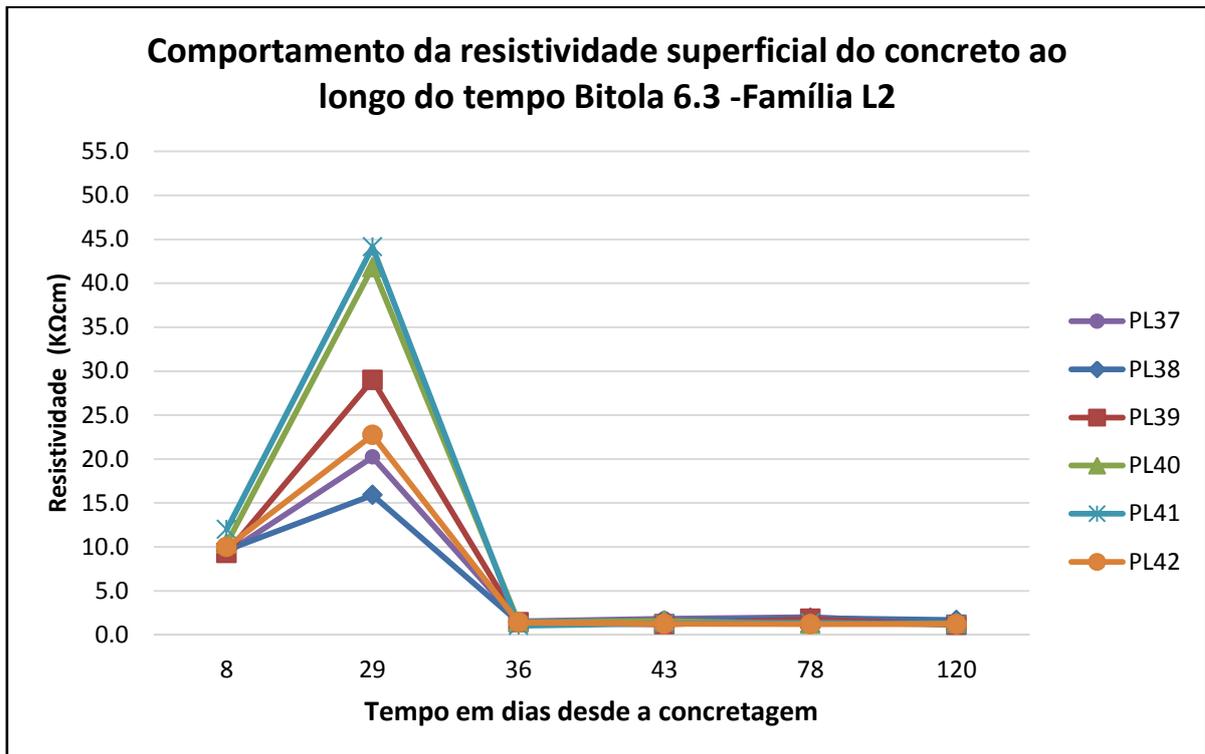


Gráfico 32- Resistividade elétrica das placas com bitola 8.0-Família L2

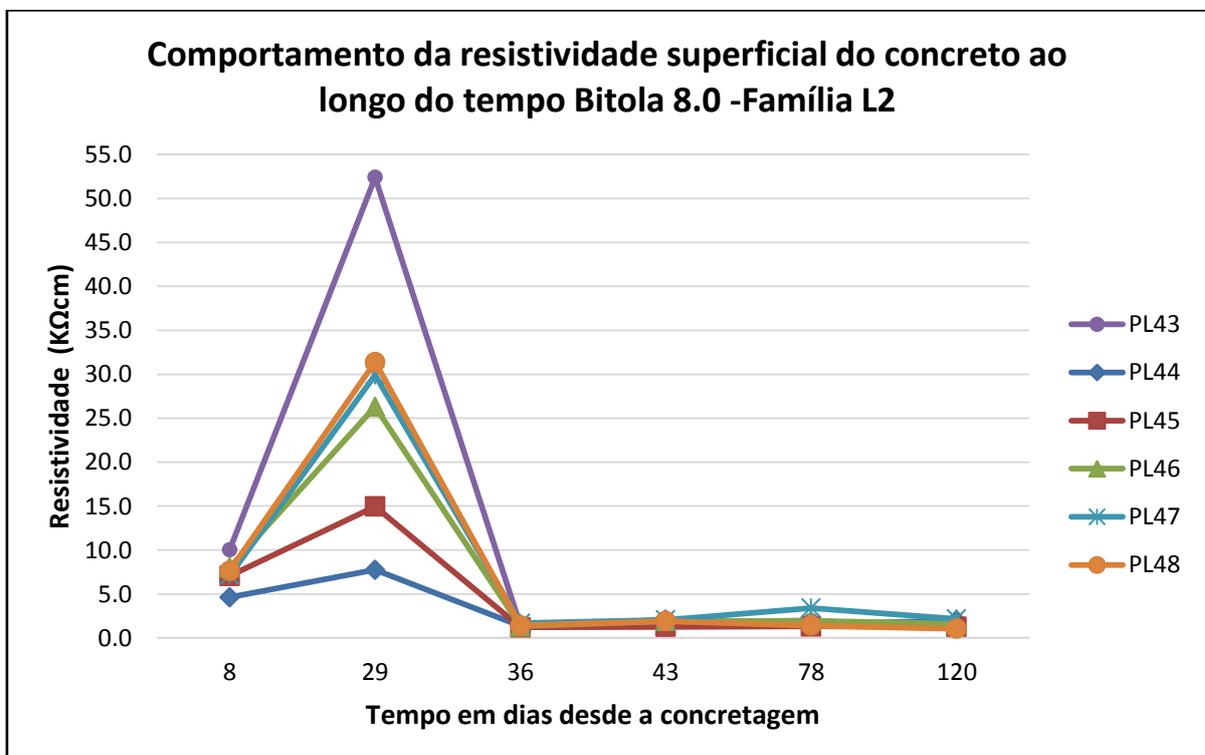




Gráfico 35- Resistividade elétrica das placas com bitola 8.0-Família L3

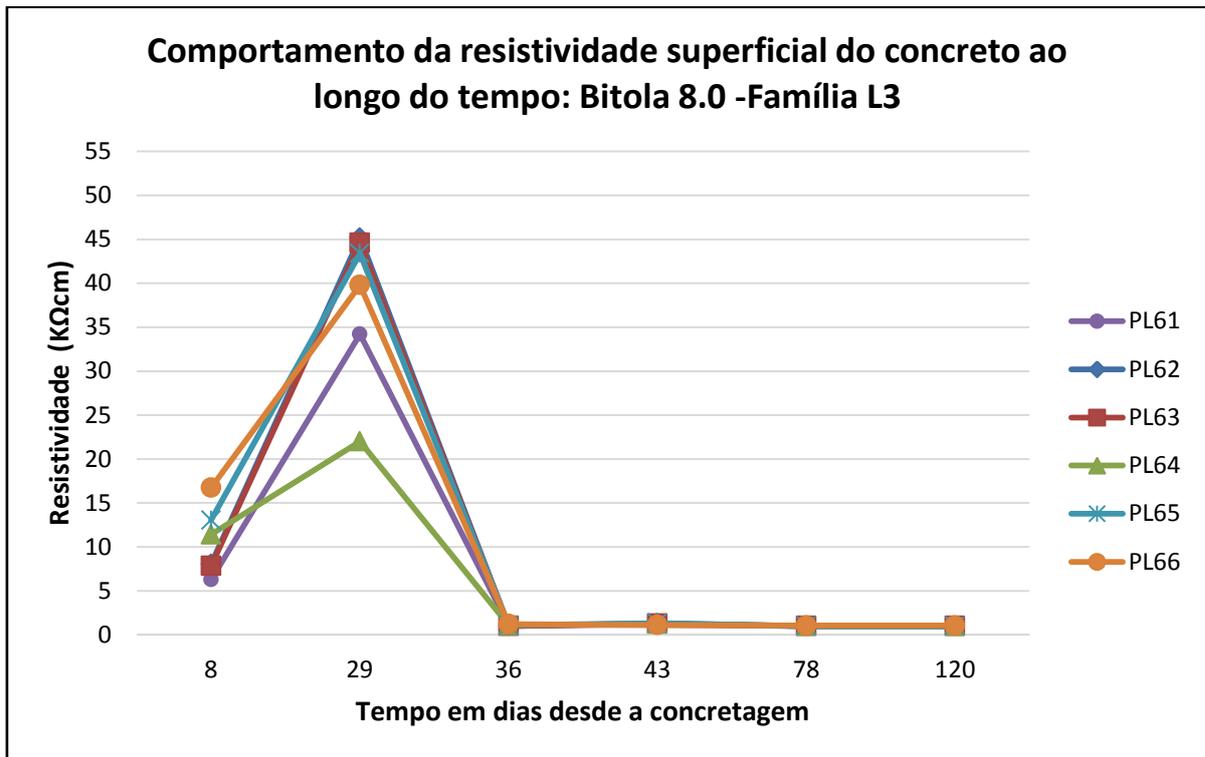


Gráfico 36- Resistividade elétrica das placas com bitola 10.0-Família L3

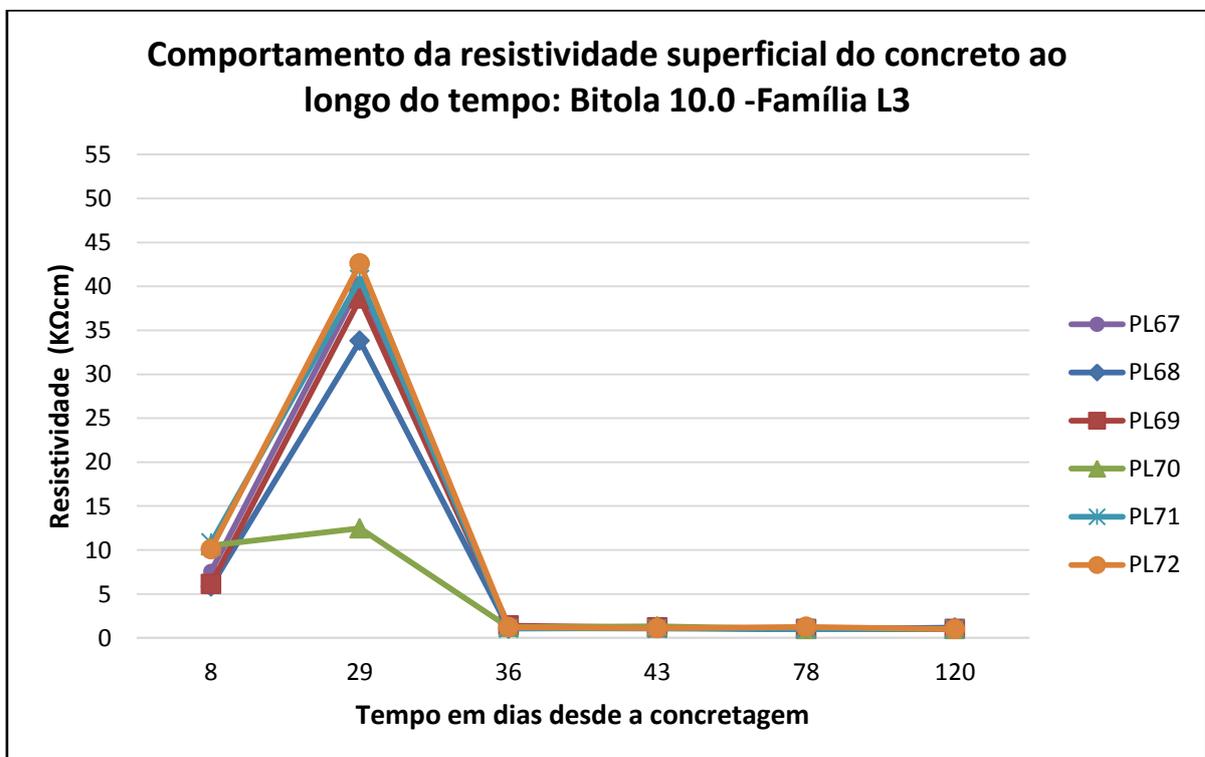
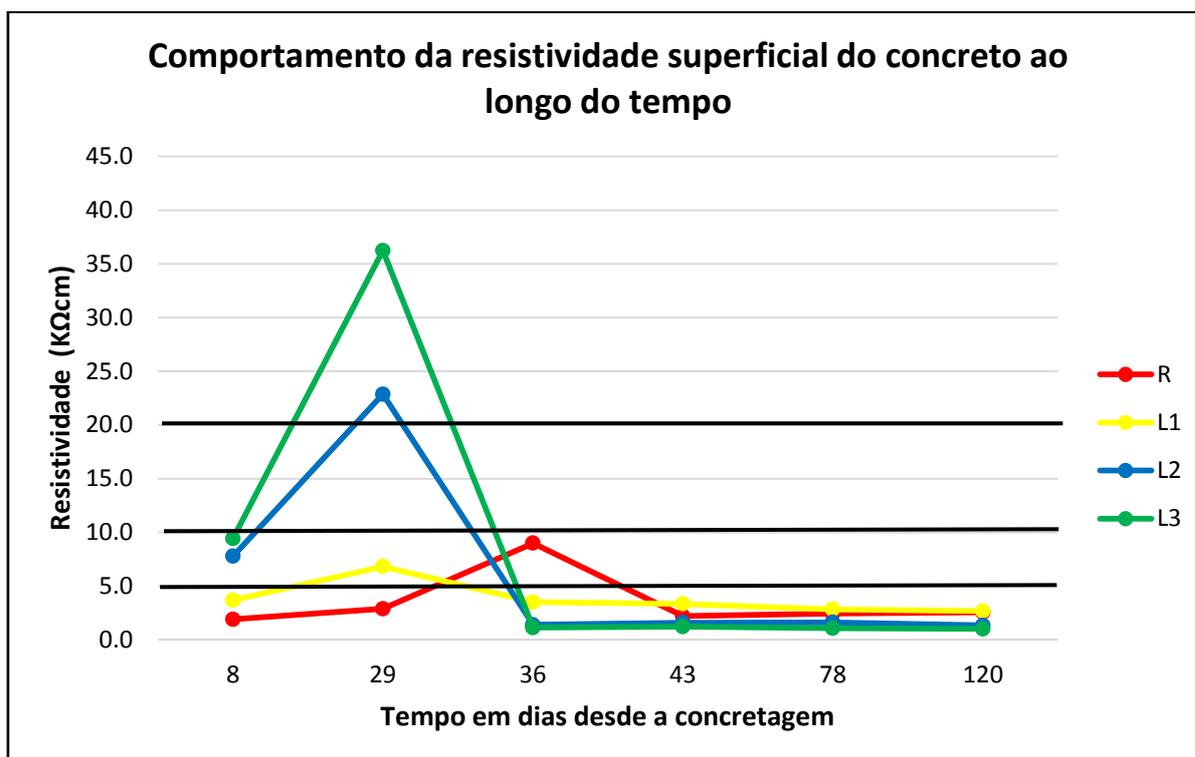


Gráfico 37- Resistividade elétrica média das famílias.



Com relação à resistividade das placas ao longo do período de estudo, observa-se inicialmente valores mais elevados para as famílias L2 e L3. Com um período maior de “descanso” em local seco e protegido de chuva e sol, observa-se uma elevação da resistividade, sobretudo mais sensivelmente para as famílias com maiores teores de ar incorporado (possivelmente sendo capazes de perder a umidade retida mais facilmente).

Após o início das imersões há uma queda brusca da resistividade, ficando até o final do período de estudo em torno de valores de 1 a 2 KΩcm, indicando elevada atividade/taxa de corrosão, segundo critério adotado.

Esse comportamento pode ser explicado possivelmente por dois motivos. A presença constante dos íons cloreto (forte eletrólito, facilitando a movimentação iônica) e a possível retenção de umidade dentro das placas, tendo em vista que foram colocadas para secar ao ar em períodos de 4 dias.

No tocante à resistividade elétrica da superfície das placas, todas as famílias tiveram o mesmo comportamento.

## 6.6. Monitoramento físico

### 6.6.1. Inspeção visual

No que diz respeito ao aspecto visual externo das placas perante a corrosão de armaduras, alguns comentários de ordem quantitativa e qualitativa podem ser feitos.

- Quantitativamente se tem:

Tabela 27- Dados quantitativos sobre a inspeção visual.

Requisito	R	L1	L2	L3	Total	Percentual do total
Com fissura	0	0	0	0	0	0%
Sem sintomas (manchas ou fiss.)	3	4	0	0	7	10%
Com manchas	15	14	18	18	65	90%
Mancha em apenas 1 face	13	10	6	6	35	49%
Mancha em 2 faces	2	4	12	12	30	42%
FACE A com manchas	13	9	16	15	53	74%
FACE B com manchas	4	8	14	15	41	57%
FACE lateral com manchas	0	2	0	0	2	3%

Gráfico 38-Percentual de placas e seus sintomas visuais externos.

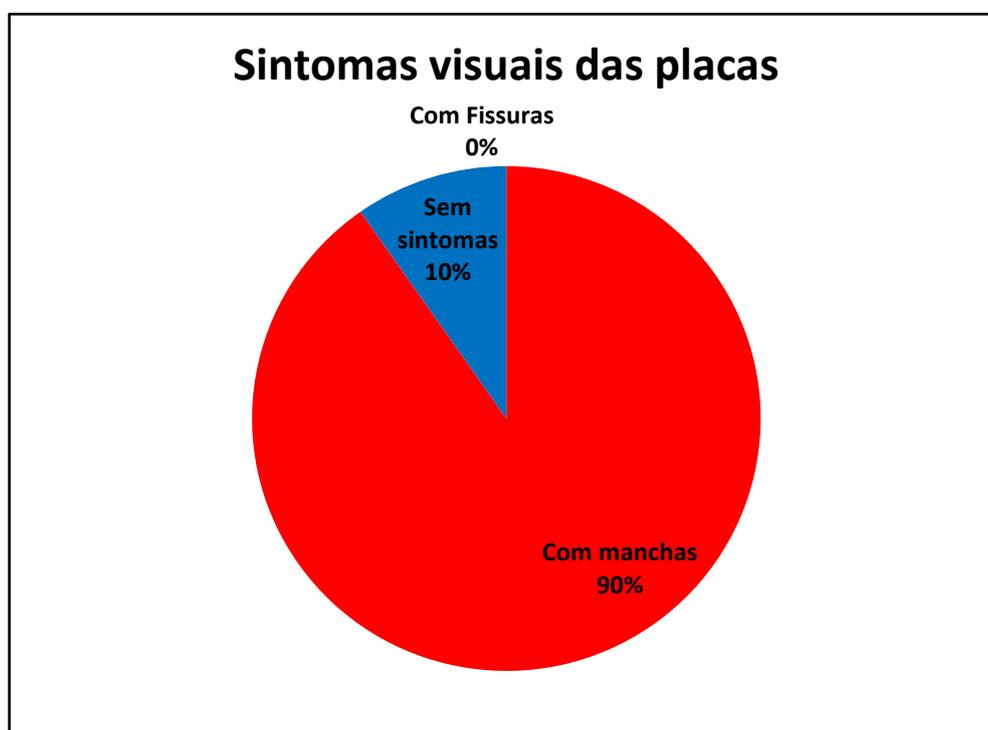


Gráfico 39-Quantidade de placas com mancha de cada família.

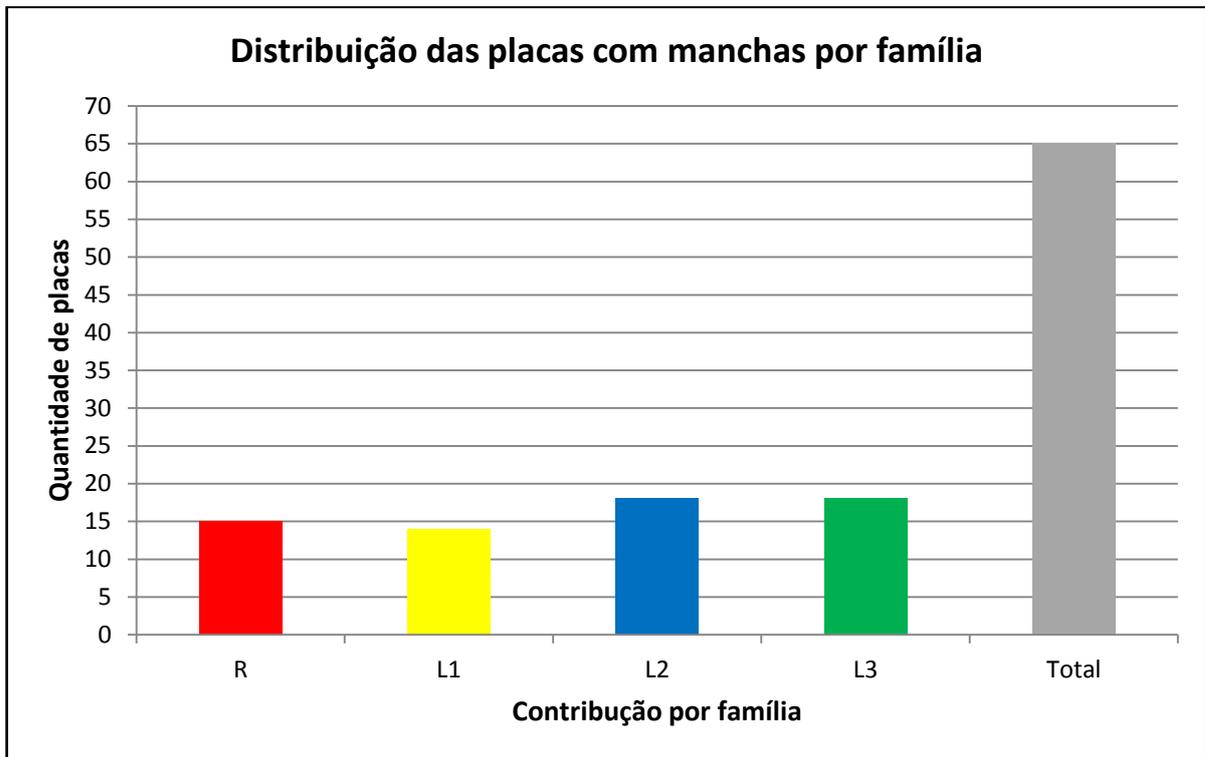


Gráfico 40-Percentual de placas classificadas com 1 ou 2 faces manchadas.



Gráfico 41-Estratificação dos dados do gráfico 40 por cada família.

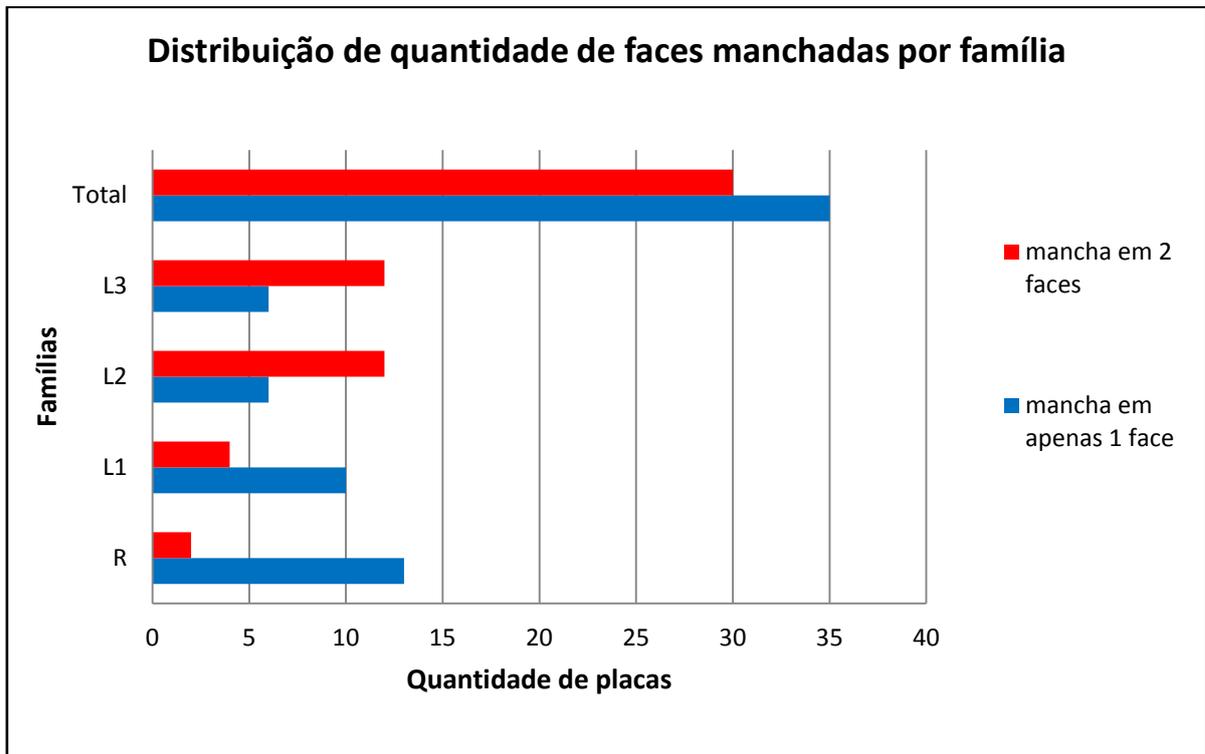


Gráfico 42- Frequência de ocorrência de manchas entre as faces A, B e lateral.

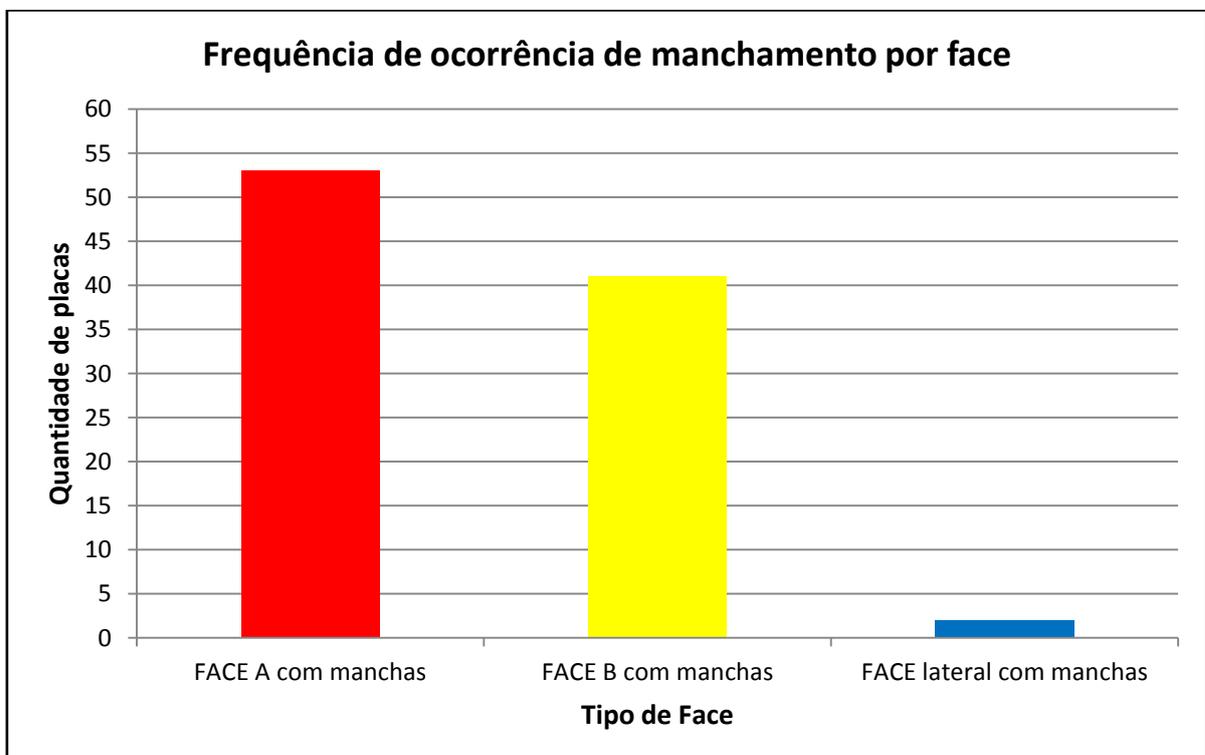
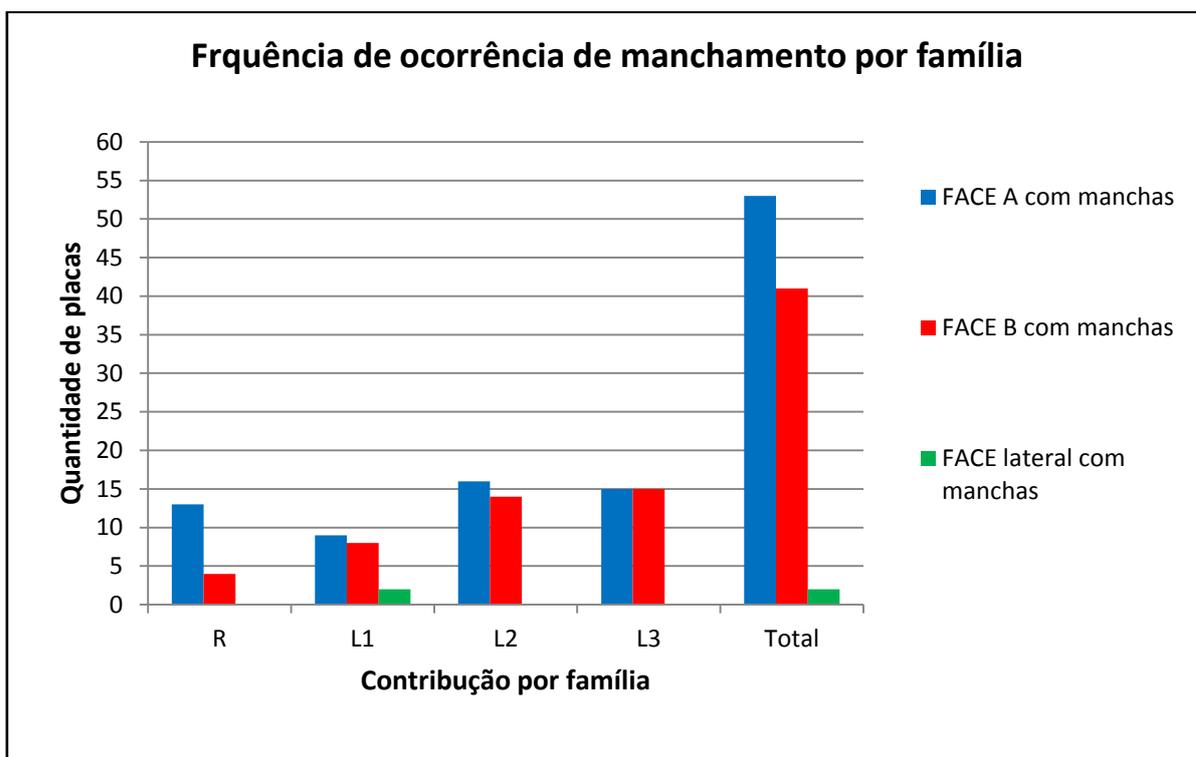


Gráfico 43-Estratificação dos dados do gráfico 42 por família.



Nessa avaliação visual quantitativa foi visto que 65 (90%) das 72 placas apresentaram manchas características de corrosão de armadura. Não foram verificadas fissuras nas barras e apenas 7 placas (10%) se mostraram assintomáticas (sem manchas e/ou fissuras).

Dessas 65 placas manchadas, a distribuição entre as famílias, conforme gráfico 39, se mostrou muito uniforme. Contudo, as famílias L2 e L3 mostraram uma quantidade maior (todas as 18 placas da família).

Outra análise também foi feita. Com relação à quantidade de faces manchadas. Nesse quesito, das 65 placas com manchas, 54% apresentaram manchas em apenas uma das faces, enquanto 46% em ambas (A e B). Esse percentual também foi estratificado para cada uma das famílias. Mais uma vez, as famílias L2 e L3 apresentaram uma quantidade maior de placas com as duas faces manchadas, em relação às outras duas famílias.

Por fim, ainda observou-se qual face apresentou maior ocorrência de manchas. De um total de 72 faces "A", 53 delas mostraram alguma mancha de corrosão, comparando com as 41 ocorrências da face "B".

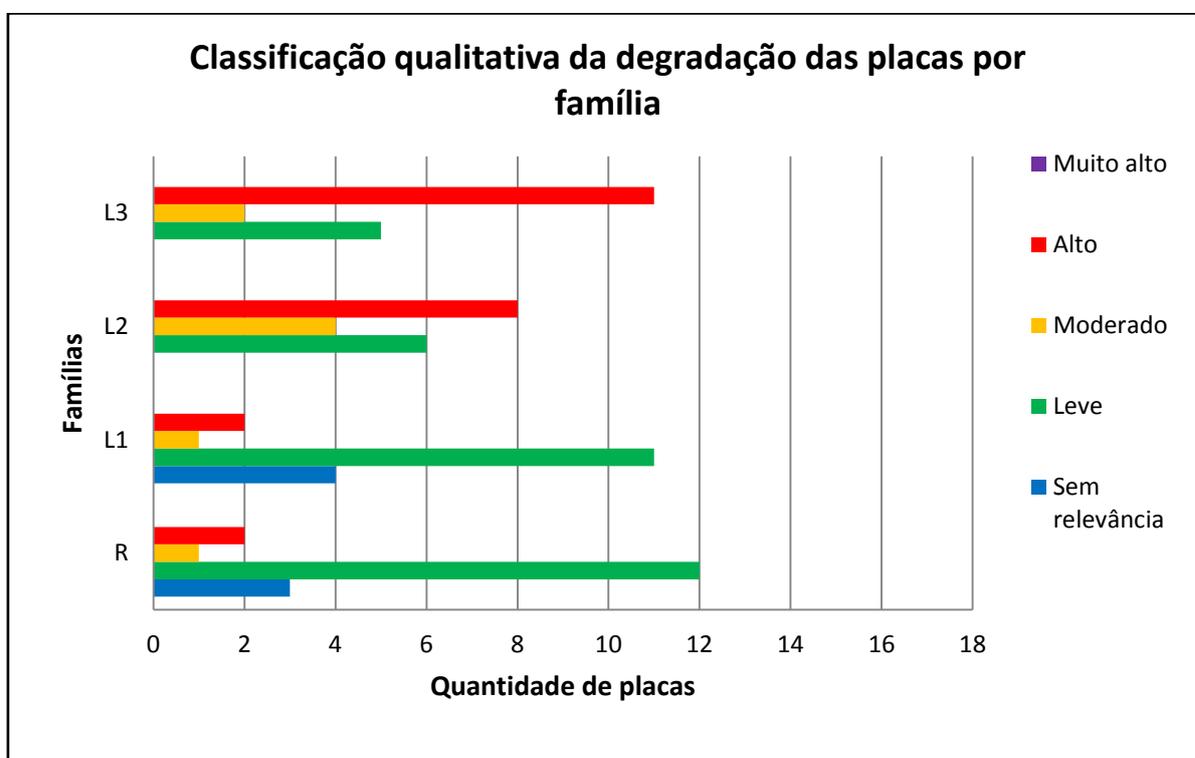
- Avaliação qualitativa

Utilizando o quadro de requisitos e critérios para realizar a avaliação qualitativa, levando em consideração a quantidade e intensidade das manchas, encontrou-se a seguinte classificação conforme tabela 28 e gráfico 44.

Tabela 28-Quantidade de placas por família, de acordo com sua classificação de deterioração.

Classificação	Família R	Família L1	Família L2	Família L3
Sem relevância	3	4	0	0
Leve	12	11	6	5
Moderado	1	1	4	2
Alto	2	2	8	11
Muito alto	0	0	0	0

Gráfico 44-Classificação qualitativa do nível de degradação visual das placas.



Das 18 placas de cada família, o grupo R apresentou 67% das placas classificadas como grau leve e mais duas placas sem relevância. Já a segunda “melhor” família (L1), no sentido de menos degradada visualmente, apresentou apenas duas placas classificadas como um grau alto de degradação.

As duas famílias que se apresentaram mais degradadas visualmente, conforme classificação proposta foi a L2 e L3, apresentando 44 e 61% de placas classificadas como alto nível de degradação, respectivamente.

### ***6.6.2. Perda de massa das barras***

Os percentuais de perda de massa do total de aço contido em cada placa, bem como o total de cada família, estão expressos nos gráficos 45 a 57.

Gráfico 45-Perda de massa total de aço por placa: 6.3 – Família R.

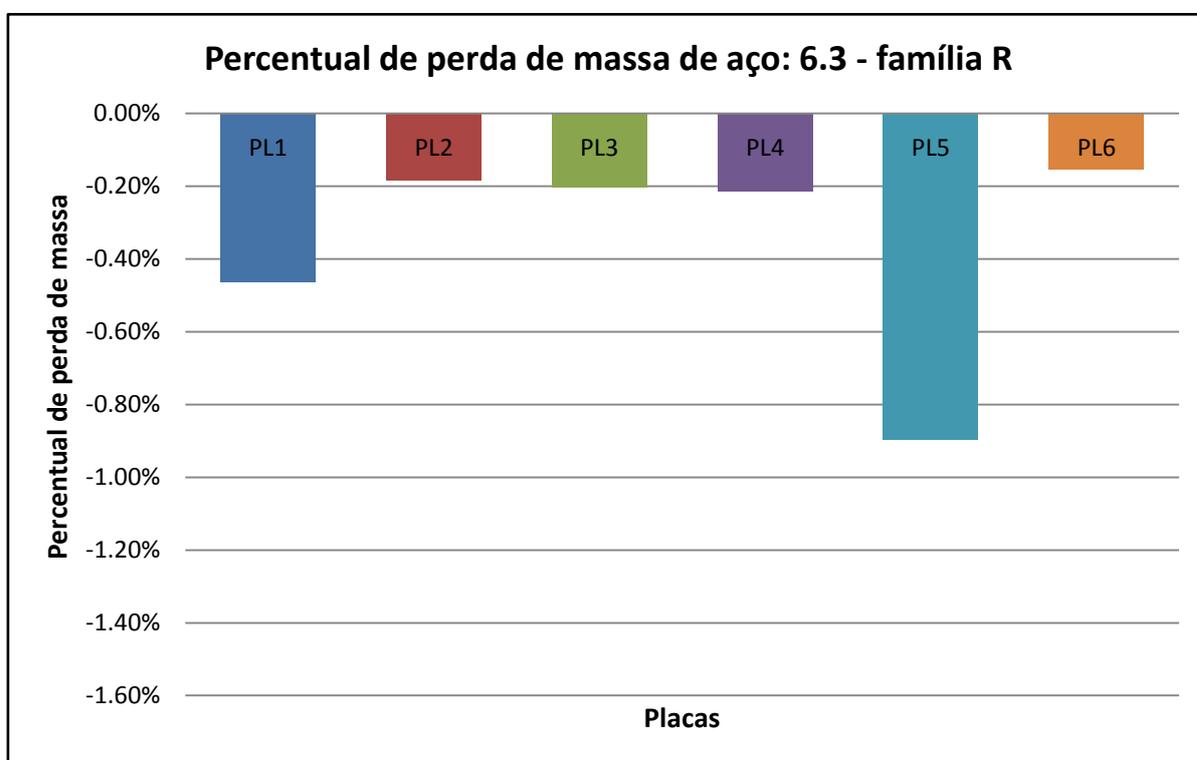


Gráfico 46- Perda de massa total de aço por placa: 8.0 – Família R.

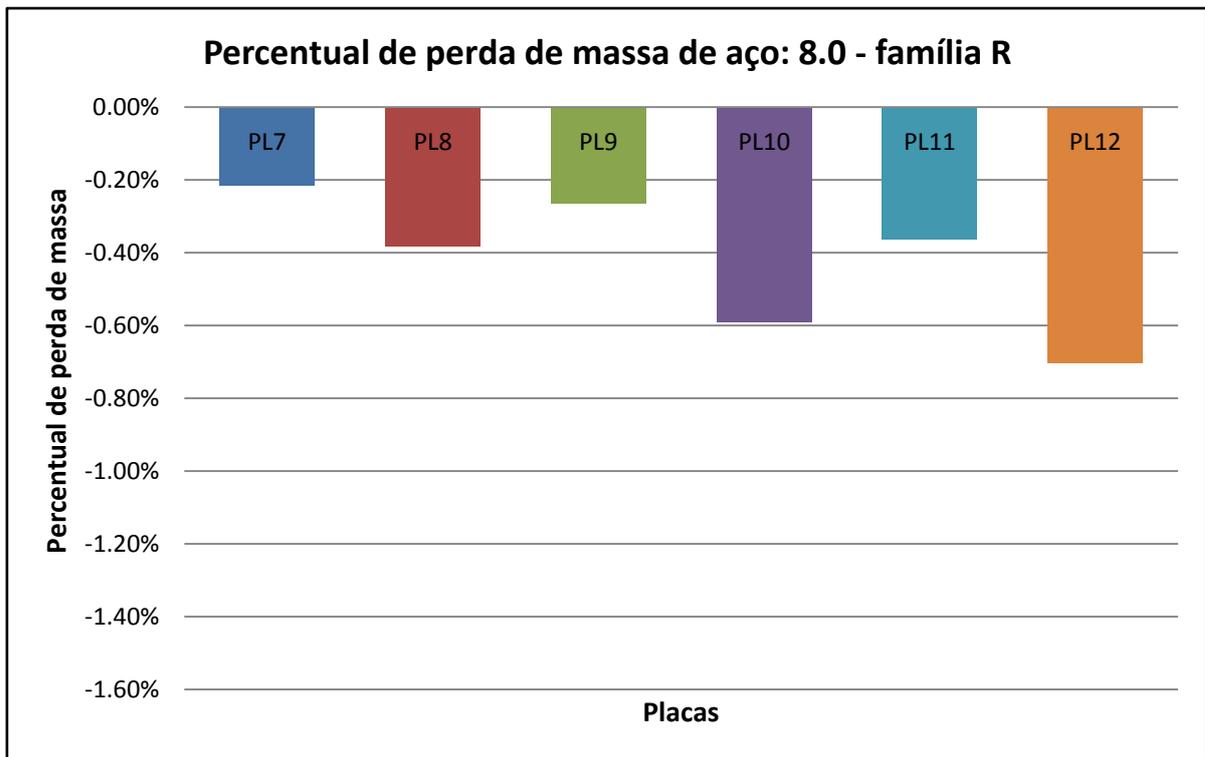


Gráfico 47- Perda de massa total de aço por placa: 10.0 – Família R.

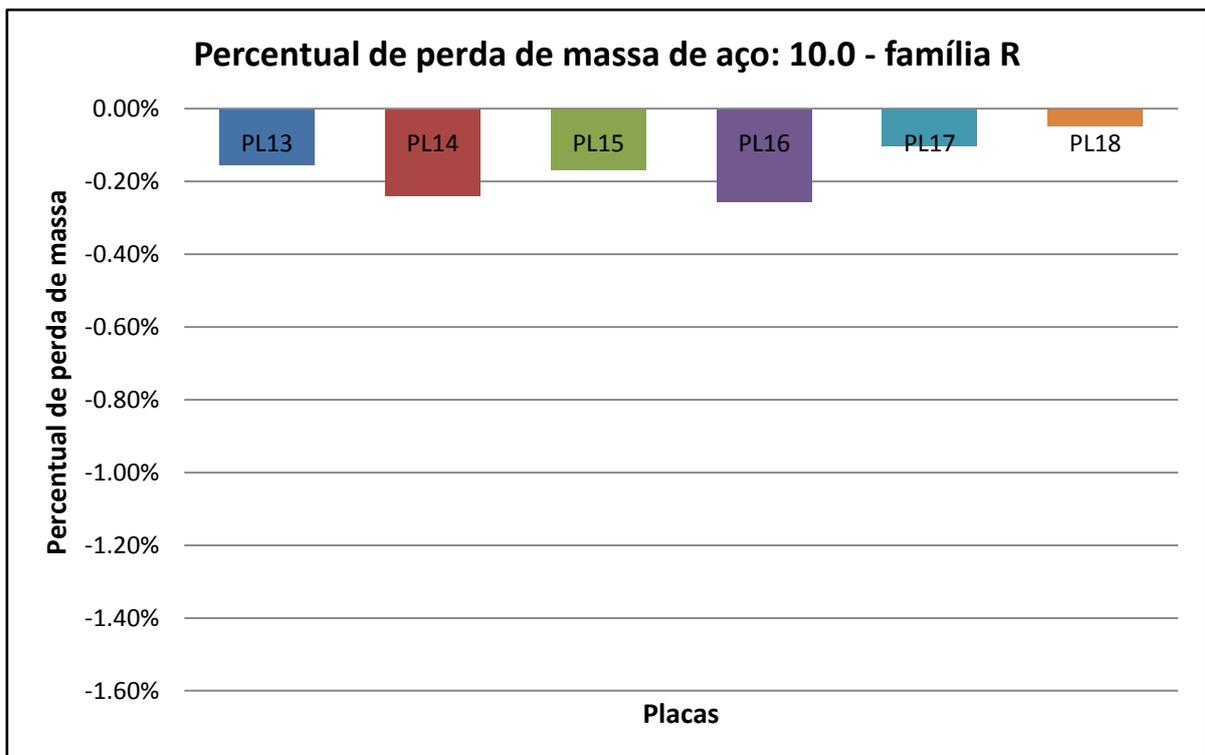


Gráfico 48- Perda de massa total de aço por placa: 6.3 – Família L1.

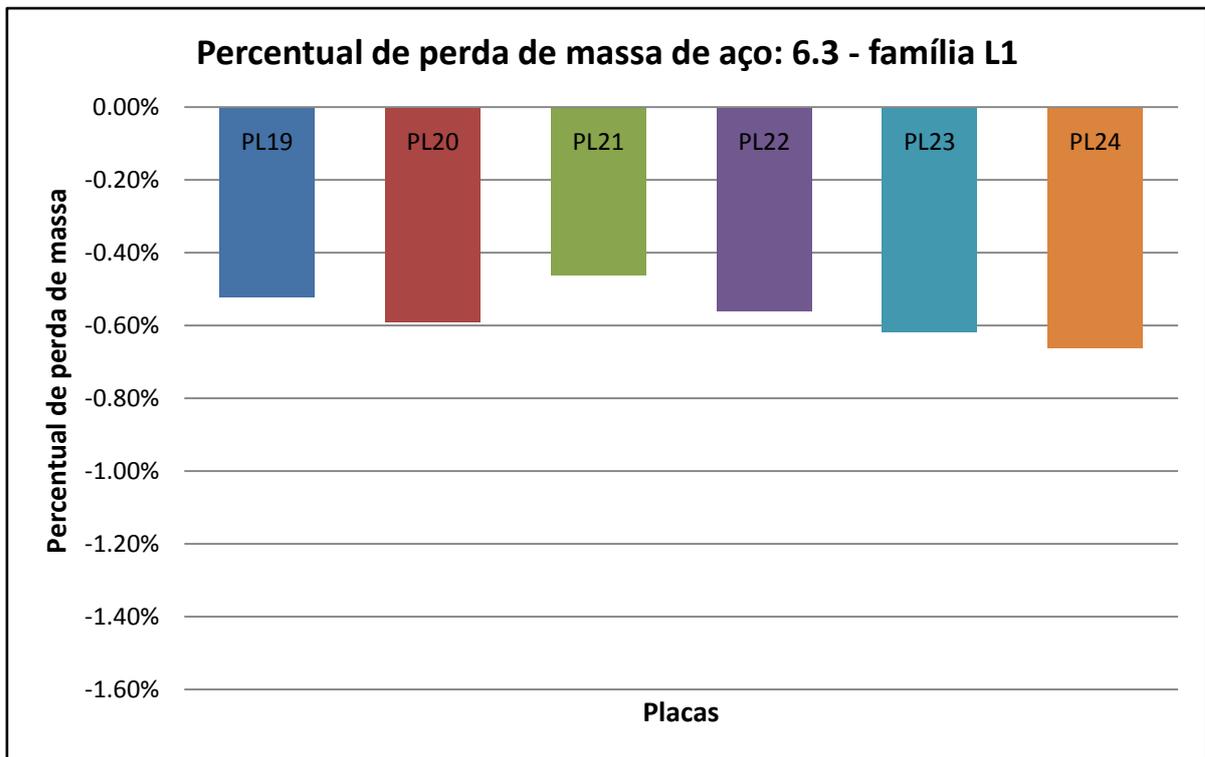


Gráfico 49- Perda de massa total de aço por placa: 8.0 – Família L1.

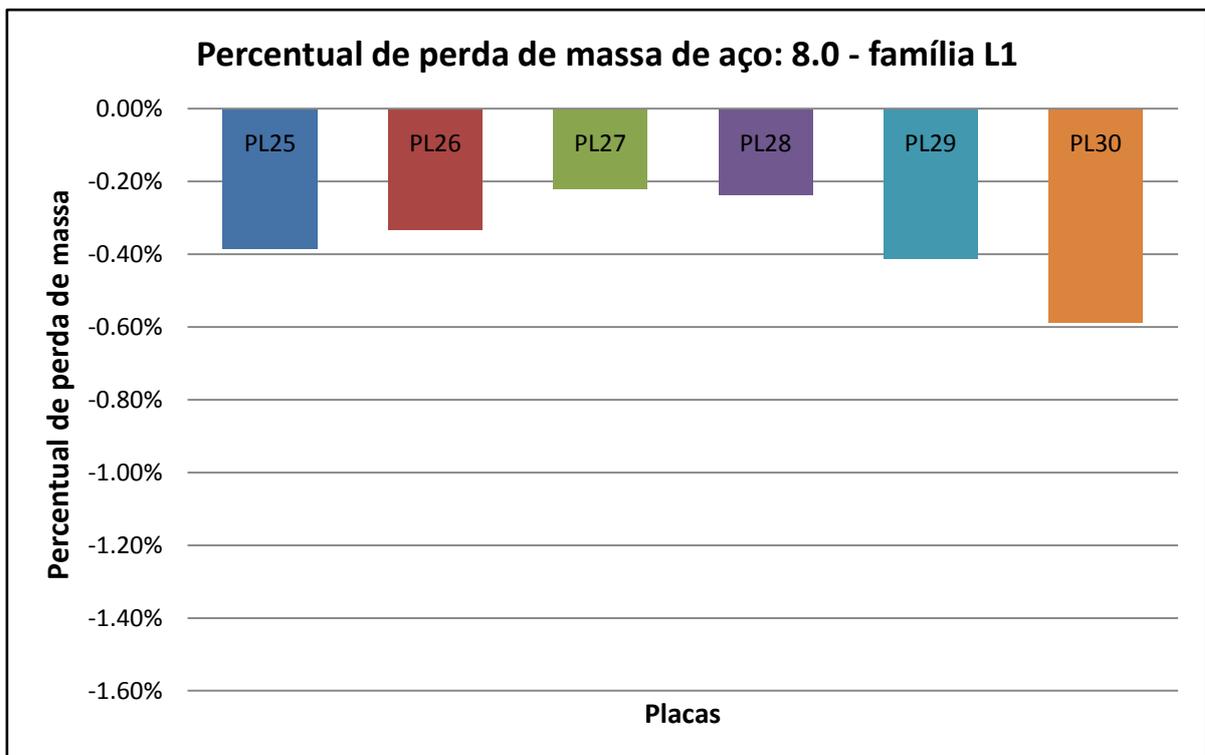


Gráfico 50- Perda de massa total de aço por placa: 10.0 – Família L1.

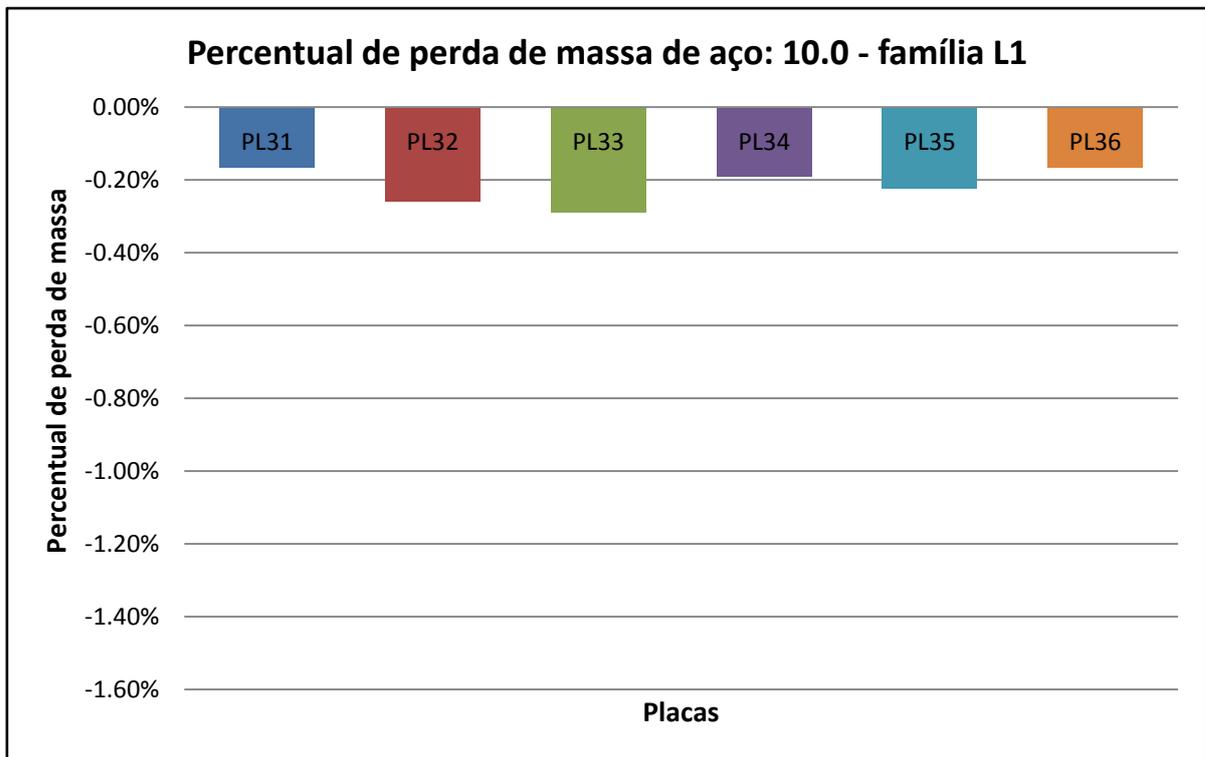


Gráfico 51- Perda de massa total de aço por placa: 6.3 – Família L2.

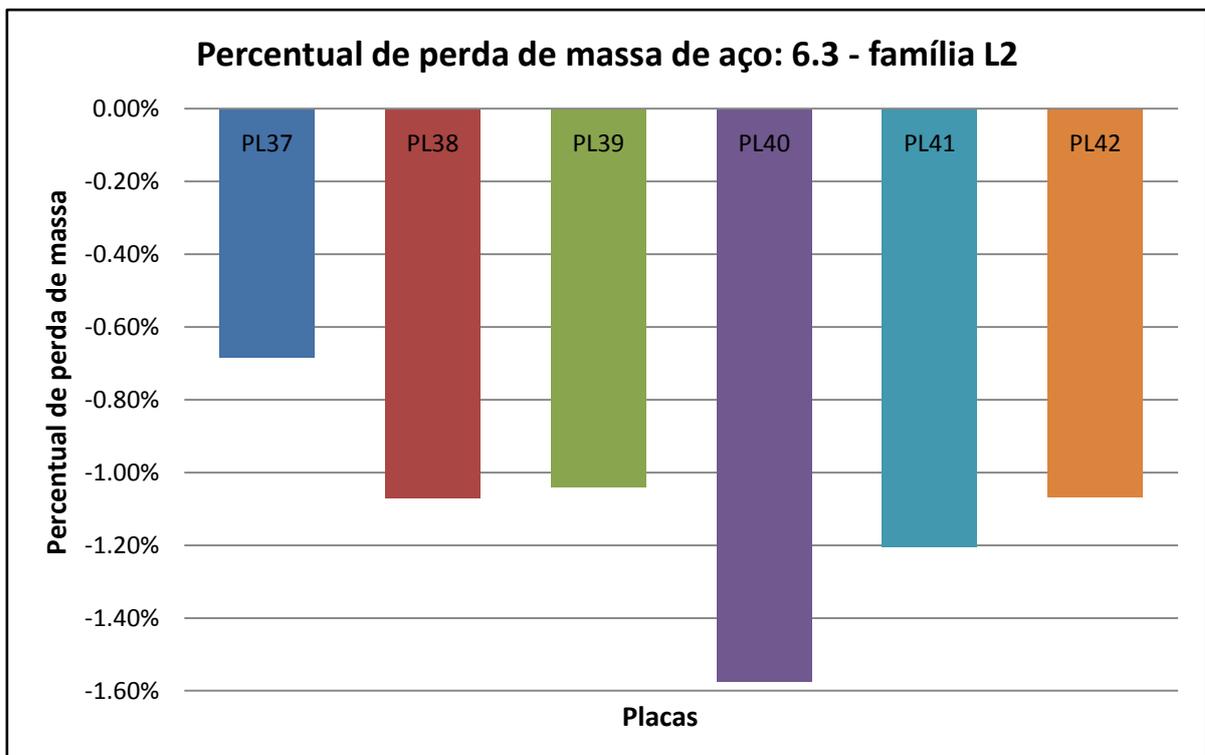


Gráfico 52- Perda de massa total de aço por placa: 8.0- Família L2.

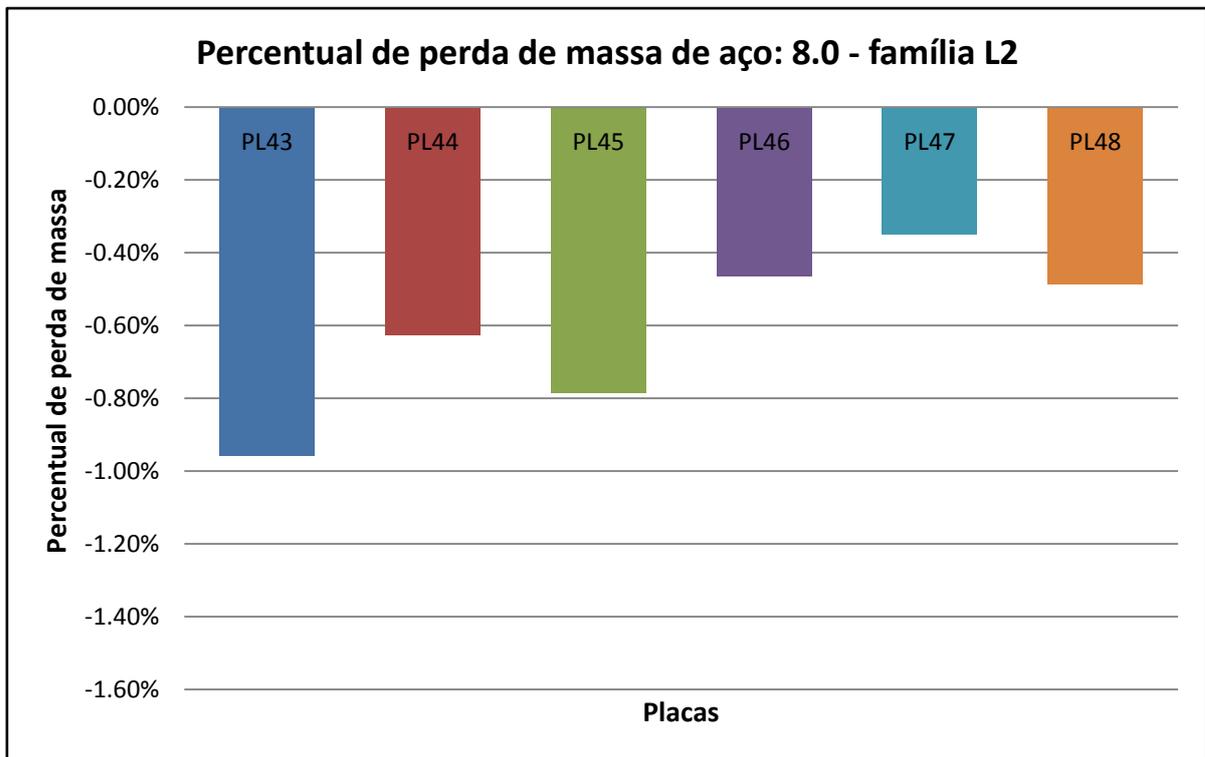


Gráfico 53- Perda de massa total de aço por placa: 10.0 - Família L2.

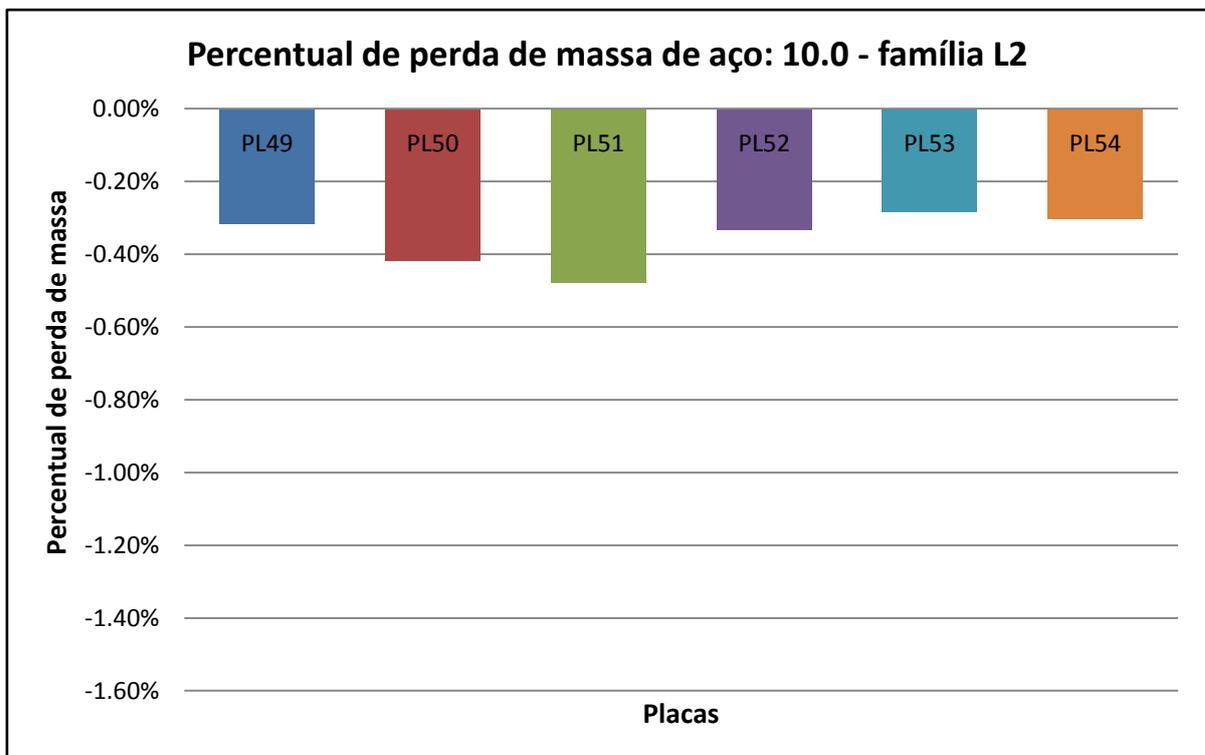


Gráfico 54- Perda de massa total de aço por placa: 6.3 – Família L3.

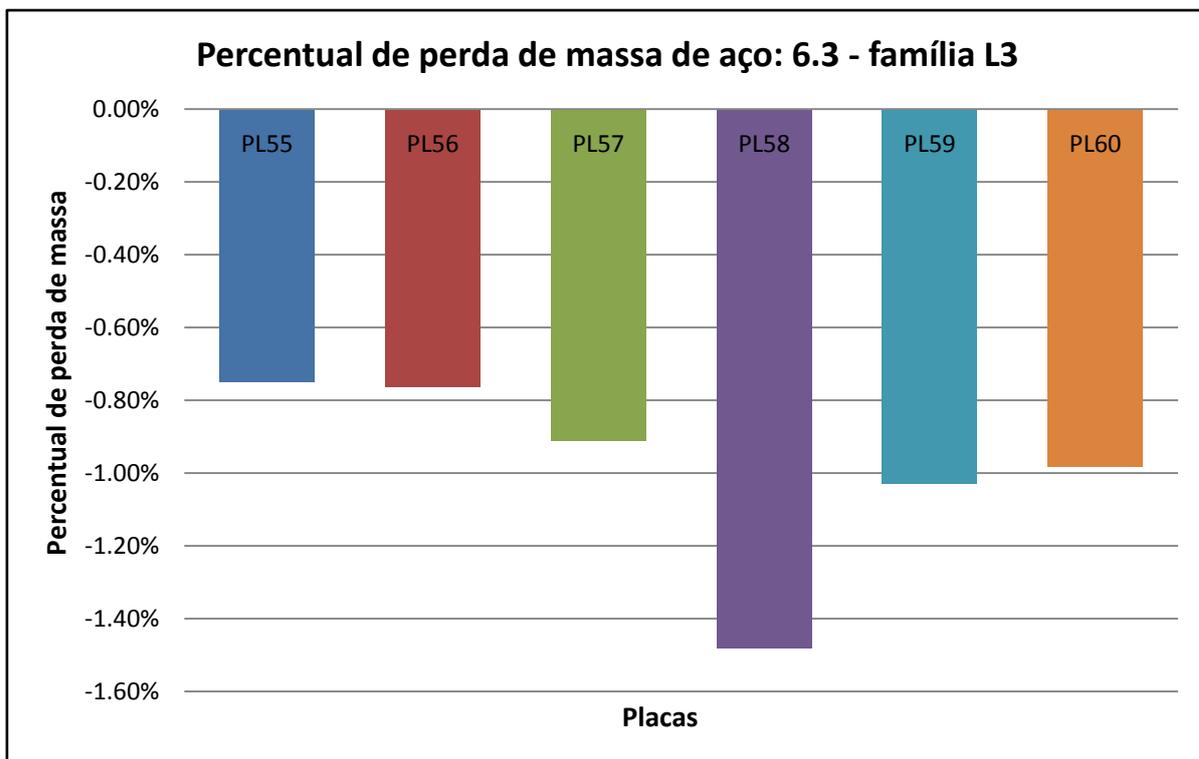


Gráfico 55- Perda de massa total de aço por placa: 8.0 – Família L3.

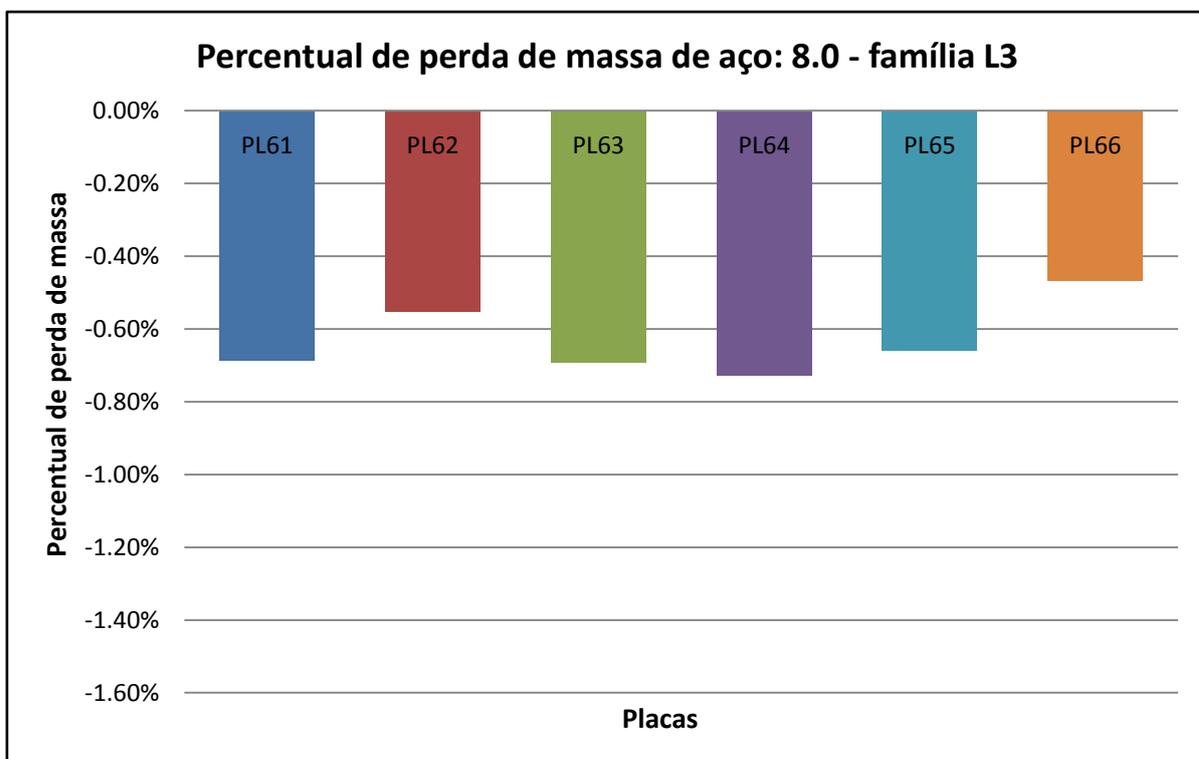
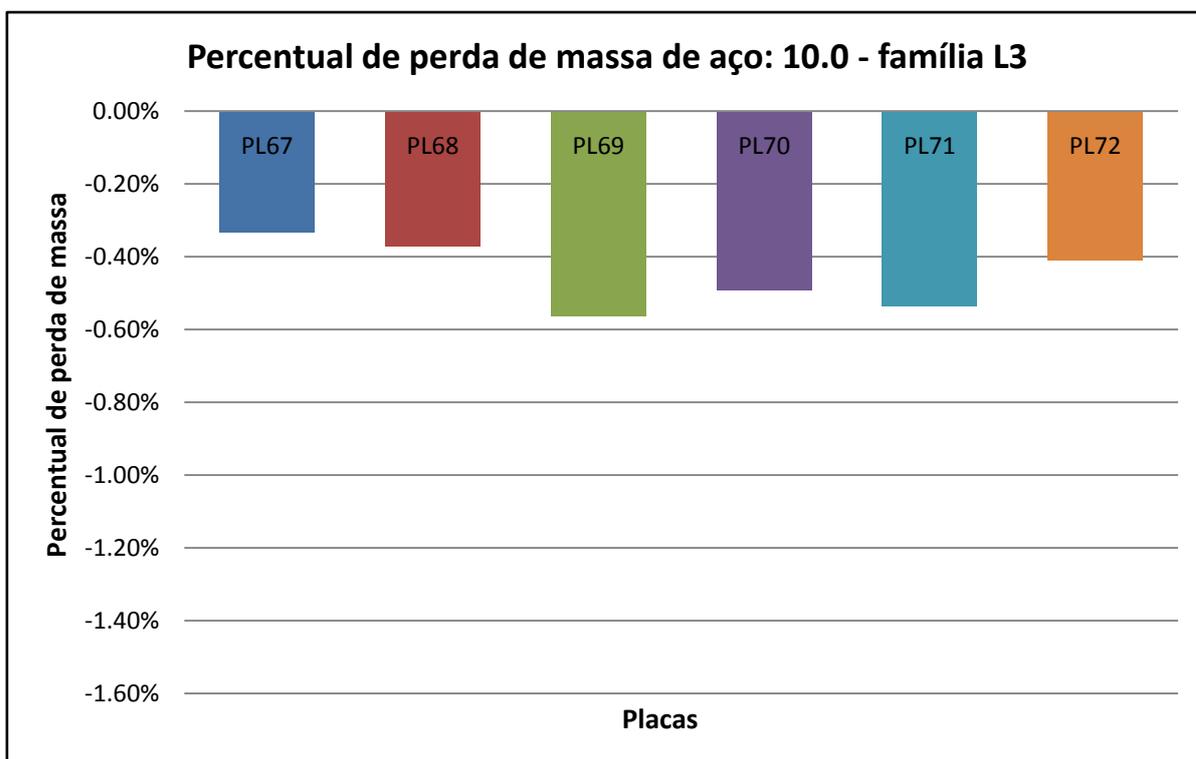


Gráfico 56- Perda de massa total de aço por placa: 10.0 – Família L3.

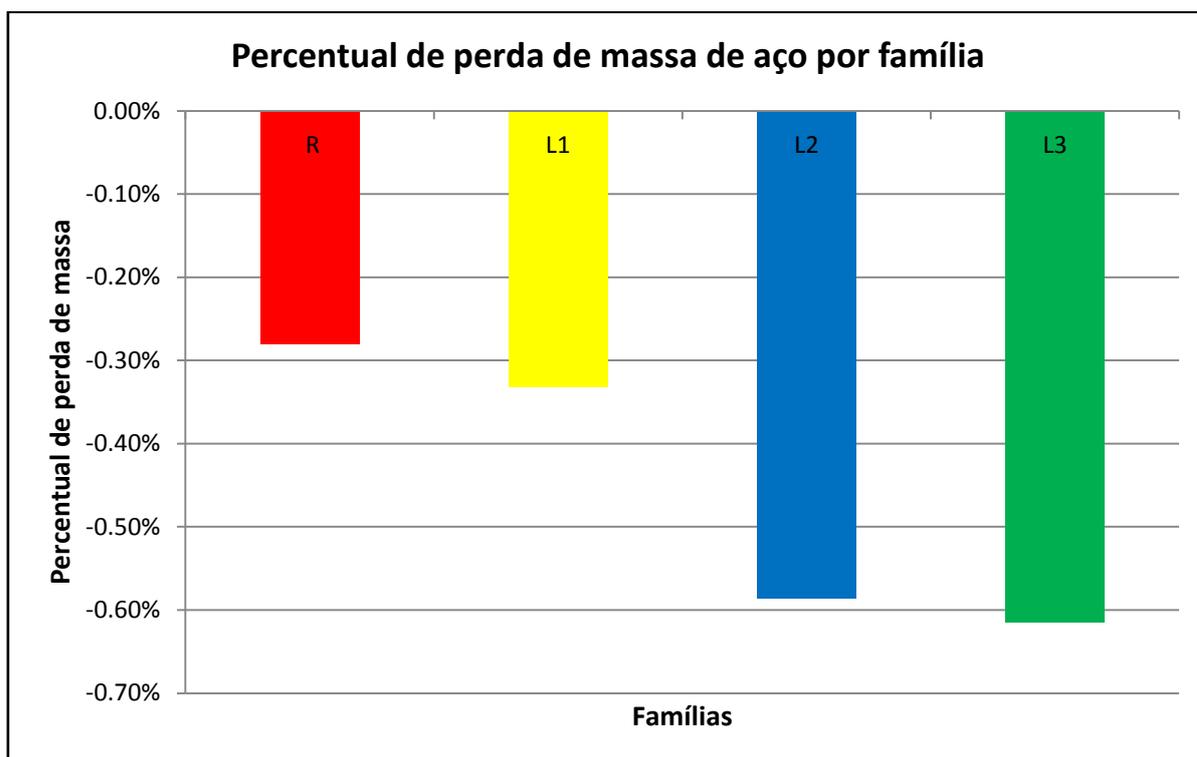


Na tabela 29 estão os valores que exprimem o total de massa de aço perdido em cada uma das famílias. O gráfico 57 mostra essa relação de forma mais ilustrativa.

Tabela 29- Perda de massa de aço total de cada família.

FAMÍLIA	PERDA DE MASSA TOTAL (g)	PERCENTUAL DE PERDA
R	-28.88	-0.28%
L1	-34.31	-0.33%
L2	-60.72	-0.59%
L3	-63.51	-0.61%

Gráfico 57-Percentual de perda total de massa de aço por família.



De forma coerente com os resultados dos outros ensaios, a perda de massa de aço total por família seguiu uma sequência, conforme gráfico 57. As famílias L2 e L3 além de demonstrarem valores mais negativos de potencial de corrosão, bem como classificação visual mais degradada (quantitativa e qualitativamente), também mostraram uma maior perda de massa de aço (valores absolutos e percentuais).

Um fato importante a ser comentado é o baixo percentual de perda de massa. Nas placas esse percentual chegou próximo a 1,6% em alguns casos, enquanto que nas famílias um pouco mais de 0,6%. Provavelmente um período um pouco maior de exposição das placas no banho de sal, traria valores maiores de percentual de perda de massa.

Analisando os gráficos que mostram as perdas por grupos de bitola, observa-se que o percentual de perda diminui com o aumento da bitola da barra. Ou seja, as barras de bitola mais finas são mais sensíveis às perdas de massa, “sofrem” mais.

Com relação à placa como um todo, na tabela 30, estão expressas as placas que mais perderam massa de aço em valores absolutos.

Tabela 30-Placas que mais perderam massa absoluta por família.

Família	Placa	Bitola (mm)	Perda de massa (g)	Perda percentual (%)
R	12	8.0	3,71	0,70
L1	30	8.0	3,13	0,59
L2	40	6.3	5,45	1,57
L3	58	6.3	5,16	1,48

Em valores absolutos as placas que mais perderam massa de aço foram das famílias L2 e L3. Mais considerações relacionando o aspecto visual com a perda de massa será feito nas considerações finais.

Com relação às perdas individuais das barras, elencou-se na tabela 31, a barra com maior perda de massa absoluta por família.

Tabela 31-Barras que mais perderam massa absoluta por família.

Família	Placa	Barra	Bitola (mm)	Perda de massa (g)	Perda percentual (%)
R	10	49	8.0	2,41	2,51
L1	30	149	8.0	2,05	2,13
L2	40	196	6.3	2,36	3,18
L3	69	342	10.0	2,53	1,40

A barra que mais perdeu massa, em termos absolutos, foi a barra 342 da placa 69 da família L3. A seguir, nas figuras 119 a 124, é interessante observar que mesmo que com pequenos percentuais de perda de massa, a corrosão por cloretos se mostra bastante agressiva, deteriorando intensamente a secção da barra.

Figura 119-barra 85



Figura 120-Barra 35



Figura 121-Barra 75



Figura 122-Barra 95



Figura 123-Barra 191



Figura 124-Barra 196



### 6.6.3. Resistência à tração das barras

Para avaliar se houve mudança no comportamento mecânico do aço antes e depois do período de estudo, realizou-se ensaios de tração em amostras aleatórias e íntegras, conforme resultados na tabela 32.

Na tabela 33 estão resultados de amostras de 3 barras com maiores valores de perda de massa por cada família, totalizando 12 barras.

Tabela 32-Ensaio de tração em barras íntegras.

Bitolas (mm)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
6.3	819.6	741.2	22.2
6.3	859.9	684.5	19
6.3	801.4	679.2	17.5
8	694.7	591.3	13.8
8	632.9	532.8	10
8	669.7	566.4	11.3
10	643	534.2	15
10	612.3	508.3	18
10	651.2	544.1	19

Tabela 33-Ensaio de tração em barras deterioradas após período de exposição.

Bitola (mm)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
6.3	855.2	727	12.7
6.3	651.8	528.7	9.5
6.3	809.3	721.8	14.3
6.3	819.6	747.8	12.7
6.3	867	734	14.3
8.0	678	571.5	12.5
8.0	649.1	542.8	16.3
8.0	718.2	660	11.3
8.0	680	565.7	11.3
10	627.6	515.6	9
10	620.1	502.6	9
10	640.5	526.2	12

De acordo com especificações da NBR7480 (ABNT,2007), alguns comentários podem ser feitos. No tocante à tensão de escoamento, todas as barras atenderam à classe CA-50.

A tensão máxima de ruptura em todos os casos atendeu ao critério de  $1,08 \cdot f_y$ . Onde  $f_y$  é o valor da tensão de escoamento medida.

Contudo, a norma ainda indica que essa tensão máxima de ruptura deve ser de no mínimo 660MPa. Com isso, algumas barras não atenderam ao critério, conforme marcado em destaque nas tabelas.

Vale lembrar que a amostragem foi reduzida e não houve qualquer análise estatística quanto aos valores representativos de resistência das amostras. Mas, de forma geral, para as condições de contorno deste trabalho e para os níveis de perda de massa mostrados, pode-se dizer que as amostras ensaiadas preservaram suas características de resistência mecânica.

## CAPÍTULO 5

### 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito à hipótese principal desta pesquisa, a qual questiona se o processo de corrosão de armadura em concreto celular pode ser assintomático (sem fissuras e manchas), diferente do concreto tradicional, serão realizadas algumas considerações.

Quanto à presença de fissuras, não se observou ocorrência nem nas placas de concreto leve, tampouco nas da família de referência. Em relação ao sintoma do manchamento, apenas 7 placas (10%) foram assintomáticas. Sendo 3 da família R e 4 da L1. Dito isso, algumas observações importantes precisam ser feitas.

- Com relação ao surgimento de fissuras, vale salientar que a não ocorrência se deu para os **parâmetros específicos deste trabalho**. O que pode ser considerado exigente, tendo em vista que na prática, em sistemas construtivos de parede de concreto, se utiliza uma espessura mínima de 8 cm e esse tipo de construção não é submetida aos ciclos que molhagem e secagem realizados.
- Sobre a questão do manchamento, apesar de 90% das placas terem apresentado manchas de quantidades e intensidades variadas, o cobrimento variável das placas deve ser levado em consideração. Afirma-se isso, pois, a maior frequência de ocorrência de manchamento foi na face "A". Ao analisar a estimativa de cobrimento, de forma geral, para todas as famílias, a face "A" apresentou menores valores do que a face "B", conforme gráfico 11. É possível que se encontre comportamento diferente com maiores cobrimento e uniformidade.
- Uma informação interessante sobre as placas da família L1 que se mostraram assintomáticas (PL20, 27, 34 e 36), é com relação ao seu cobrimento de armadura. 3 das 4 possuem cobrimentos menores que a média da família e mesmo assim não houve surgimento de fissuras.

Ainda com relação à possível capacidade dos poros do concreto celular em absorver os produtos de corrosão, aliviando as tensões geradas e evitando as manchas superficiais, há um dado interessante a ser mostrado.

- Chama-se atenção para as placas 30, 40 e 69, das famílias L1, L2 e L3, respectivamente. As placas 30 e 40 foram as que obtiveram uma maior perda de massa de aço de suas famílias (tabela 30) e, a 69 foi a segunda maior perda da família L3. Para os maiores níveis de perda de massa, espera-se que seja formada maior quantidade de produtos de corrosão e que isso aflore mais intensamente na superfície das placas, conforme foi visto na placa 58 (maior perda da família L3. Foto 58 no apêndice A).
- Contudo, o comportamento das 3 placas citadas foi antagônico ao esperado. Essas placas foram classificadas visualmente como degradação leve, conforme pode ser visto nas fotos do apêndice A. O que se quer afirmar com esse exemplo é que existe a possibilidade dos poros “esconderem” o manchamento. Pois, nessas placas, como por exemplo, na 69, praticamente não foi possível ver a única e pequena mancha mostrada, ao contrário da elevada intensidade vista na placa 58. Lembrando que os cobrimentos estimados da placa 69 são menores que os da placa 58.
- Mesmo essa sendo uma análise pontual dentro de um comportamento geral, não é possível desprezar seu acontecimento.

Por fim, com relação à durabilidade e outras propriedades dos concretos, comparando o concreto de referência com os concretos leve estudados, observou-se a maior susceptibilidade de concretos mais porosos à degradação das armaduras.

- As placas das famílias L2 e L3, mais porosas, apresentaram visualmente uma classificação de mais degradadas em relação às outras duas. Isso foi verificado também na perda de massa e nos ensaios de monitoramento eletroquímico.

- Verificou-se também a diminuição acentuada da resistência à compressão para maiores níveis de incorporação de ar no concreto.

## 8. CONCLUSÕES

Com relação à verificação da sintomatologia do processo de corrosão de armadura no concreto celular, observou-se que para os parâmetros e condições de contorno específicas deste trabalho, os concretos celulares, bem como o de referência, não apresentaram fissuras para o nível de corrosão gerado. Vale salientar ainda que as condições de exposição das placas foram extremas, com apenas 5 cm de espessura e sob ciclos de molhagem e secagem em água contendo cloretos.

No tocante ao sintoma do manchamento, 90% das placas mostraram sua ocorrência. Contudo observou-se que o cobrimento das armaduras das placas teve influência sobre o surgimento das manchas de corrosão.

Além disso, alguns fatos mostrados no item 7 (placas 30, 40 e 69), mostram que há a possibilidade dos concretos celulares “absorverem” os produtos de corrosão, não mostrando manchas em sua superfície.

Em suma, quanto às fissuras, o processo foi assintomático. Já o manchamento pode torna-se com o aumento do cobrimento de armadura.

Sobre o nível de degradação das barras, para as condições de exposição mostradas e o tempo de estudo, encontrou-se baixos percentuais de perda de massa. A barra que mais perdeu massa, perdeu 3,18%. Já a placa que mais perdeu, foi apenas 1,57%. Porém, visualmente, observa-se alguns danos localizados bastante acentuados (figuras 119 a 124).

O comportamento mecânico das barras após submetidas ao processo de corrosão, não se modificou para as amostras ensaiadas.

Quanto às características de resistência à compressão, absorção total de água e índice de vazios das 4 famílias (R, L1, L2, L3) de concreto pode-se realizar alguns comentários. Observou-se que com a diminuição da massa específica, há um aumento do índice de vazios, o que aumenta a absorção de água e diminui sensivelmente a resistência à compressão do concreto.

Analisando os valores médios das 4 famílias para os parâmetros eletroquímicos de resistividade elétrica e potencial de corrosão, observou-se que, de forma geral, o comportamento das 4 famílias ao longo do período de estudo foi bastante similar, seguindo praticamente mesmo padrão.

Comparativamente, verificou-se a influência do teor de ar incorporado em algumas características do concreto e nos resultados dos ensaios. As famílias de concreto que tiveram maiores teores de ar incorporado, obtiveram maior absorção de água, menor massa específica e resistência à compressão. Com relação aos ensaios, as famílias L2 e L3 (maiores teores de ar), apresentaram-se mais degradadas, visualmente, bem como obtiveram as maiores perdas de massa de aço.

É importante que estudos como esse e outros que avaliem questões de durabilidade, comportamento sob corrosão e também de aderência entre o aço e o concreto celular continuem sendo feitos.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e Métodos de análise**. Cap. 4 (Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto).1ª Ed.; Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE-ACI. **Guide for structural lightweight aggregate concrete**. Report 213R-03. ACI Manual of concrete practice, part 1, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE-ACI. **Corrosion of metals in concrete. Manual of concrete practice**. Detroit,committee 222, v.1,1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C876-91: **Standard Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, v.04.02, p.429-33, 1999.

ANDRADE, J. J. O.. **Concreto –Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol.2. Cap.31 – Vida útil das estruturas. Edição Geraldo Cechella Isaia, Ibracon, 2005.

ANDRADE, J. J. O.. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ARANHA, P.M.S.. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ARAÚJO, A.; PANOSSIAN, Z.; OLIVEIRA, M. C. B.; PINTO, N. S.; FLOR, J. P.. **Comportamento da armadura em concreto poroso: Estudo de caso**. Revista Técnica, ed.212, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais- Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655:** Concreto de Cimento Portland- Preparo, controle, recebimento e aceitação- Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738:** Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118:** Projeto de Estruturas de concreto–Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7213:** Agregados leves para concreto isolante térmico- Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575:** Edificações Habitacionais – Desempenho- parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 13438:** Blocos de concreto celular autoclavado- Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 6892:** Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland- Requisitos, Rio de Janeiro, 2011.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7480:** Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 3759:** Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos– Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 12646:** Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local-Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12645:** Execução de Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND-ABCP. **Manual técnico para implementação - Habitação 1.0. Bairro saudável. População saudável.** São Paulo, 2002.

BAUER, L.A. F.; NORONHA, M. A.; BAUER, R. J.. **Materiais de Construção.** vol.1, 5.ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2001. Cap.6, P. 145.

BERTONILI, L.. **Materiais de Construção- Patologia, Reabilitação, Prevenção.** 1ª ed., Oficina de Textos, 2010.

BRITISH CEMENT ASSOCIATION, **Foamed Concrete: Composition and properties,** U.K., 1991.

BRITISH STANDARDS 1881-124. **Testing Concrete. Methods of Analysis of Hardened Concrete,** 1988.

BROOMFIELD, J. P..**Corrosion of Steel in Concrete- Understanding, investigation and repair.** 2ª ed. Editor Taylor e Francis, New York, 2007.

BROOMFIELD, J. P.; MILLARD, S. **Current Practice Sheet nº 128, concrete,** February,2002

BROWNE, R. D.; GEOGHEGAN, M. P.; BAKER, A. F.. **Corrosion of reinforcement in concrete construction.** Society of chemical Industry. London, 1983

CARVALHO, J. D. N. D.. **Sobre as origens e desenvolvimento do concreto**. Centro de Tecnologia da universidade de Maringá, Revista Tecnológica, v. 17, p. 19-28, 2008.

CASCUDO, O.. **Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão de armadura**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Vol 2, Cap. 35, 2005.

CASCUDO, O.. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. 2 ed.. Goiania: Pini e UFG, 1997.

CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L.. **Avaliação experimental da Corrosão de armaduras em concreto utilizando a técnica de medida dos potenciais de eletrodo**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/58. 1992.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM35: Agregados leves para concreto estrutural-Requisitos**. 1995.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. **Bulletin d'Information**. Paris. Nº 192, 1989.

CORTELASSI, E. M. **Avaliação do comportamento de concretos celulares espumosos de alto desempenho**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

CORTELASSI, E. M.; CARBONARI, B. M. T.. **Concretos celulares de alto desempenho- Avaliação do comportamento e durabilidade**. Encontro nacional do betão estrutural. Guimarães, 2008.

CRANK, J.. **The mathematics of diffusion**. 2 ed.. New York, Oxford University Press, 1975.

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 em Engenharia – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,1988.

ELSENER, B.; BOHNI, H.. **Potential mapping and corrosion of steel in concrete**. In: Neal S. Berke; Victor Chaker; David Whiting. Corrosion rates of steel in concrete. Philadelphia. ASTM. 1990. P. 143-156.

FERREIRA, O. A. R..**Concretos celulares espumosos**. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, departamento de Engenharia de Construção Civil, 1987.

FUSCO, P. B..**Tecnologia do Concreto estrutural**. Pini, 2008.

GENTIL, VICENTE. **Corrosão**, 3ª Ed., editora LTC, Rio de Janeiro, 1996

HAUSMANN, D. A.. **Steel Corrosion in Concrete: How Does it Occur?** **Materials Protection** 6, p. 16-28, 1967.

HELENE, P. R. L.. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e Métodos de análise**. Cap. 1 (Introdução). 1ª Ed.; Rio de Janeiro, 2014.

HELENE, P. R. L..**Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4.ed. São Paulo. Pini, 1999.

HELENE, P. R. L.. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de concreto armado**. Tese de Livre Docência- Universidade de São Paulo, 1993.

LEA, F. M..**The Chemistry of Cement and Concrete**. Chemical Publishing Company, New York, p. 596, 1971.

LEGATSKI, L. M.. Cellular concrete. In: American Society for testing and materials. **Significance of tests and properties of concrete and concrete-marking materials**. Philadelphia, 1978.

MARIZ, J. C..**Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado**. Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, 2013.

MEDEIROS, M.H.F, ANDRADE, J.J.; HELENE, P. R. L.. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. Concreto: Ciência e Tecnologia, IBRACON. Capítulo 22, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M..**Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição, Ibracon, São Paulo, 2014.

MOTA, A. C. M..**Avaliação da presença de cloretos livres em argamassa através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata**. Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em engenharia civil da escola politécnica de Pernambuco para obtenção do título de mestre em engenharia. Recife, 2011.

MORAIS NETO, D. P. DE..**Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado**. Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em engenharia civil da escola politécnica de Pernambuco para obtenção do título de mestre em engenharia. Recife, 2015.

NEPOMUCENO, A. A.. **Concreto –Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol.2. Cap.26 – Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. Edição Geraldo Cechella Isaia, Ibracon, 2005.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J..**Tecnologia do Concreto**. 2ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2013.

PETRUCCI, E. G. R.. **Concreto de cimento Portland**. 14ª edição, revisada por Vlamir Antônio Paulon, ed. Globo, São Paulo, 2005.

RIBEIRO, D. V..**Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e Métodos de análise**. Cap. 3 (Durabilidade e vida útil das estruturas).1ª Ed.; Rio de Janeiro, 2014.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T..**Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e Métodos de análise**. Cap. 6 (Deterioração das estruturas de concreto armado). 1ª Ed.; Rio de Janeiro, 2014.

RILEM TC 154-EMC. - Technical Committees **.Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion**. Vol 33. 2000.

ROCHA, F. C. D.. **Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: Influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ROSSIGNOLO, J. A..**Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - Dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** Tese para obtenção do título de Doutor em ciência e Engenharia de materiais, apresentada à área interunidades em Ciência e Engenharia de materiais da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C..**Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações.** Capítulo 43, Ibracon, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A..**Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** São Paulo, Ed. Pini, 2009.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N..**A influência do teor de argila expandida na condutividade térmica do concreto leve.** 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Golçalves, v.1, p1-10, 2007.

SANTOS, L..**Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação, departamento de estruturas da Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUSA, C. A. C..**Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e Métodos de análise.** Cap. 2 (Princípios da corrosão eletroquímica). 1ª Ed.; Rio de Janeiro, 2014.

SILVA JUNIOR, J.Z.R. **Argamassa de Reparo Estrutural.** Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP, 2001.

STRATFULL, R. F..**Half Cell Potentials and Corrosion of Steel in Concrete.** Highway Research Record. Vol 433, 1973.

TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. **Considerações Sobre Algumas propriedades dos Concretos Celulares Espumosos.** Boletim Técnico

da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo. EPUSP, 1992.

**VAN DAVEER, J. R.. Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks.** Journal of the American Concrete Institute, Detroit, v.72,n.12, , 1975.

**VARELA, D. H.; GONZALES, M. J.. Algunos parâmetros que permiten una evaluación in situ de la corrosión de armadura em obras civiles de hormigón armado.** Congreso Nacional de la construcción, 3. Viña del Mar, 1990.

**VIEIRA, G..Cálculo de concreto armado, vol 1.** Ed. Universitária UFPE, Recife, 2003.

**APÊNDICE A-Fotos das placas e imagens do mapeamento do potencial de corrosão.**

Foto 1-PLACA 01-FAMÍLIA R

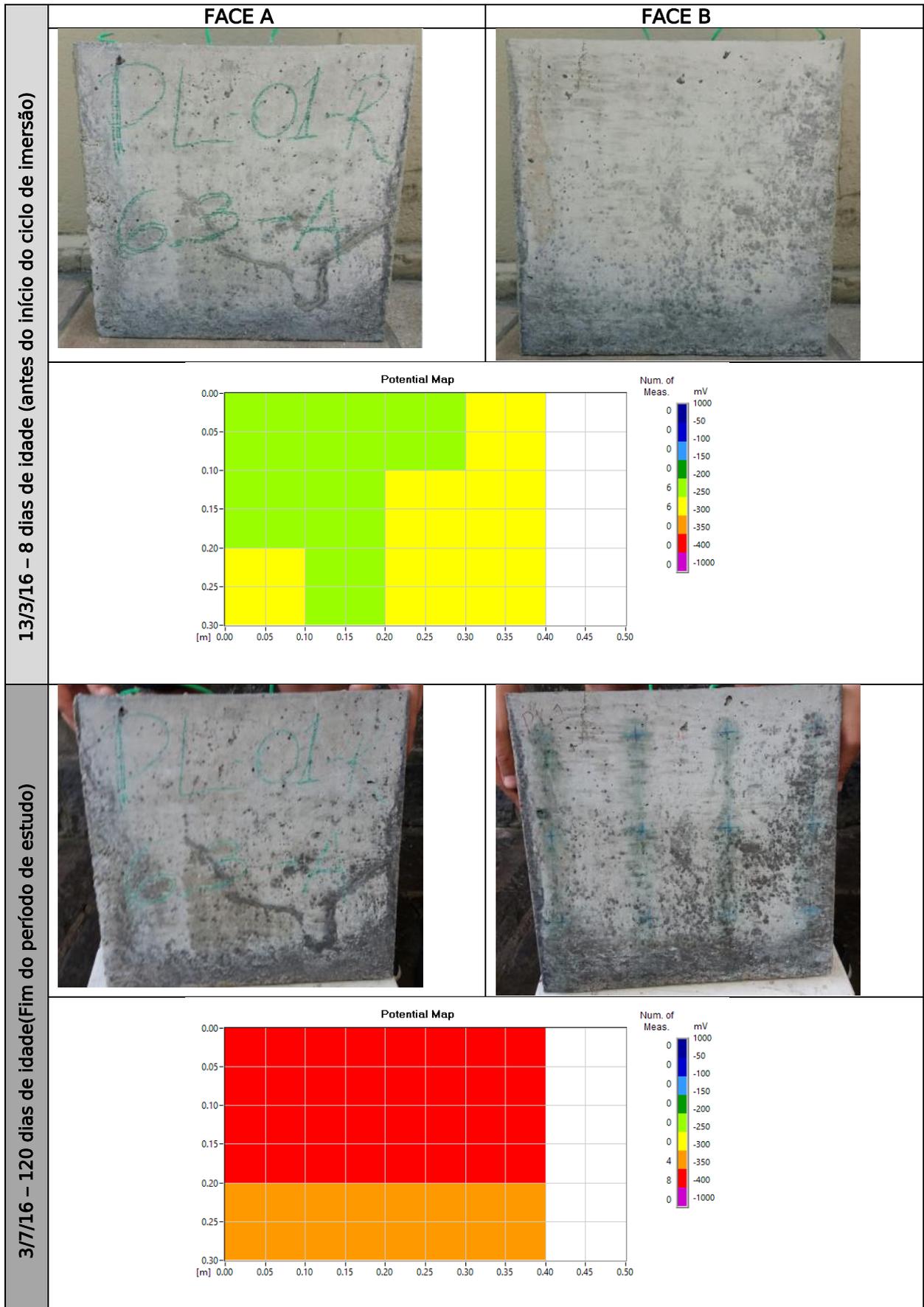


Foto 2-PLACA 02-FAMÍLIA R

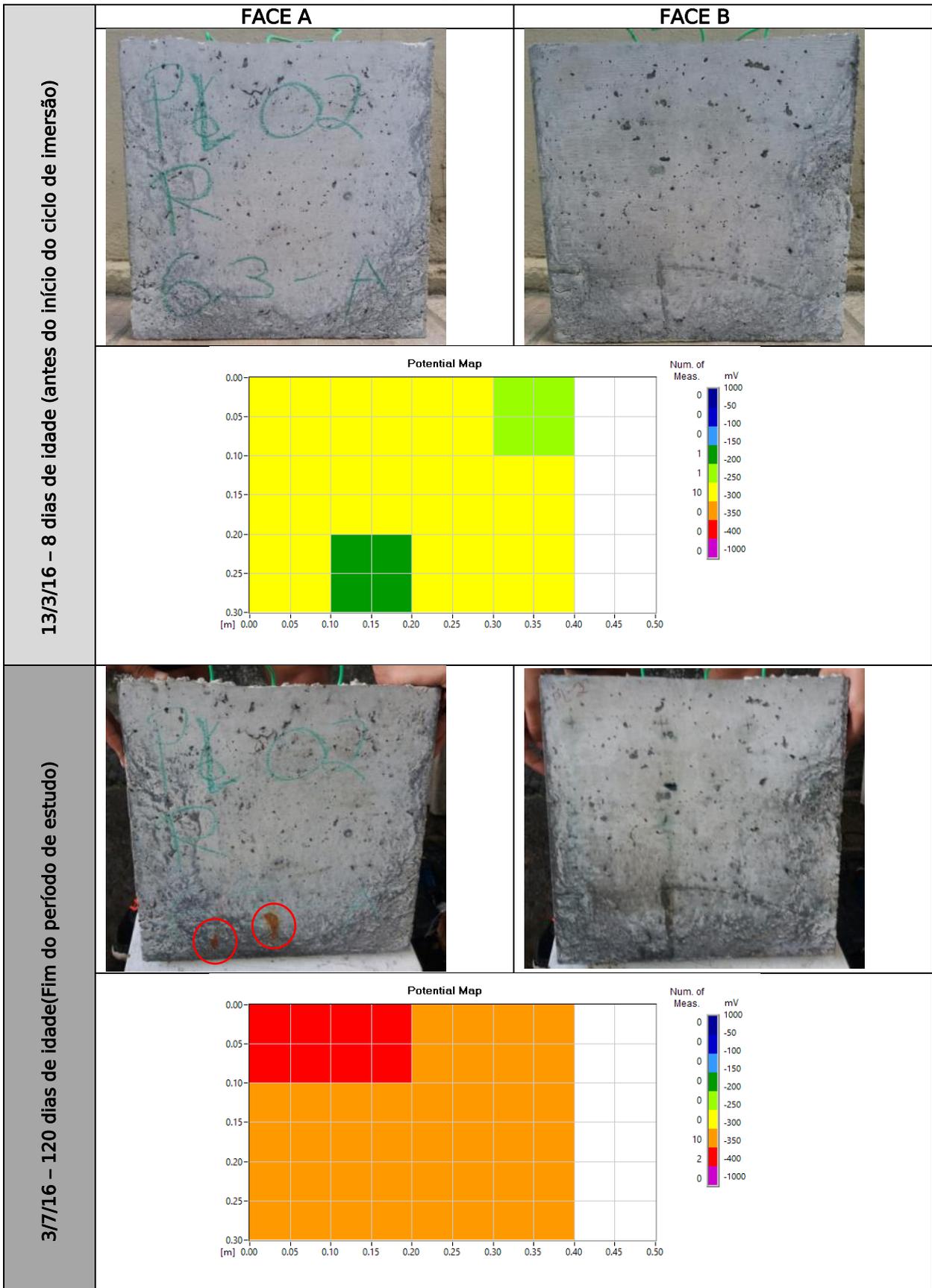


Foto 3-PLACA 03-FAMÍLIA R

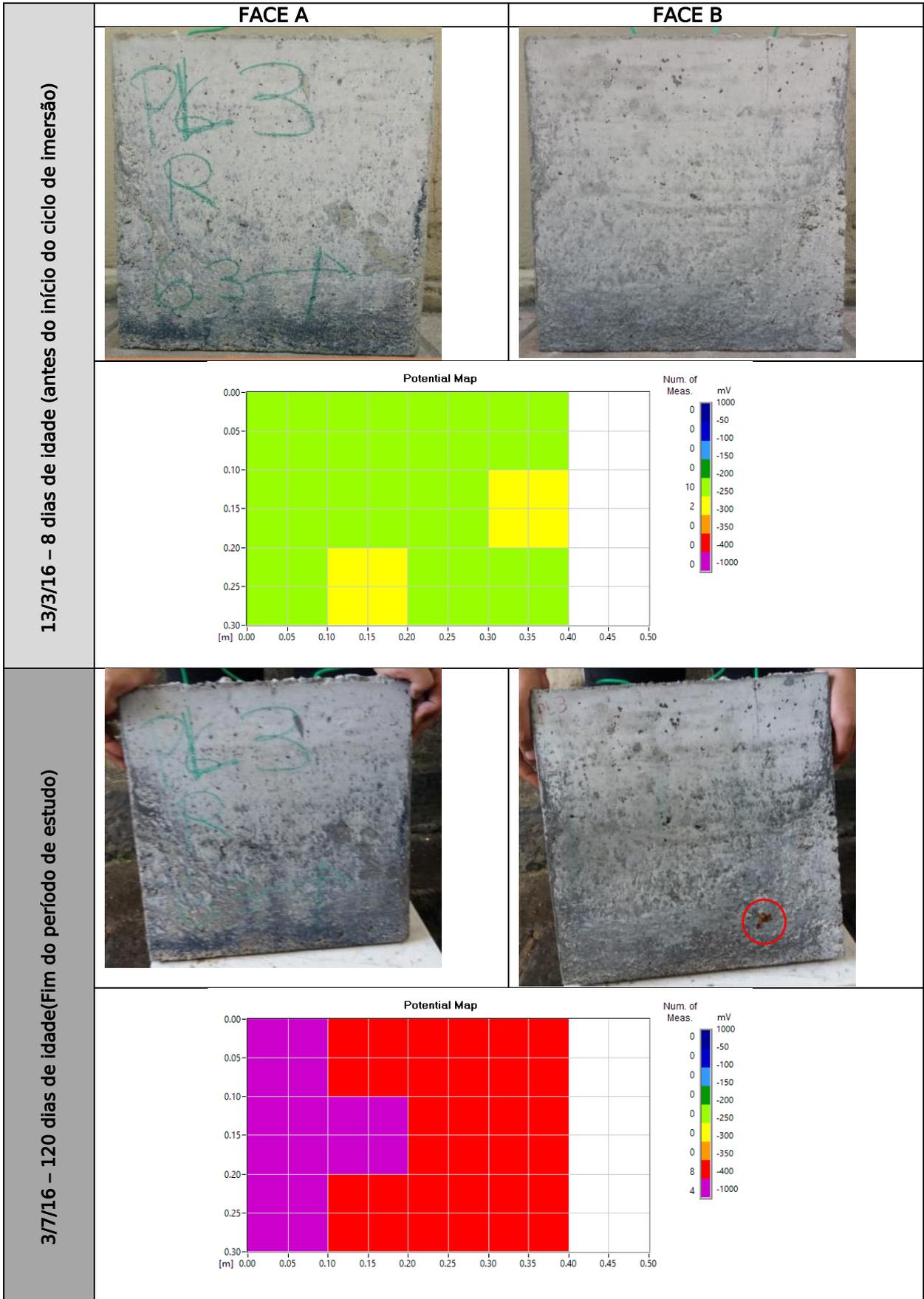


Foto 4-PLACA 04-FAMÍLIA R

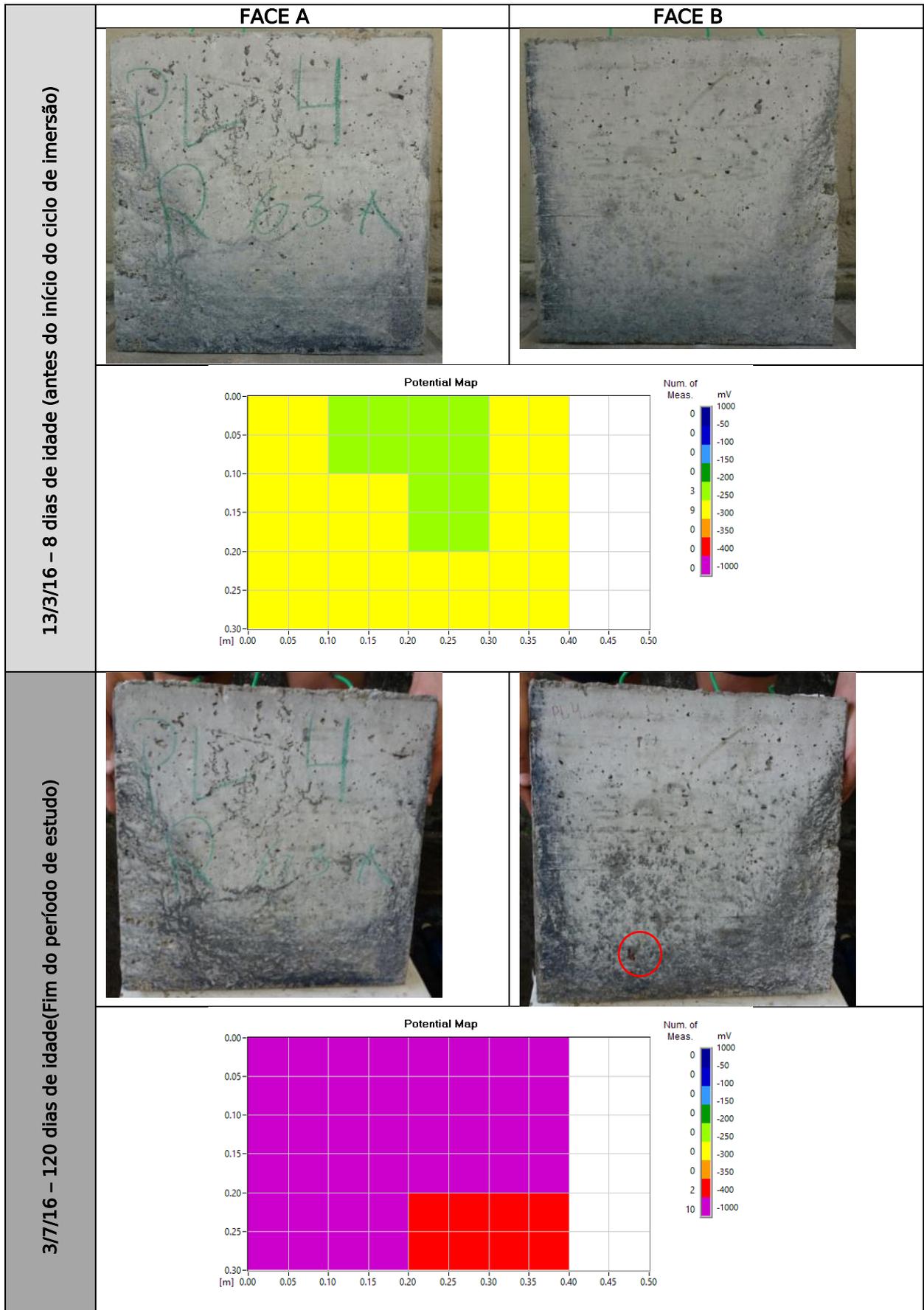


Foto 5-PLACA 05-FAMÍLIA R

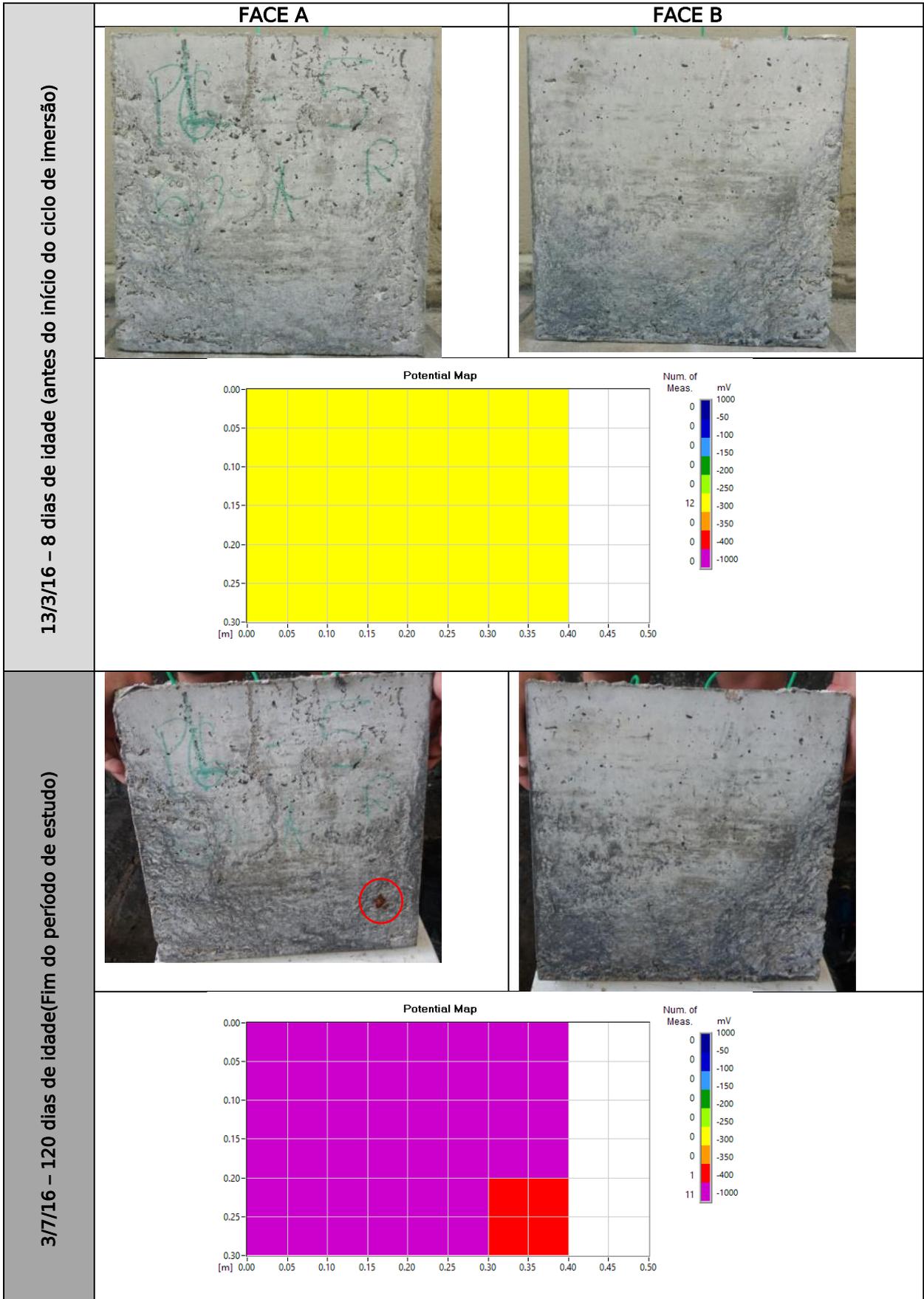


Foto 6-PLACA 06-FAMÍLIA R

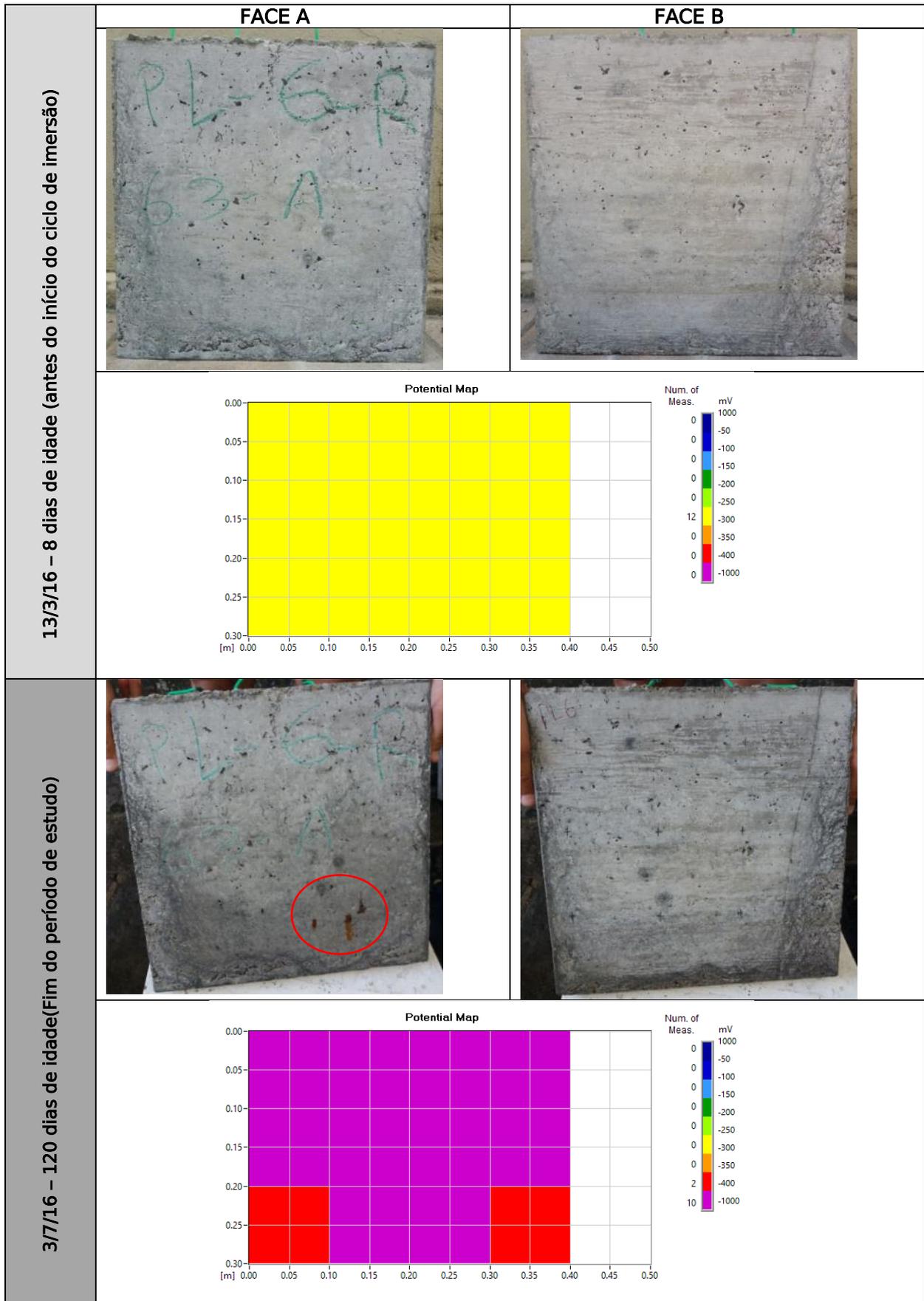


Foto 7-PLACA 07-FAMÍLIA R

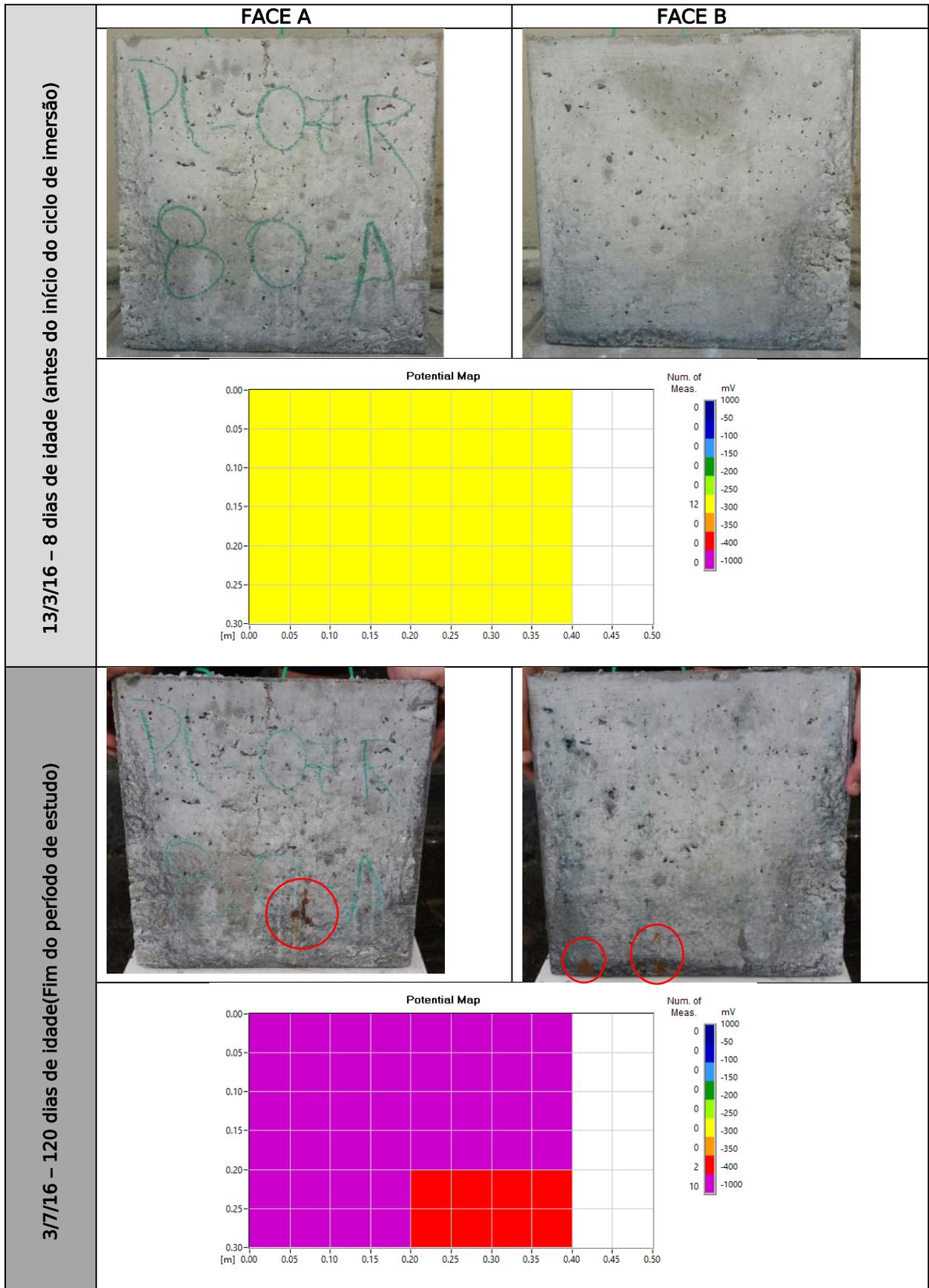


Foto 8-PLACA 08-FAMÍLIA R

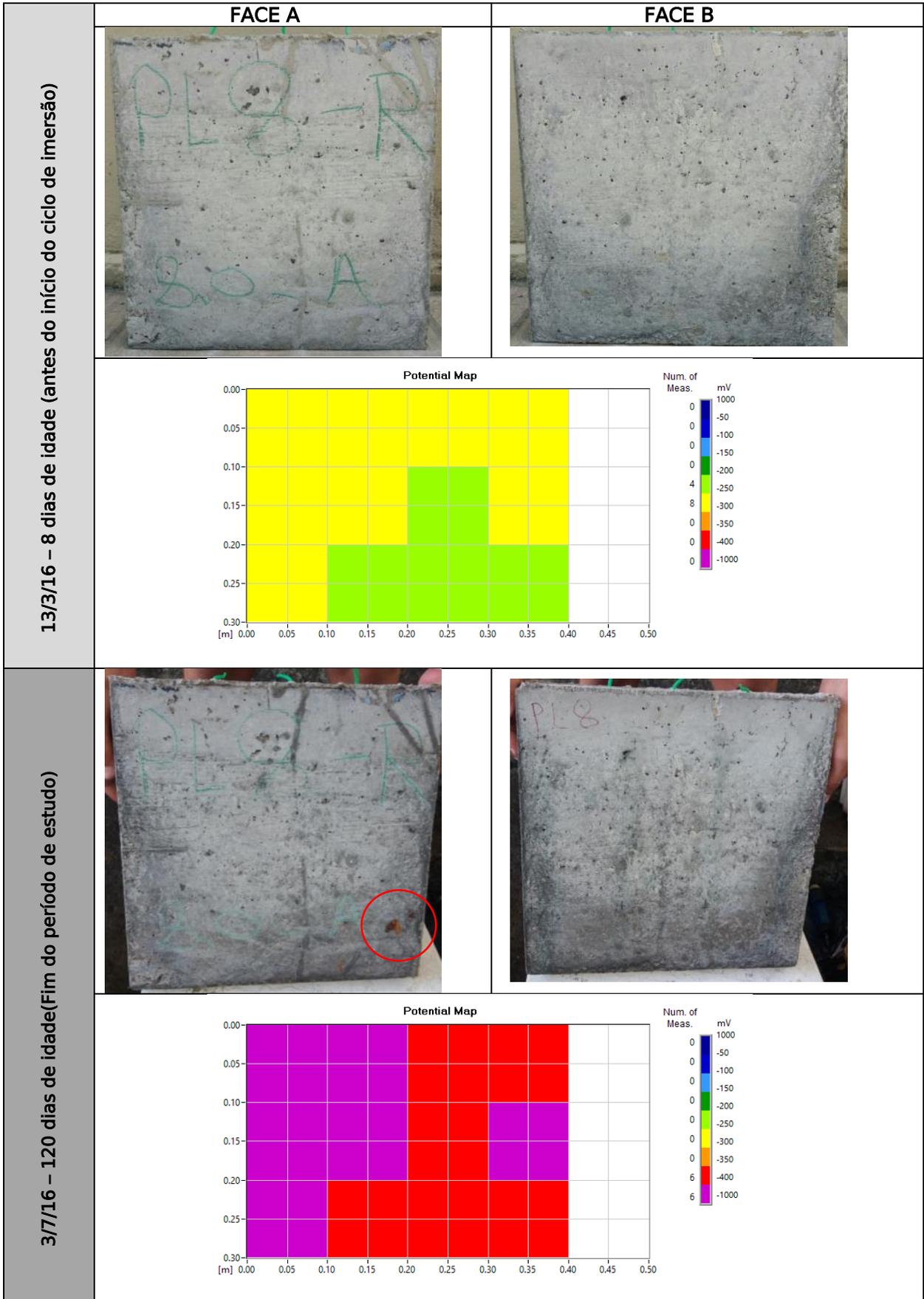


Foto 9-PLACA 09-FAMÍLIA R

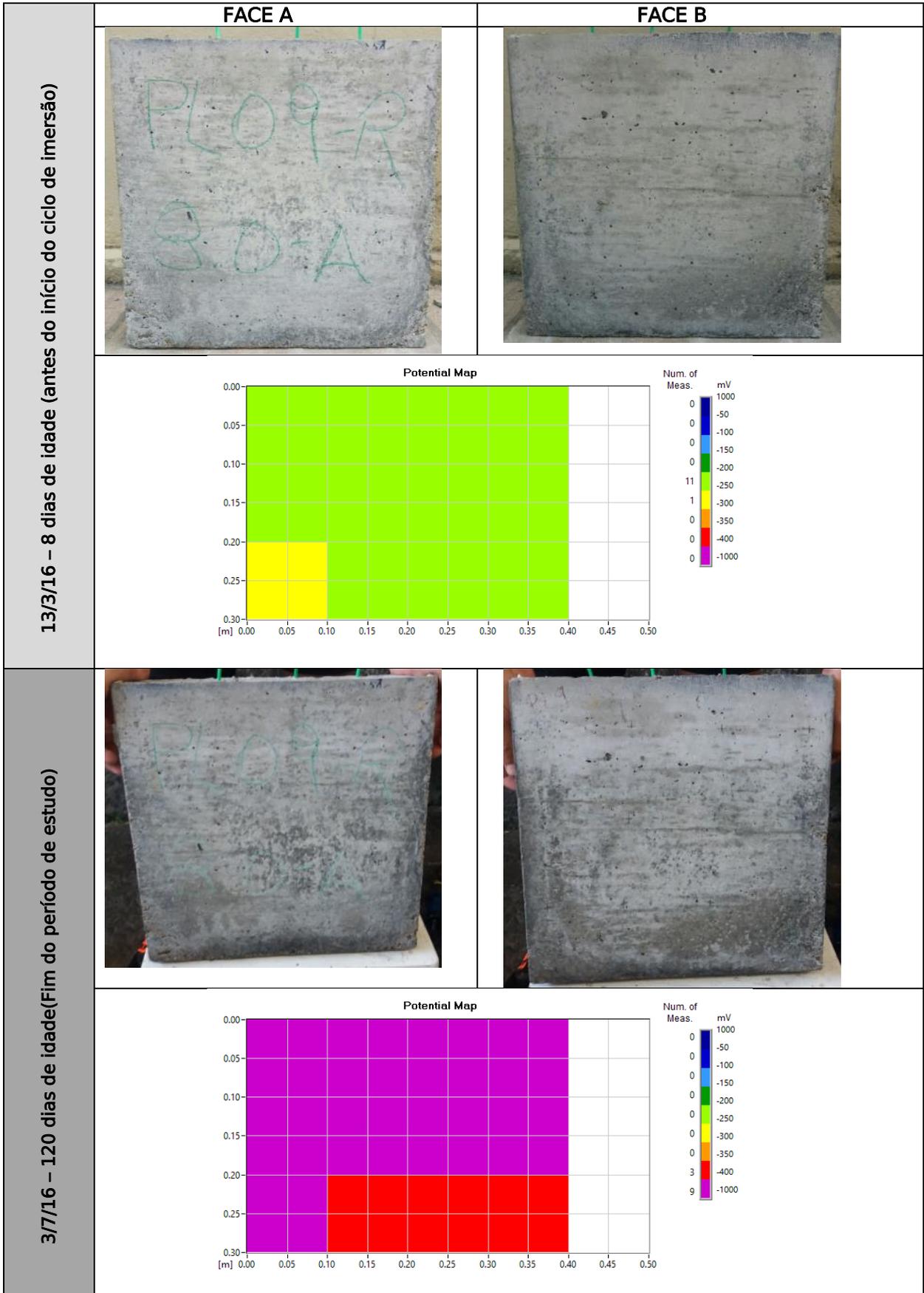


Foto 10-PLACA 10-FAMÍLIA R

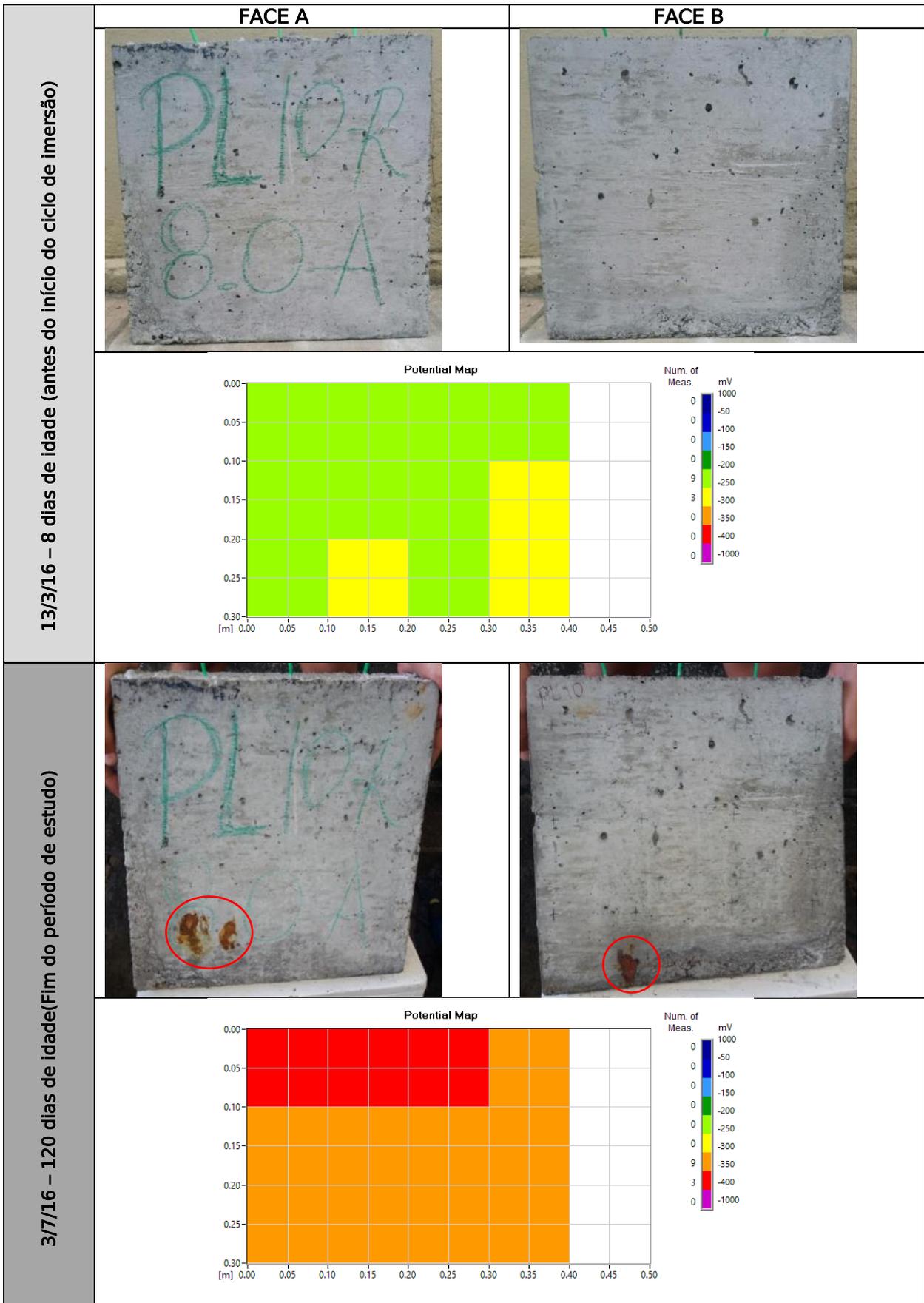


Foto 11-PLACA 11-FAMÍLIA R

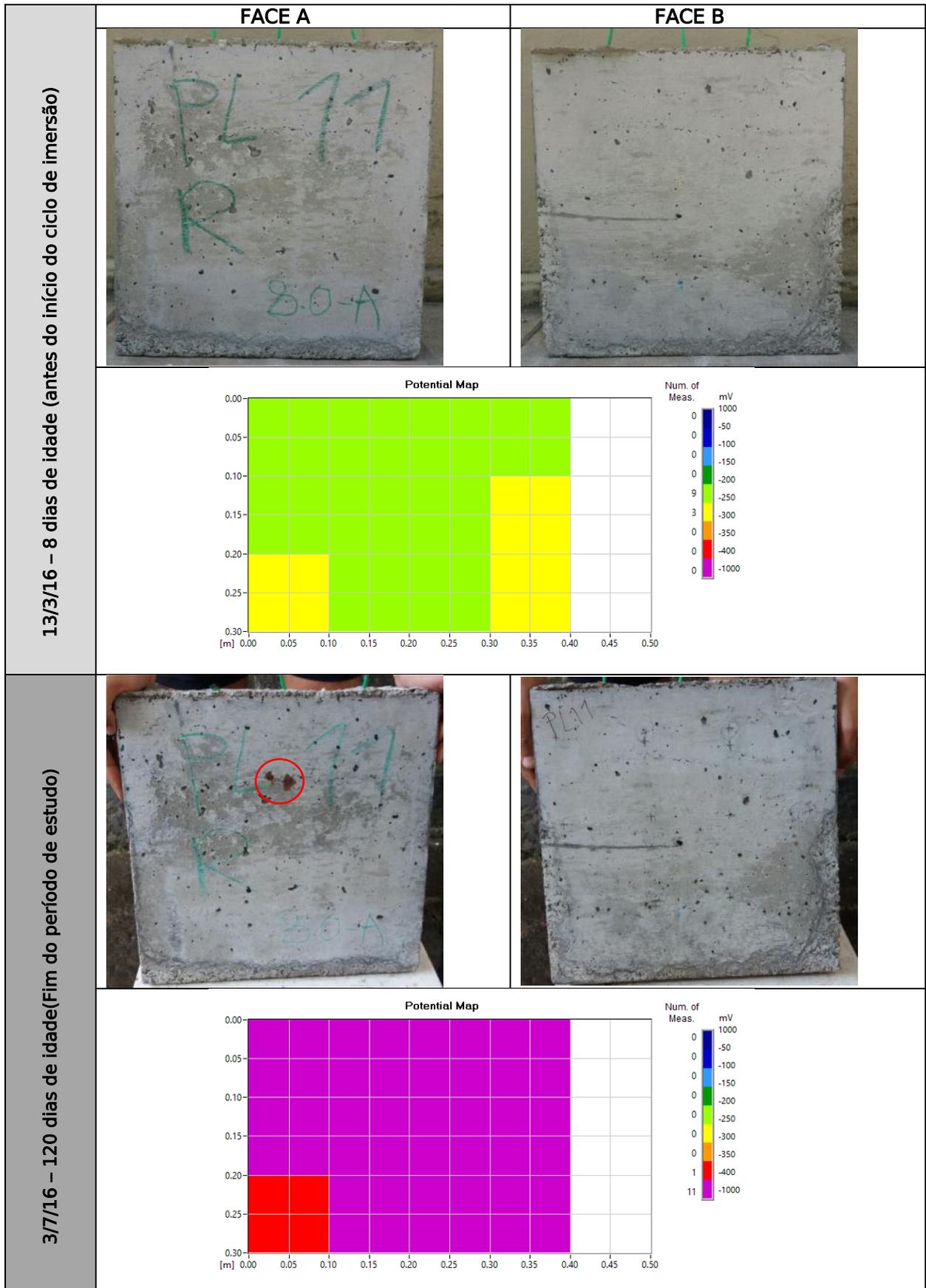


Foto 12-PLACA 12-FAMÍLIA R

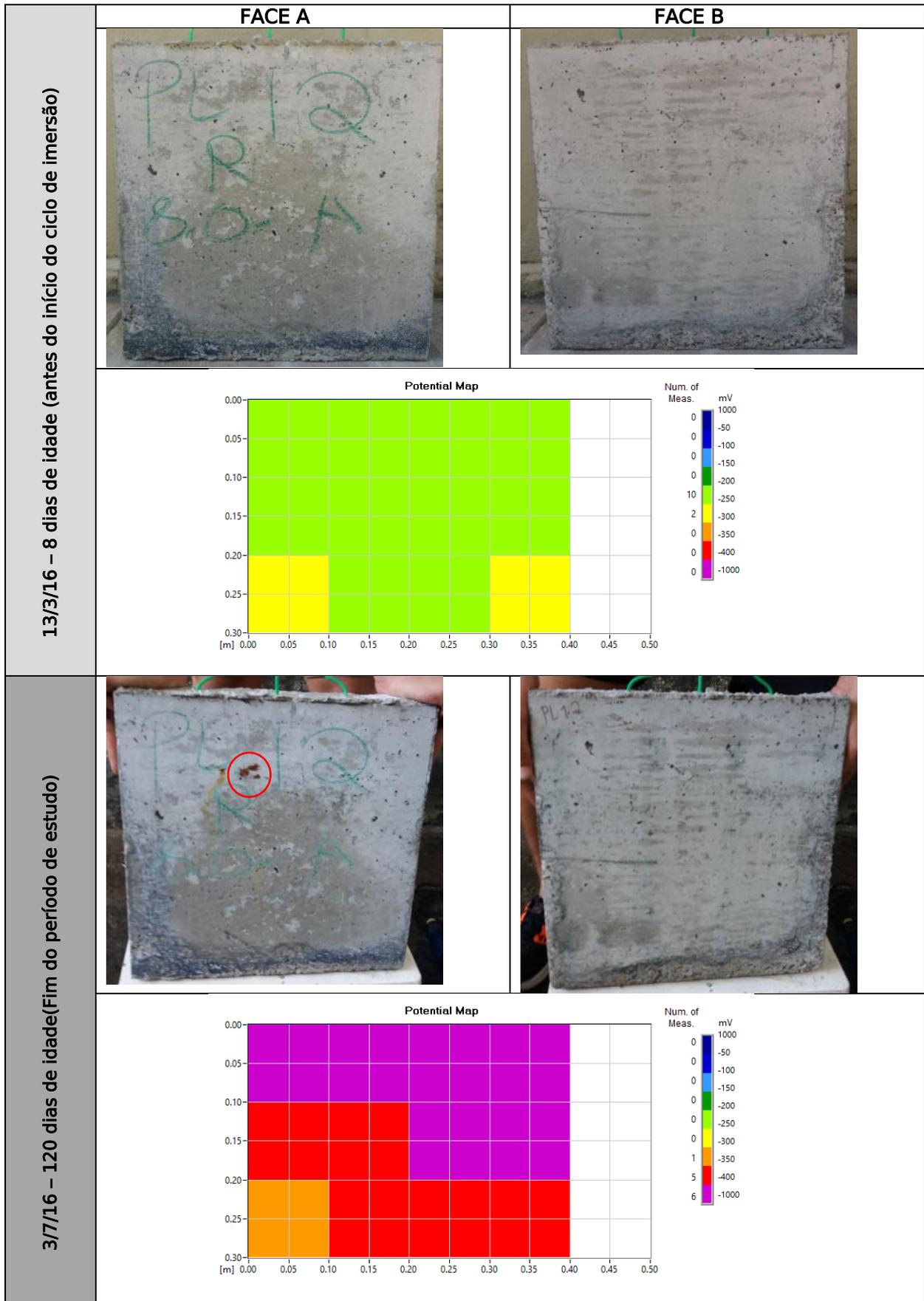


Foto 13-PLACA 13-FAMÍLIA R

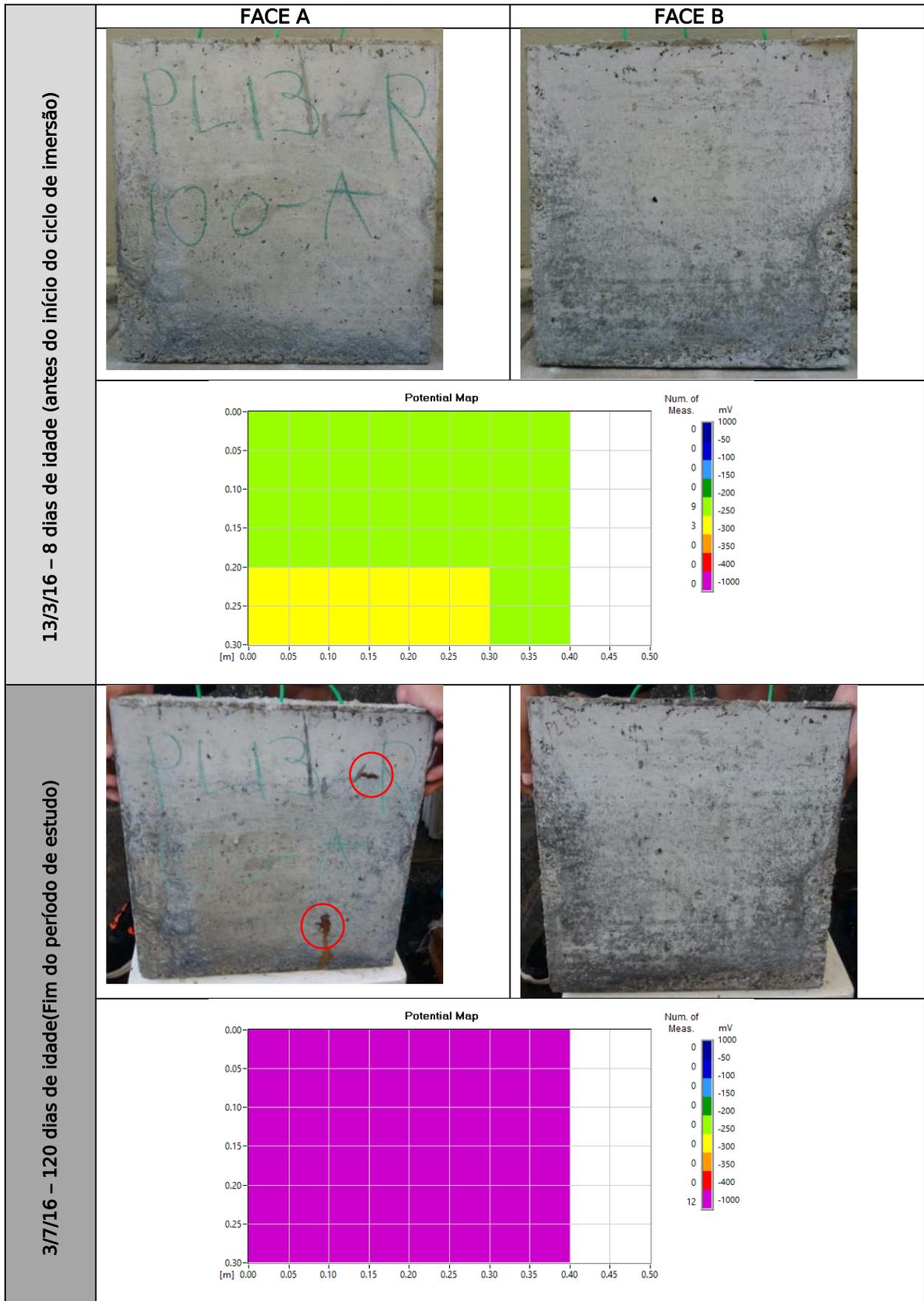


Foto 14-PLACA 14-FAMÍLIA R

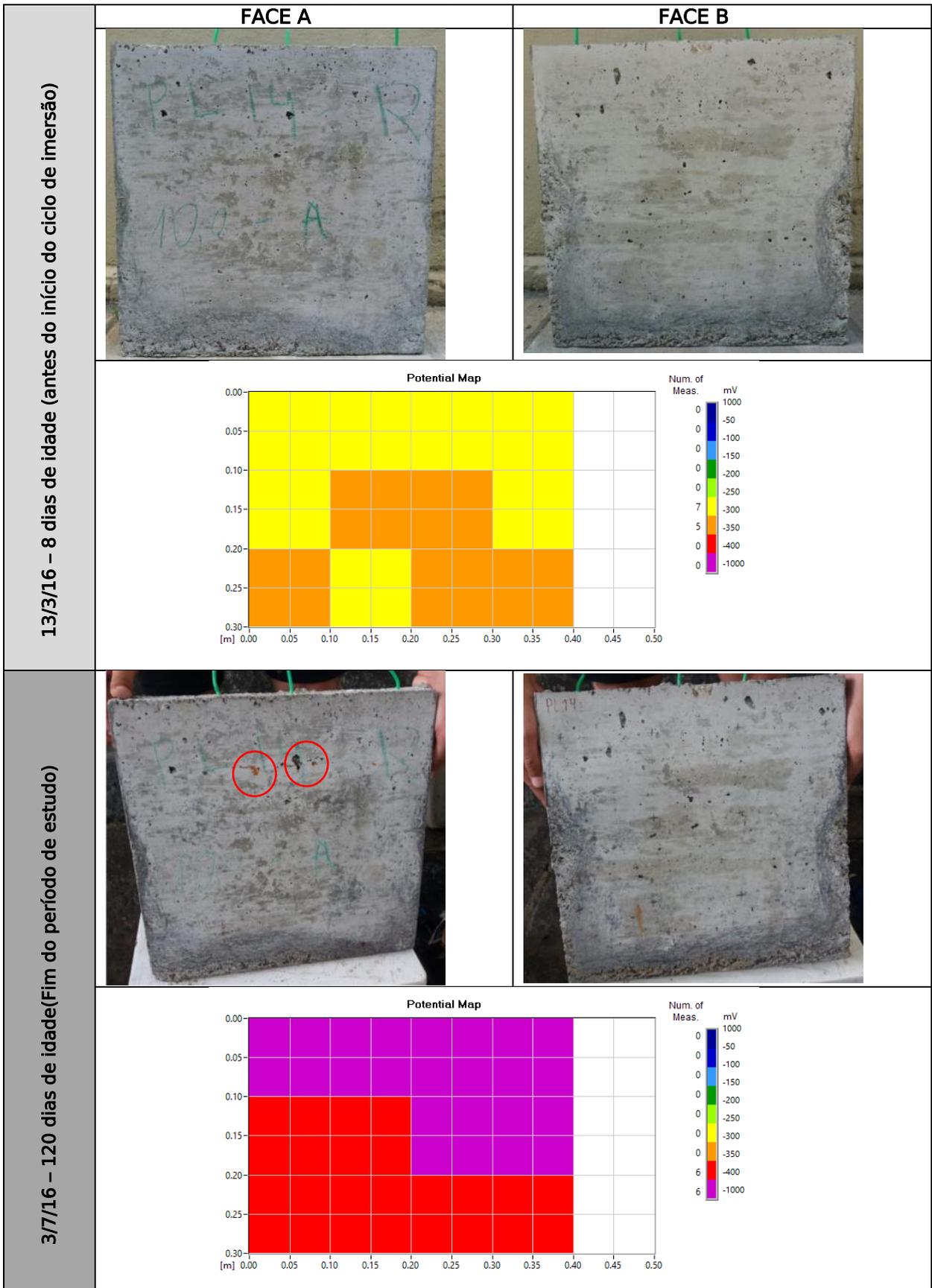


Foto 15-PLACA 15-FAMÍLIA R

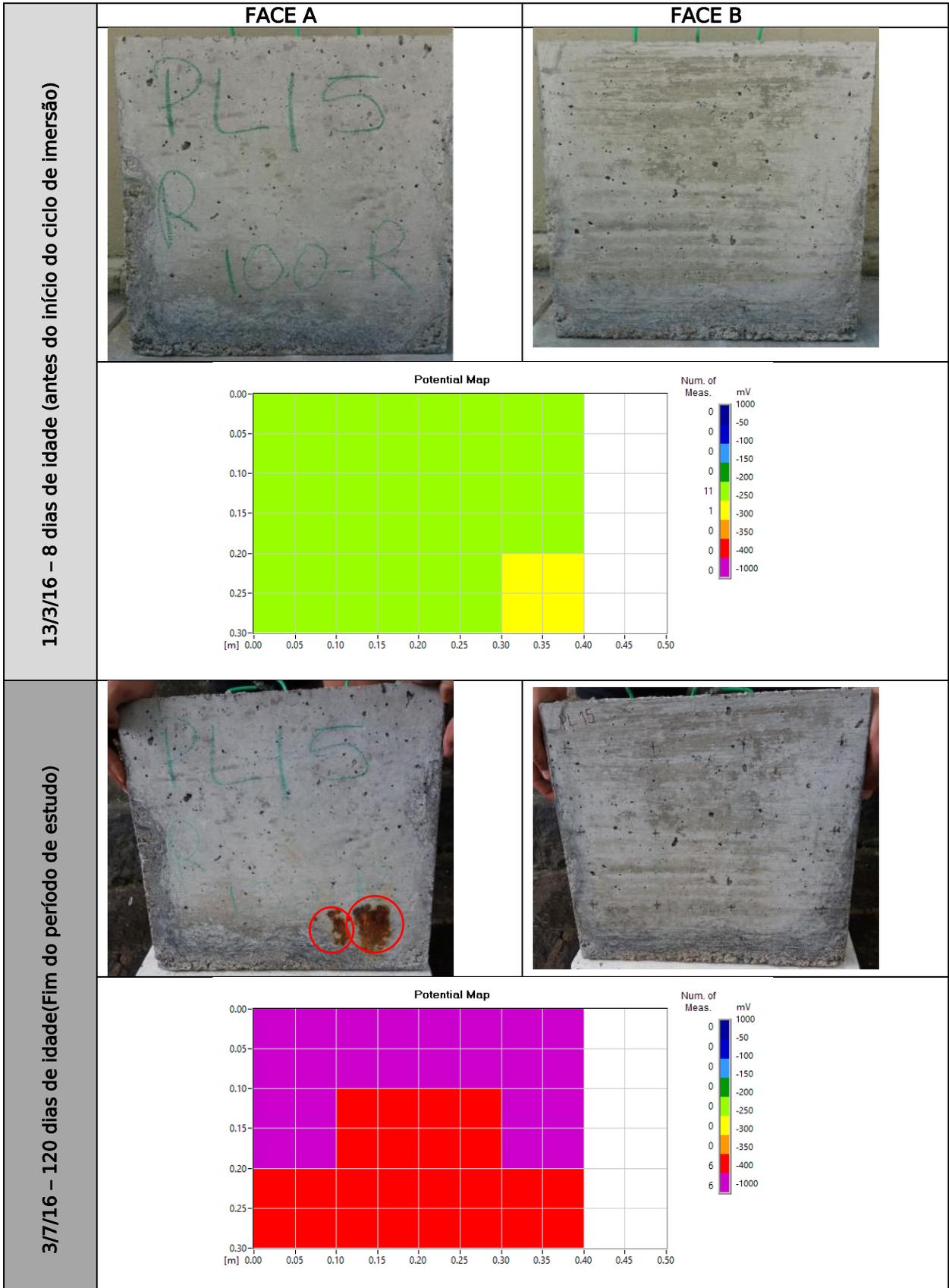


Foto 16-PLACA 16-FAMÍLIA R

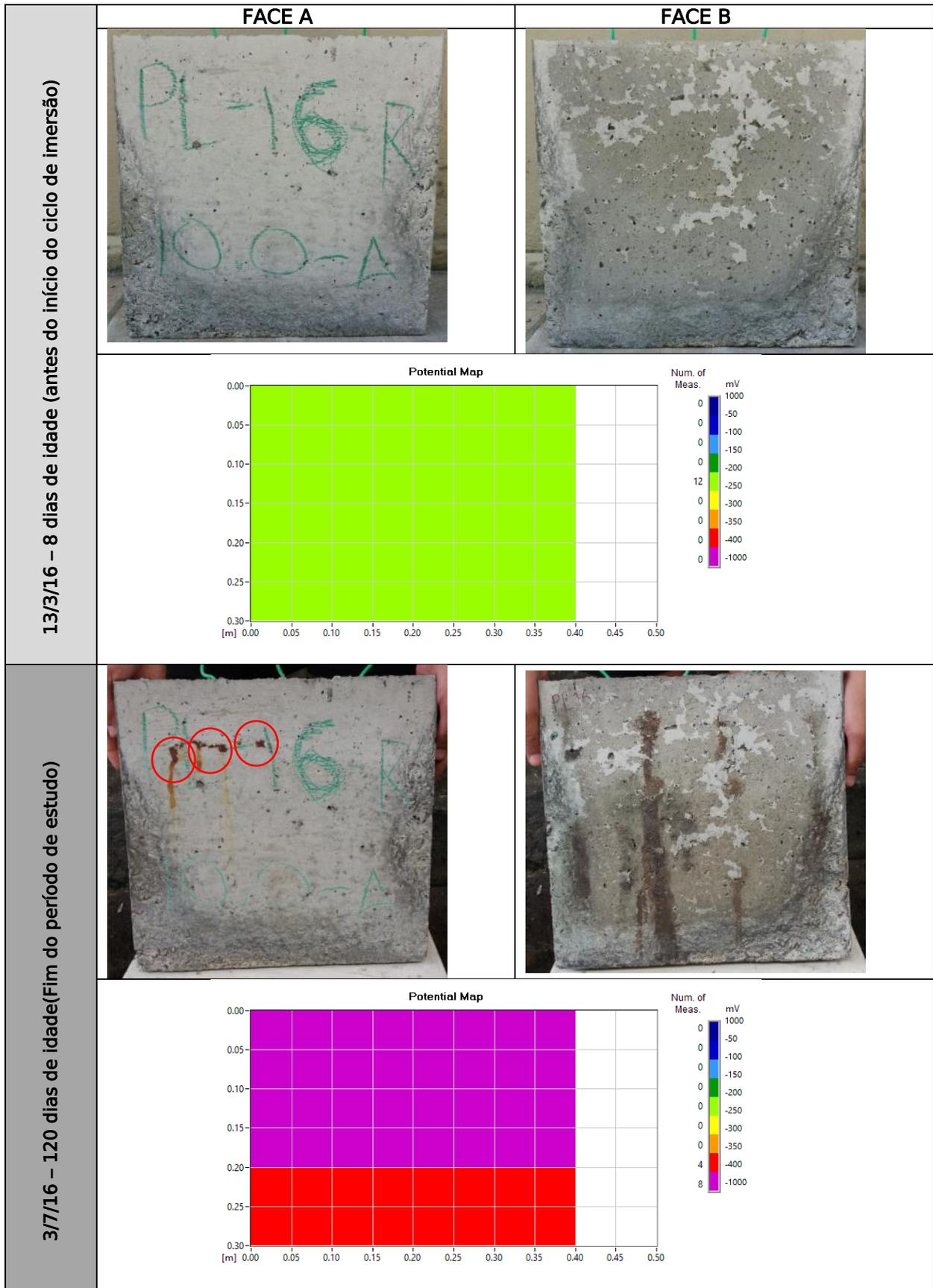


Foto 17-PLACA 17-FAMÍLIA R

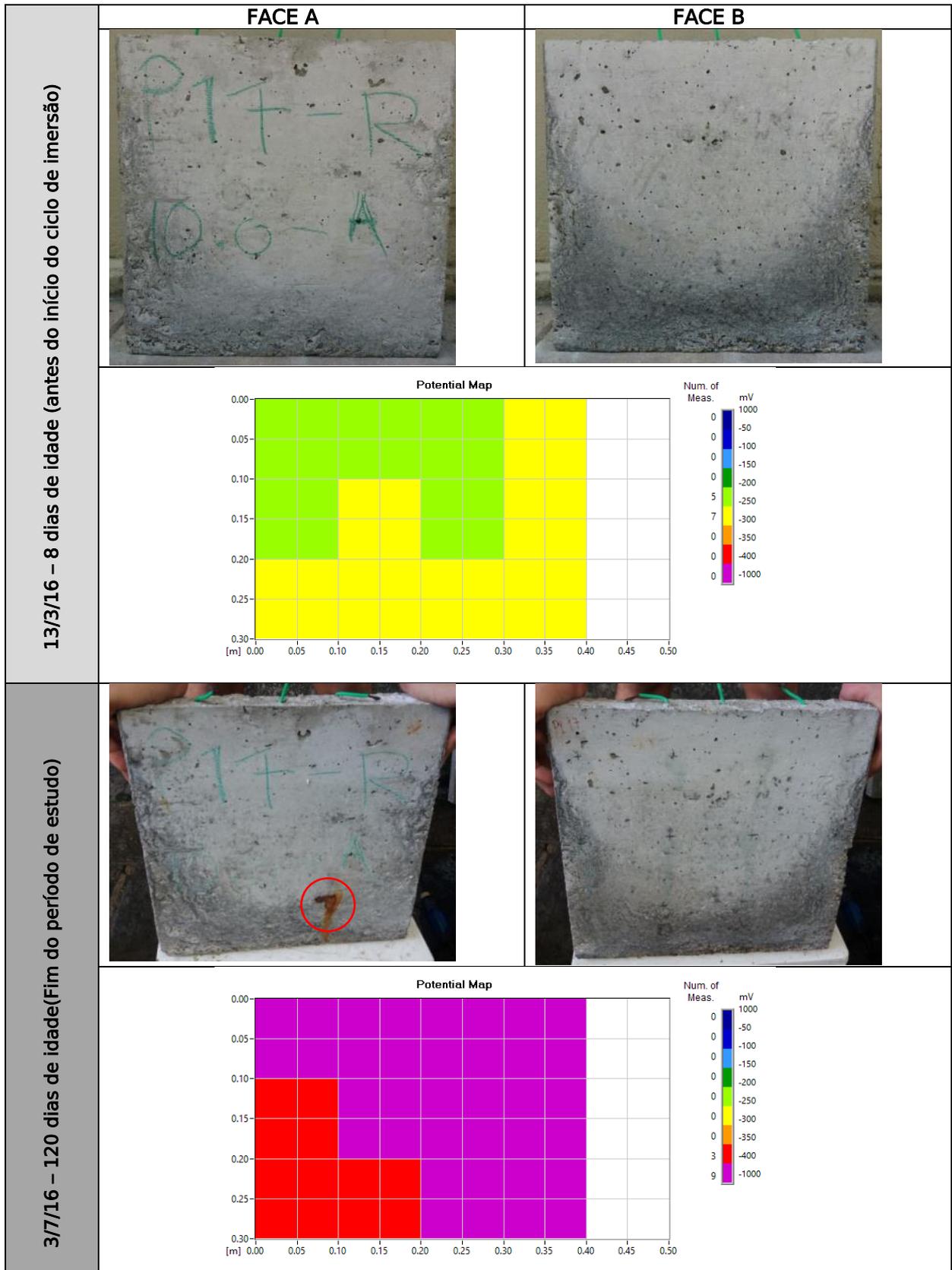


Foto 18-PLACA 18-FAMÍLIA R

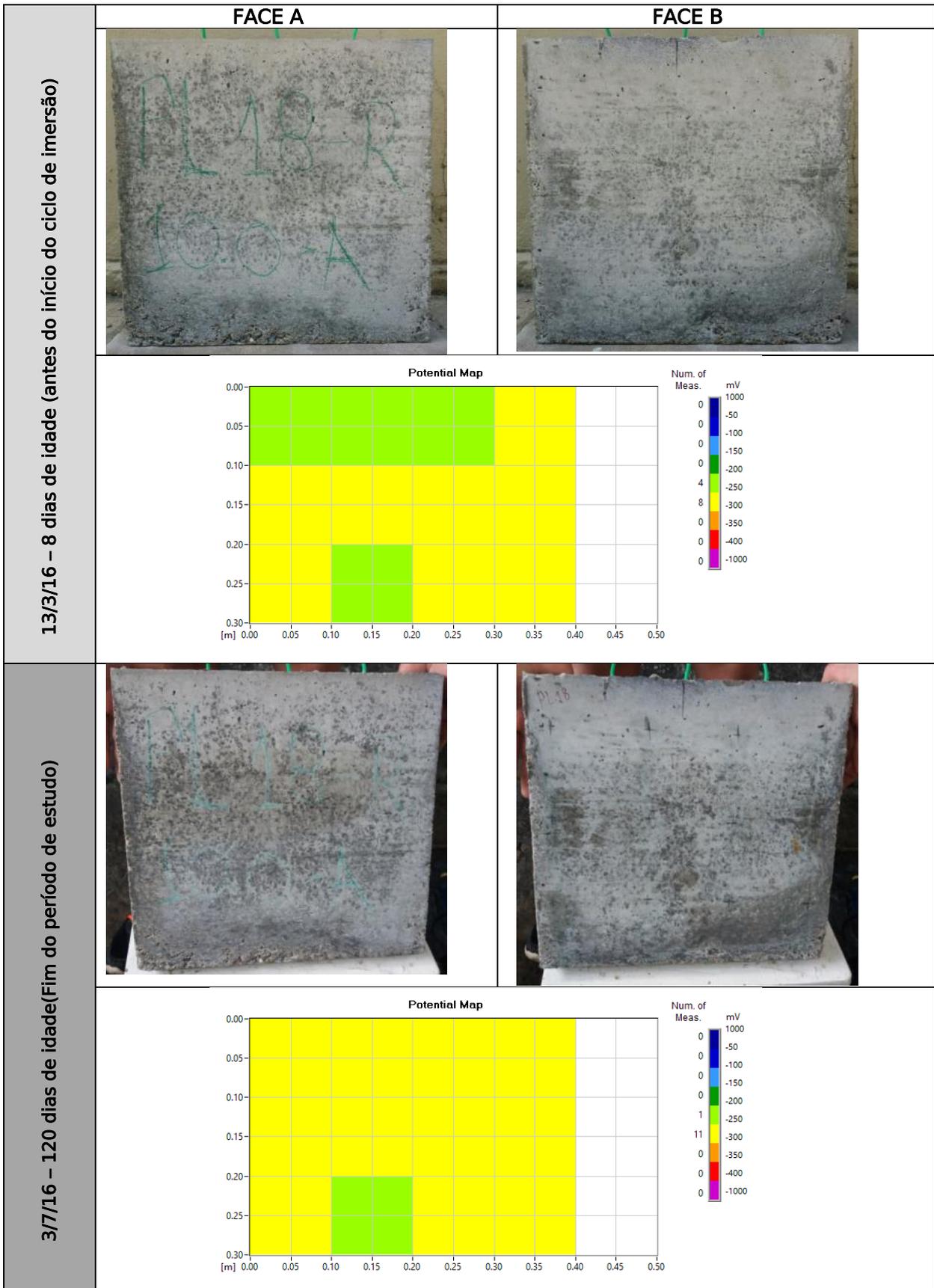


Foto 19-PLACA 19-FAMÍLIA L1

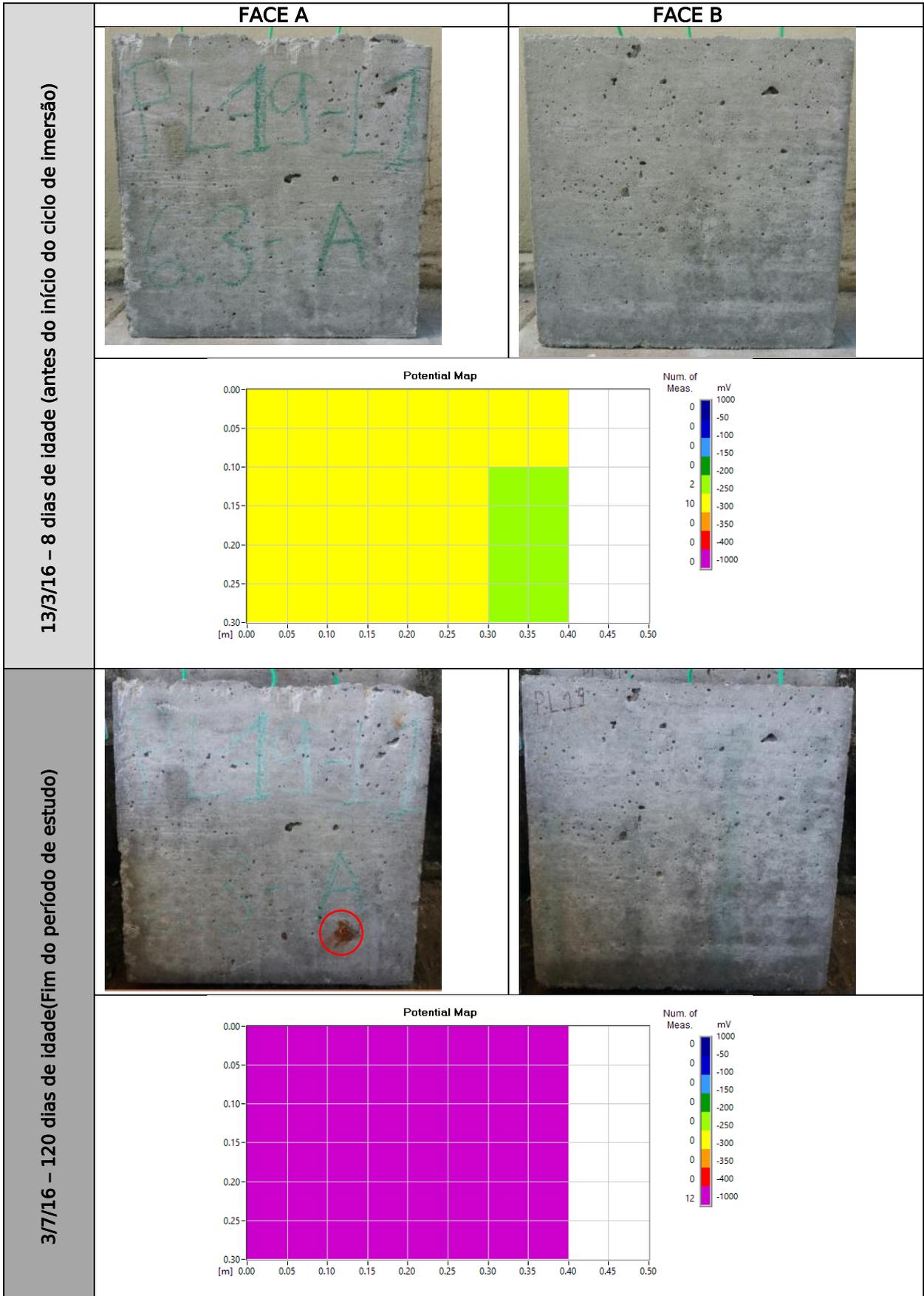


Foto 20-PLACA 20-FAMÍLIA L1

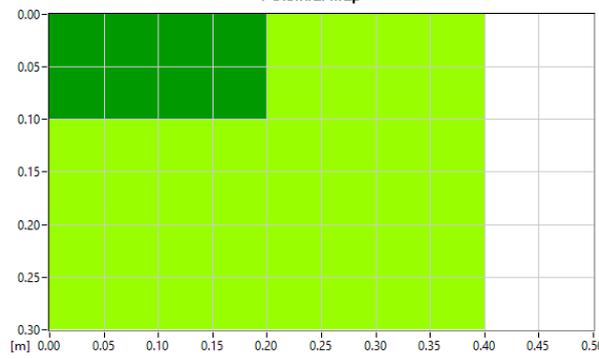
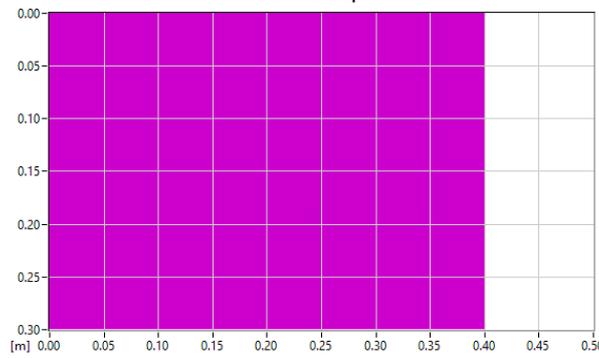
<p>13/3/16 – 8 dias de idade (antes do início do ciclo de imersão)</p>	<p style="text-align: center;"><b>FACE A</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FACE B</b></p> 
<p>3/7/16 – 120 dias de idade (Fim do período de estudo)</p>		
<p style="text-align: center;"><b>Potential Map</b></p>  <p style="text-align: right;">             Num. of Meas.    mV              0    1000              -50              -100              -150              -200              -250              -300              -350              -400              -1000         </p>		
<p style="text-align: center;"><b>Potential Map</b></p>  <p style="text-align: right;">             Num. of Meas.    mV              0    1000              -50              -100              -150              -200              -250              -300              -350              -400              -1000         </p>		

Foto 21-PLACA 21-FAMÍLIA L1

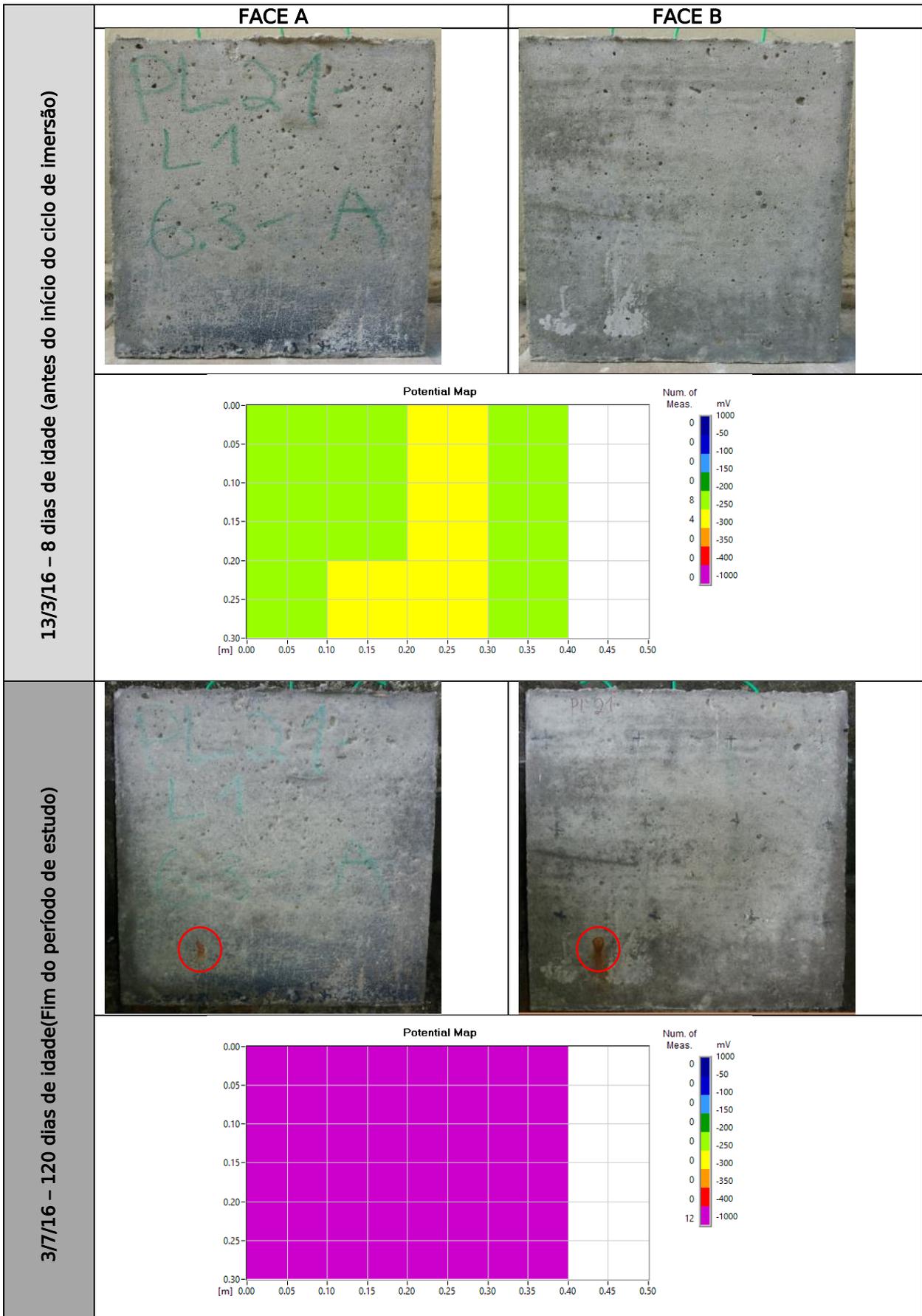


Foto 22-PLACA 22-FAMÍLIA L1

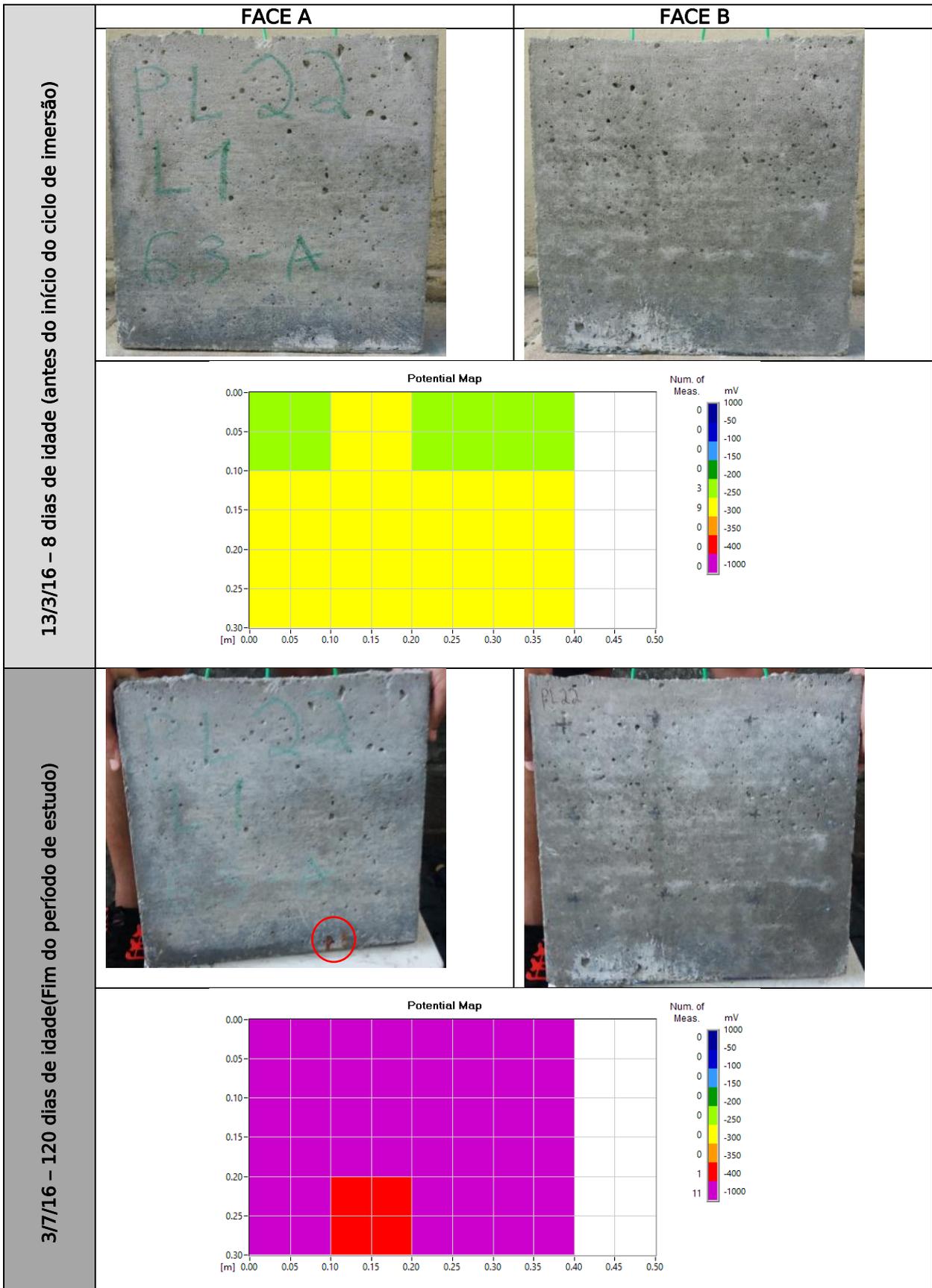


Foto 23-PLACA 23-FAMÍLIA L1

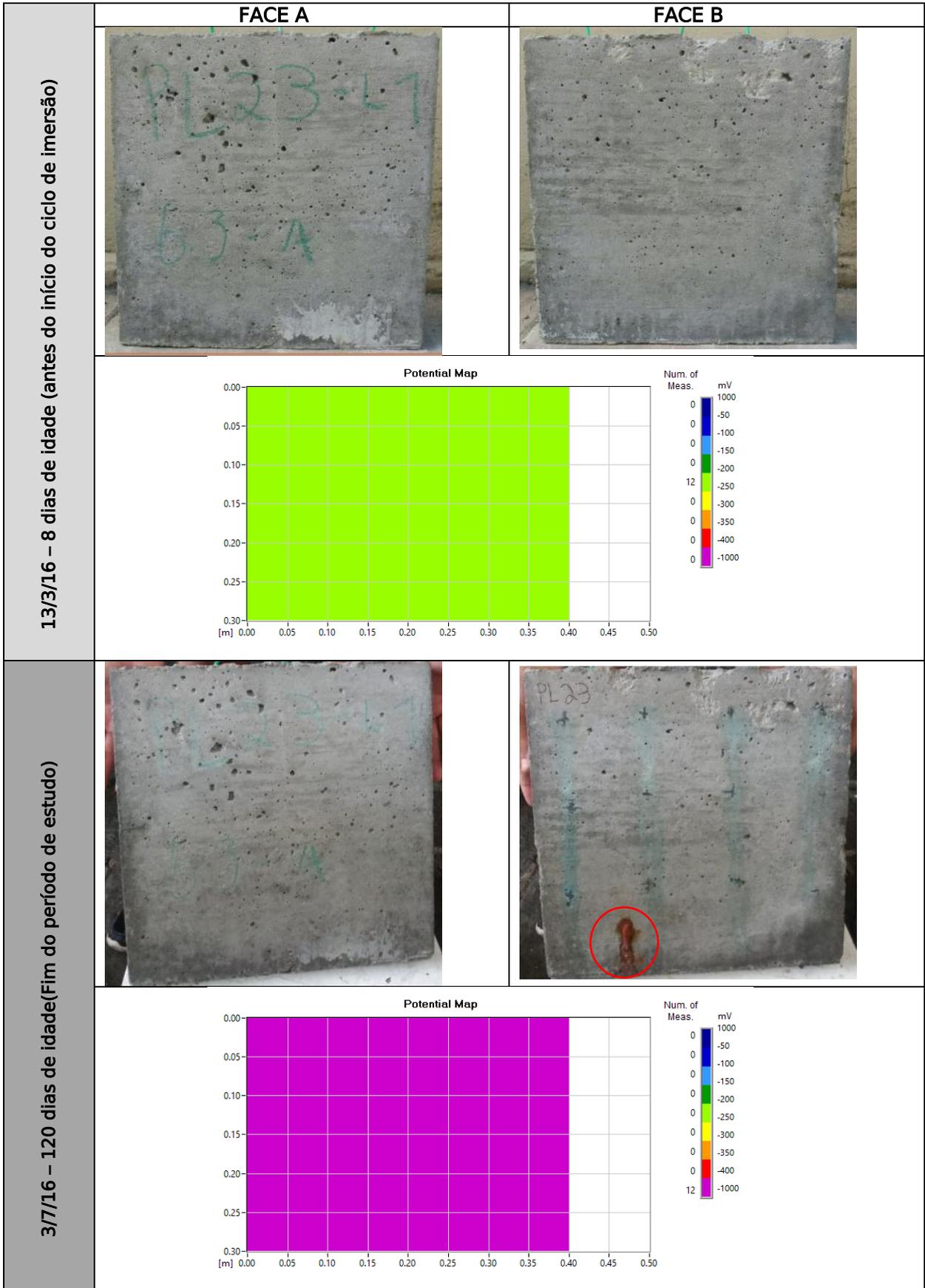


Foto 24-PLACA 24-FAMÍLIA L1

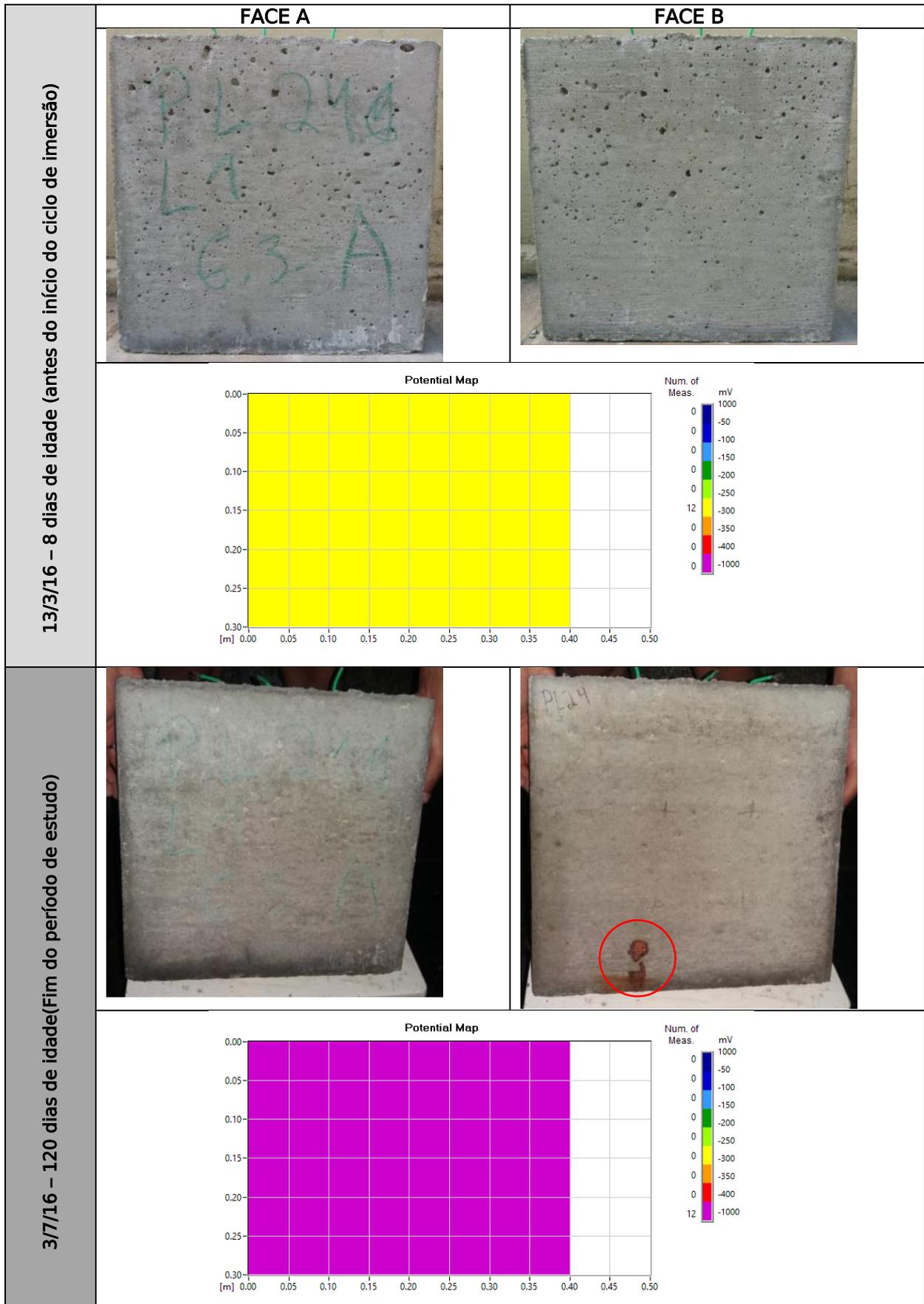


Foto 25-PLACA 25-FAMÍLIA L1

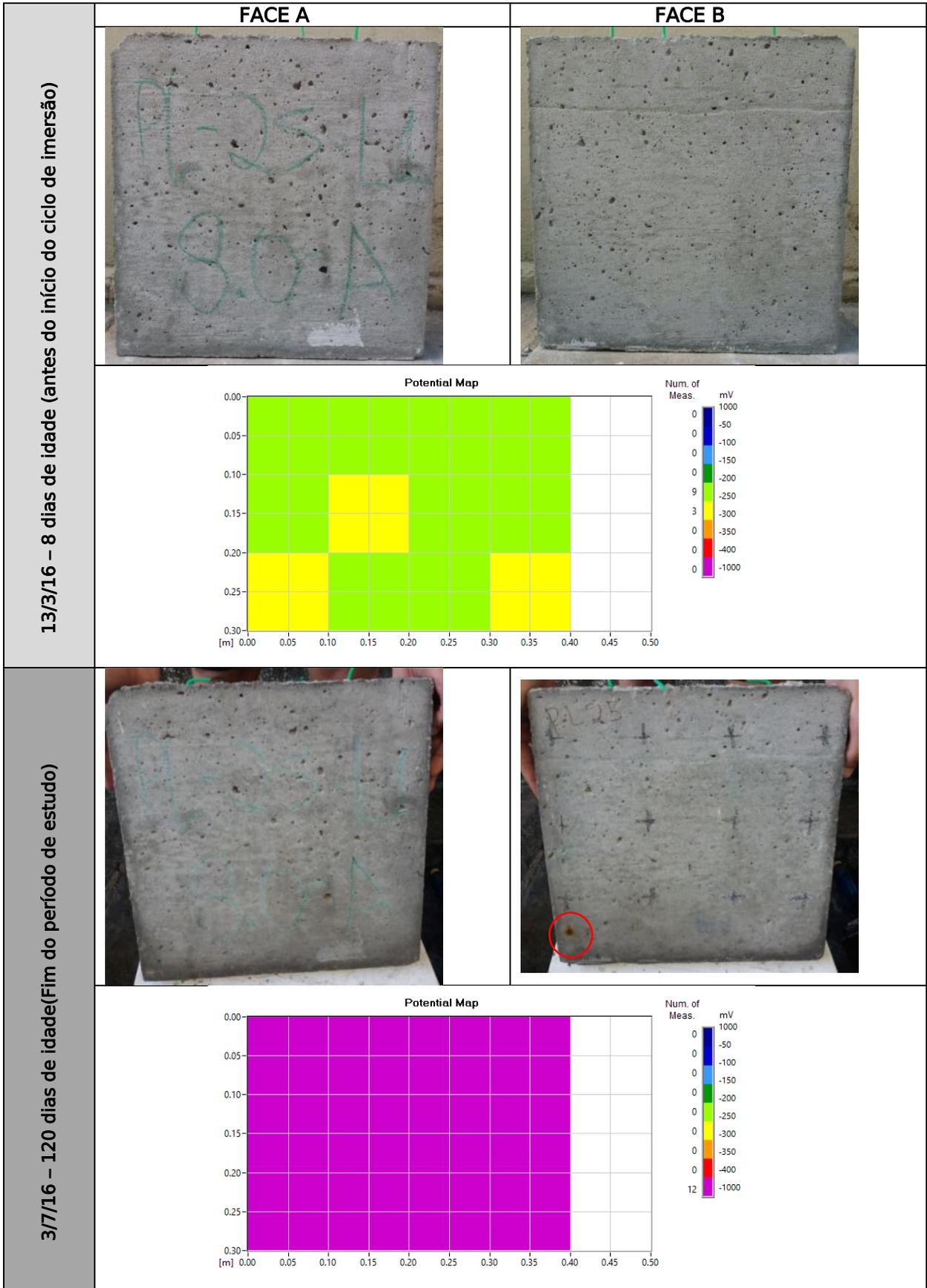


Foto 26-PLACA 26-FAMÍLIA L1

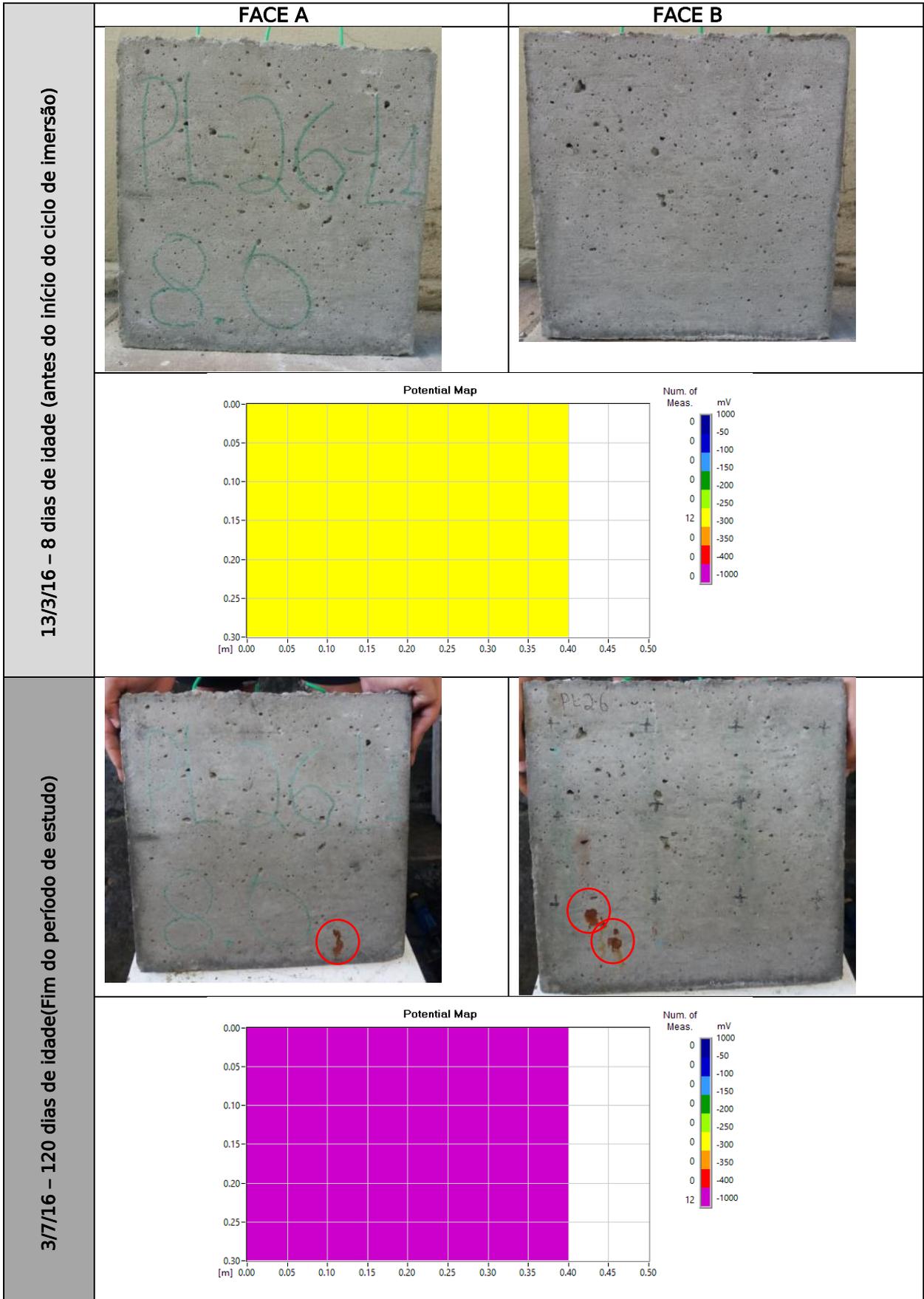


Foto 27-PLACA 27-FAMÍLIA L1

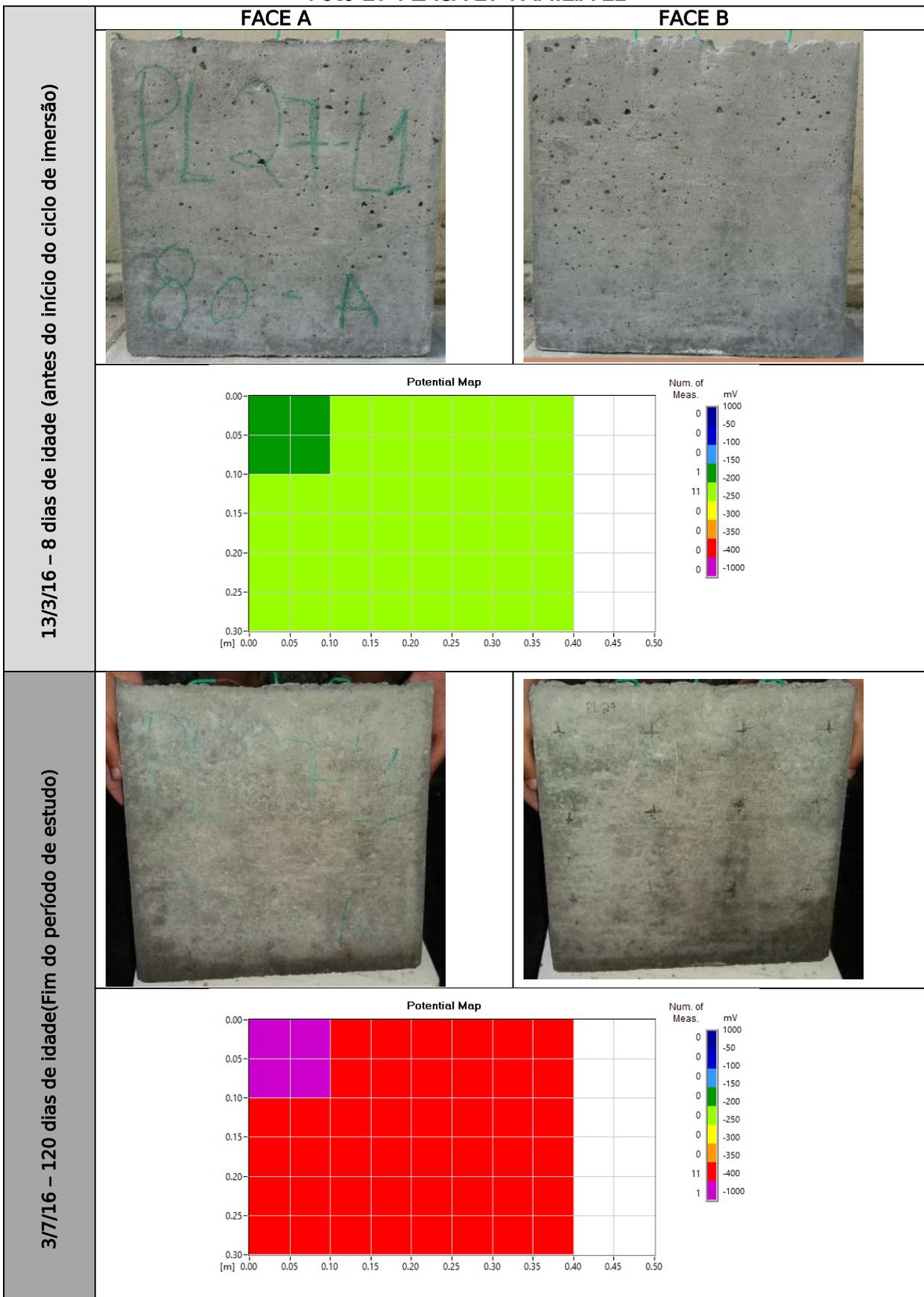


Foto 28-PLACA 28-FAMÍLIA L1

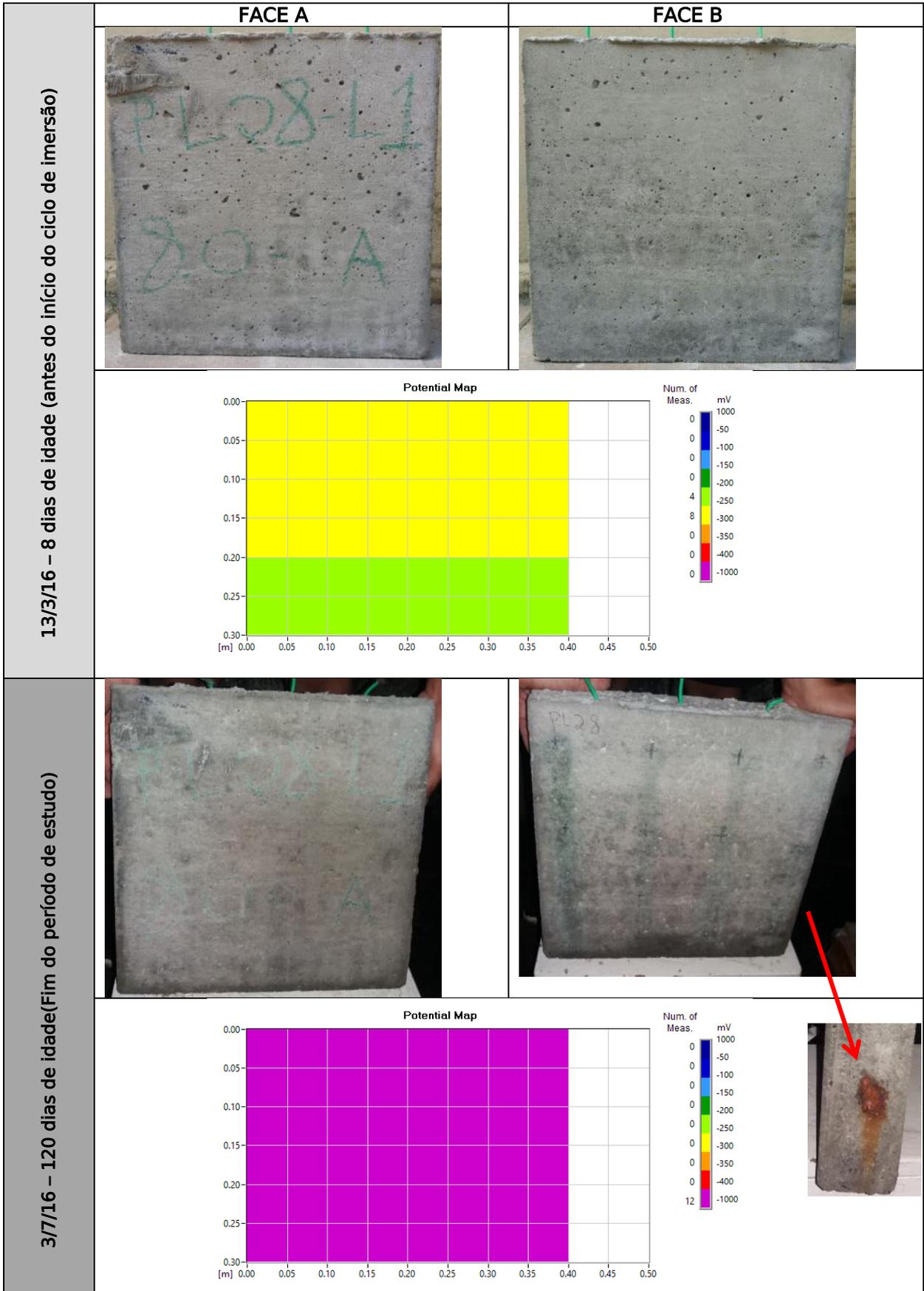


Foto 29-PLACA 29-FAMÍLIA L1

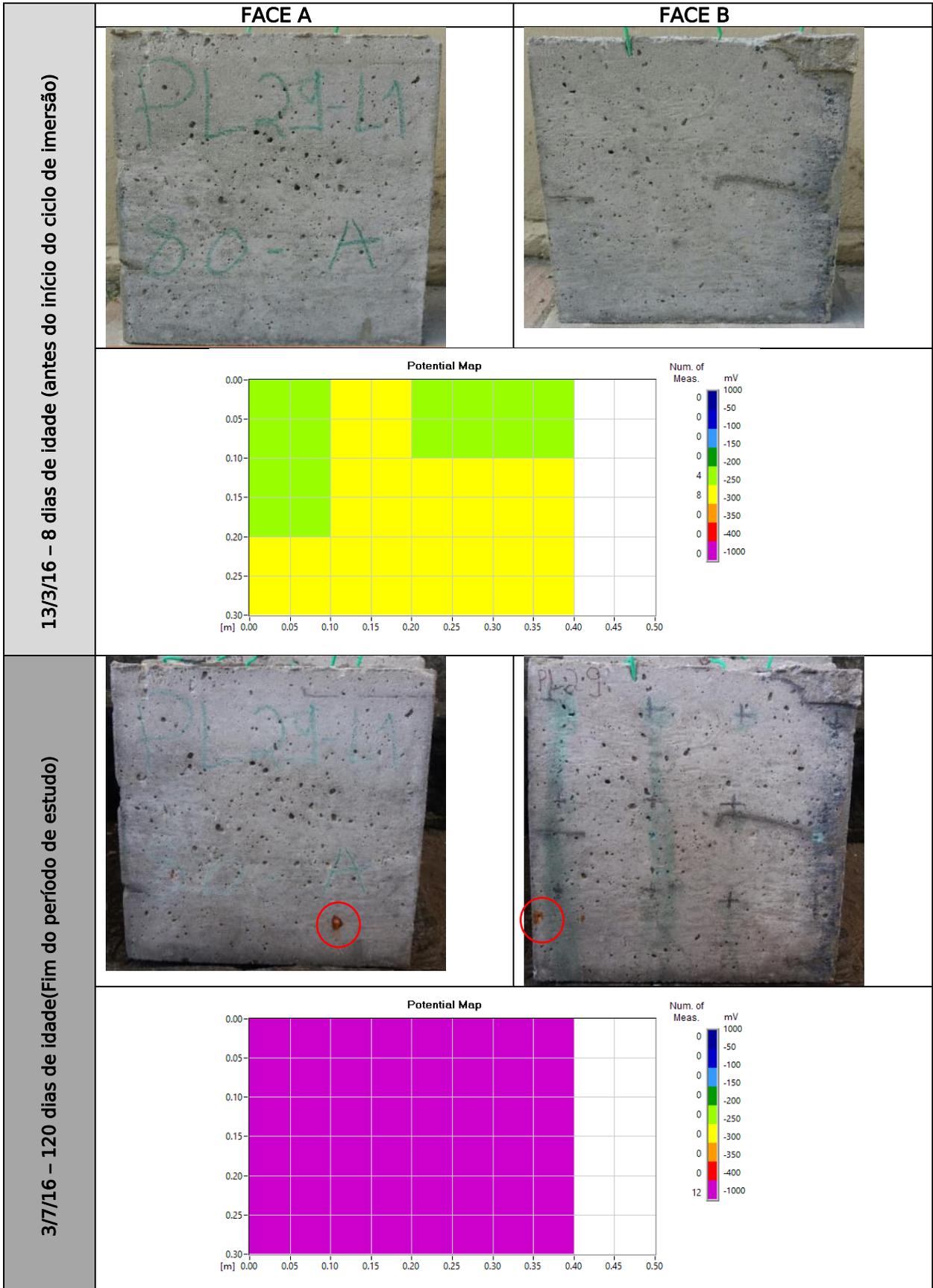


Foto 30-PLACA 30-FAMÍLIA L1

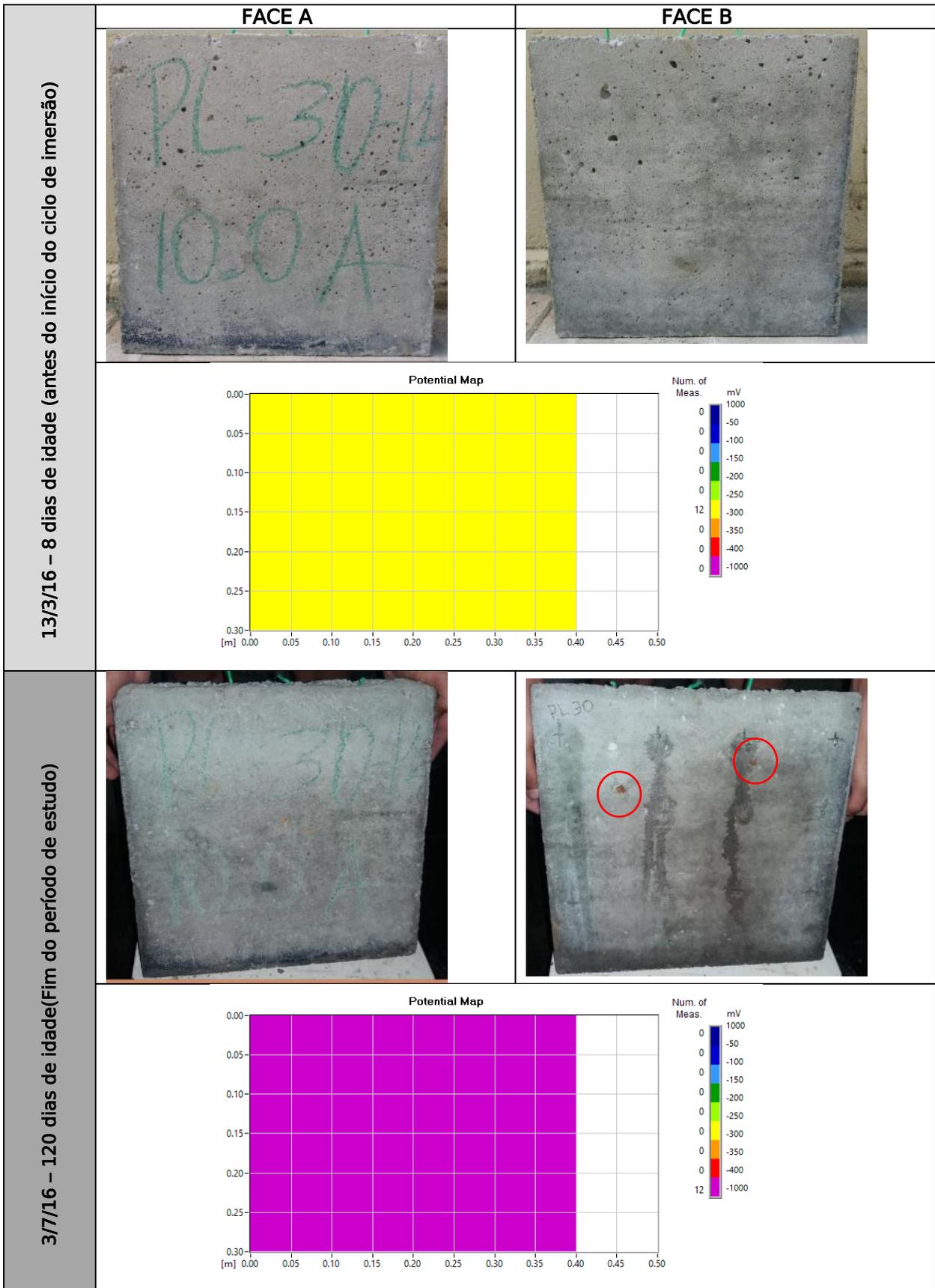


Foto 31-PLACA 31-FAMÍLIA L1

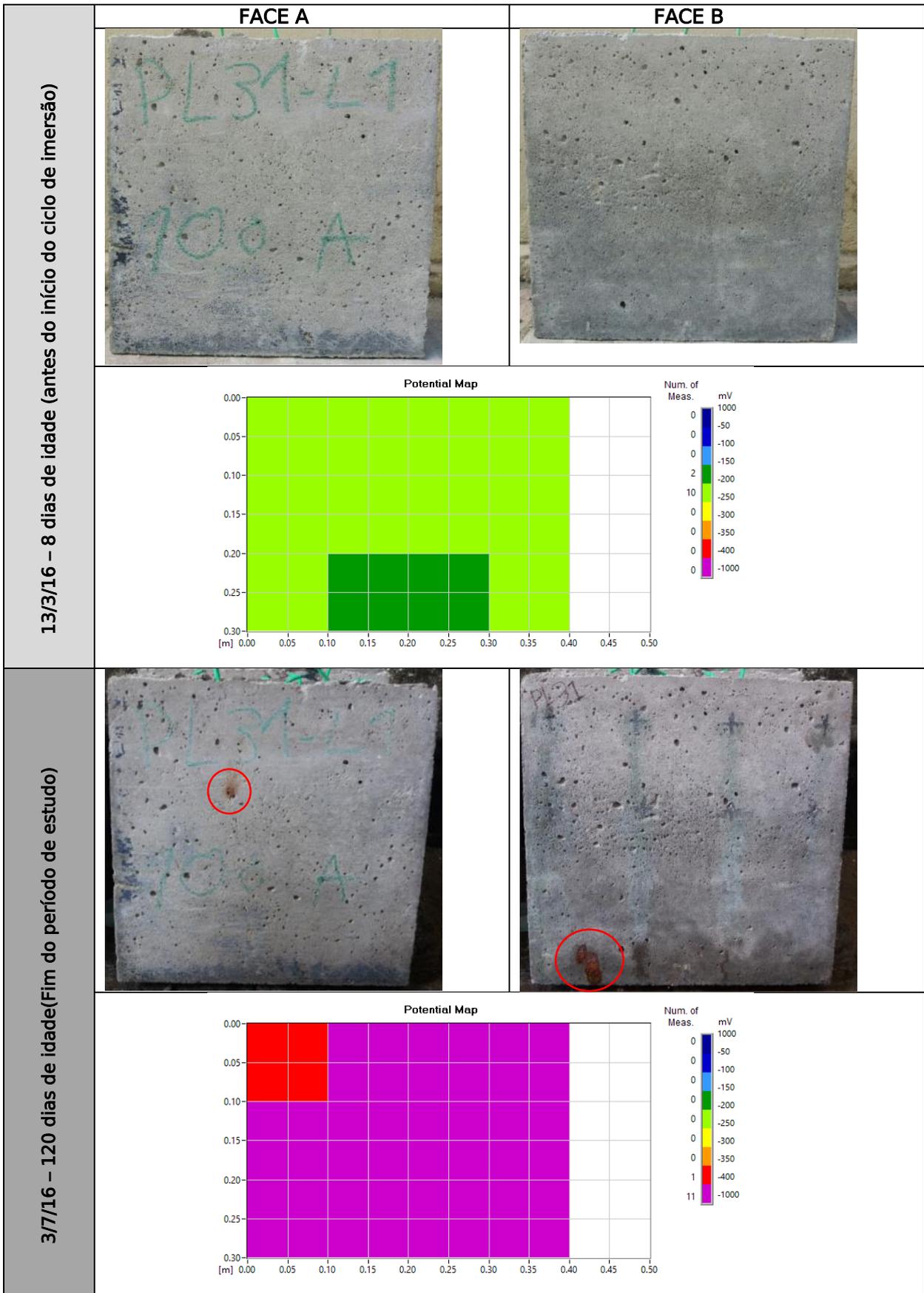


Foto 32-PLACA 32-FAMÍLIA L1

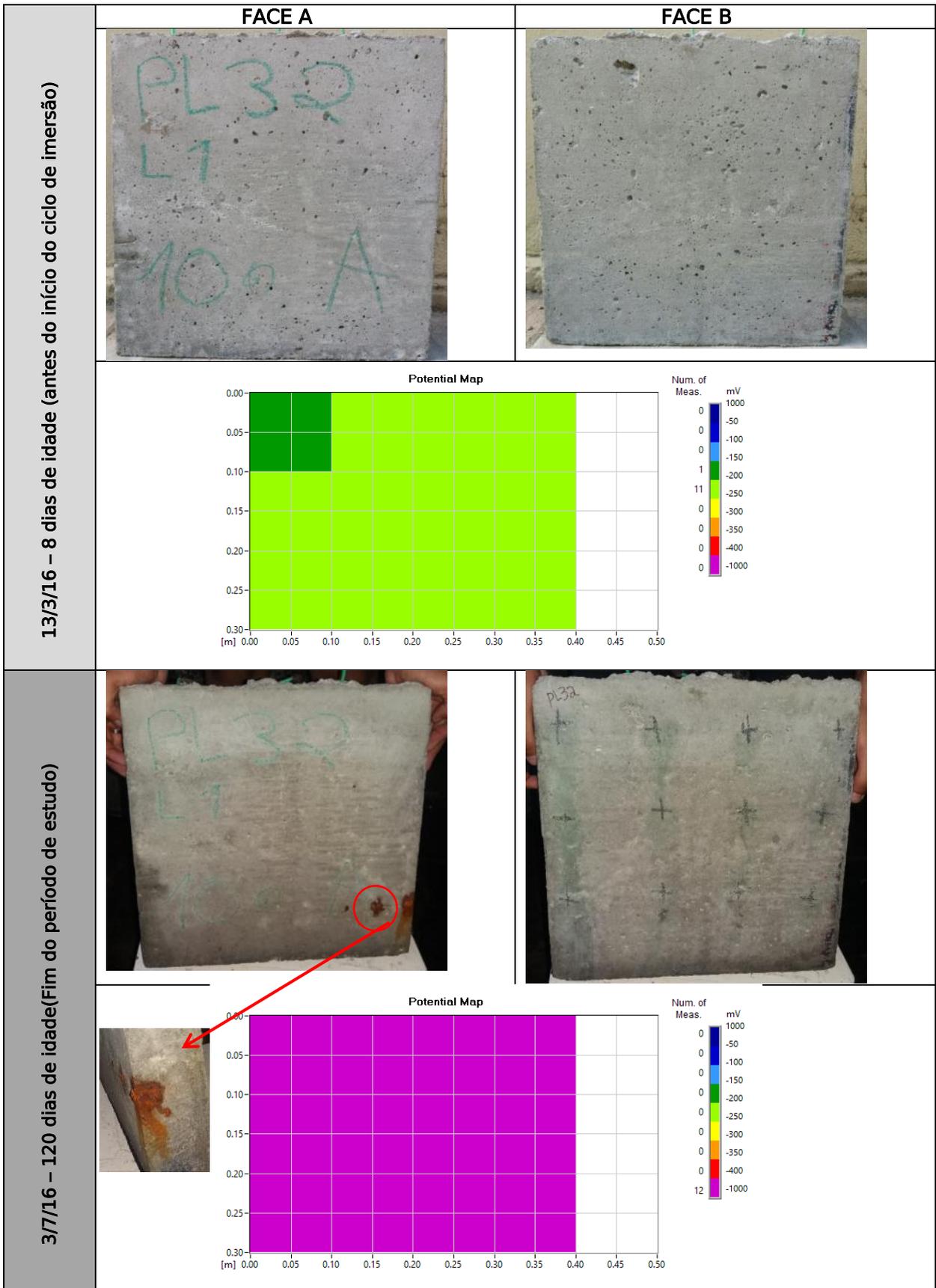


Foto 33-PLACA 33-FAMÍLIA L1

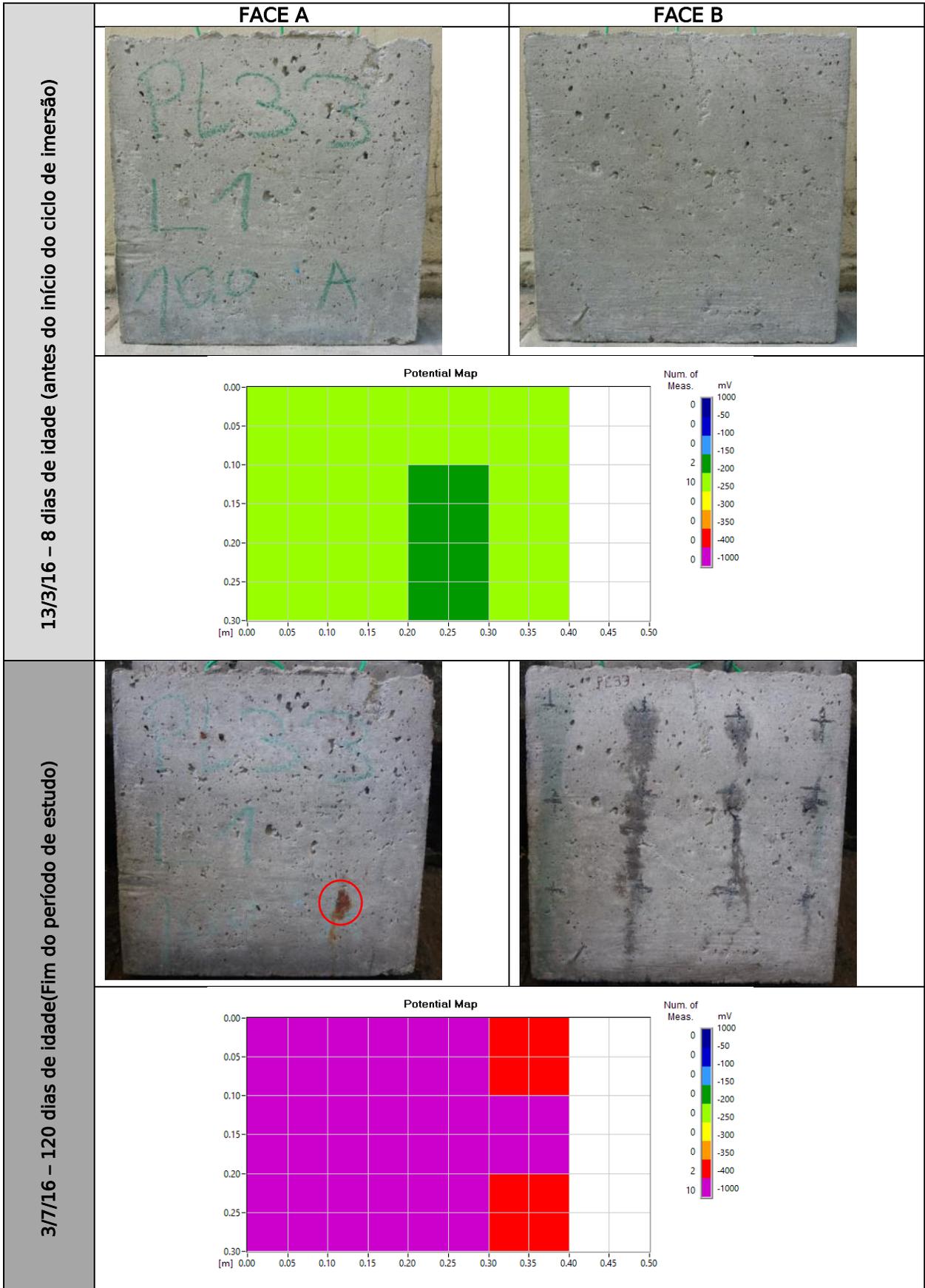


Foto 34-PLACA 34-FAMÍLIA L1

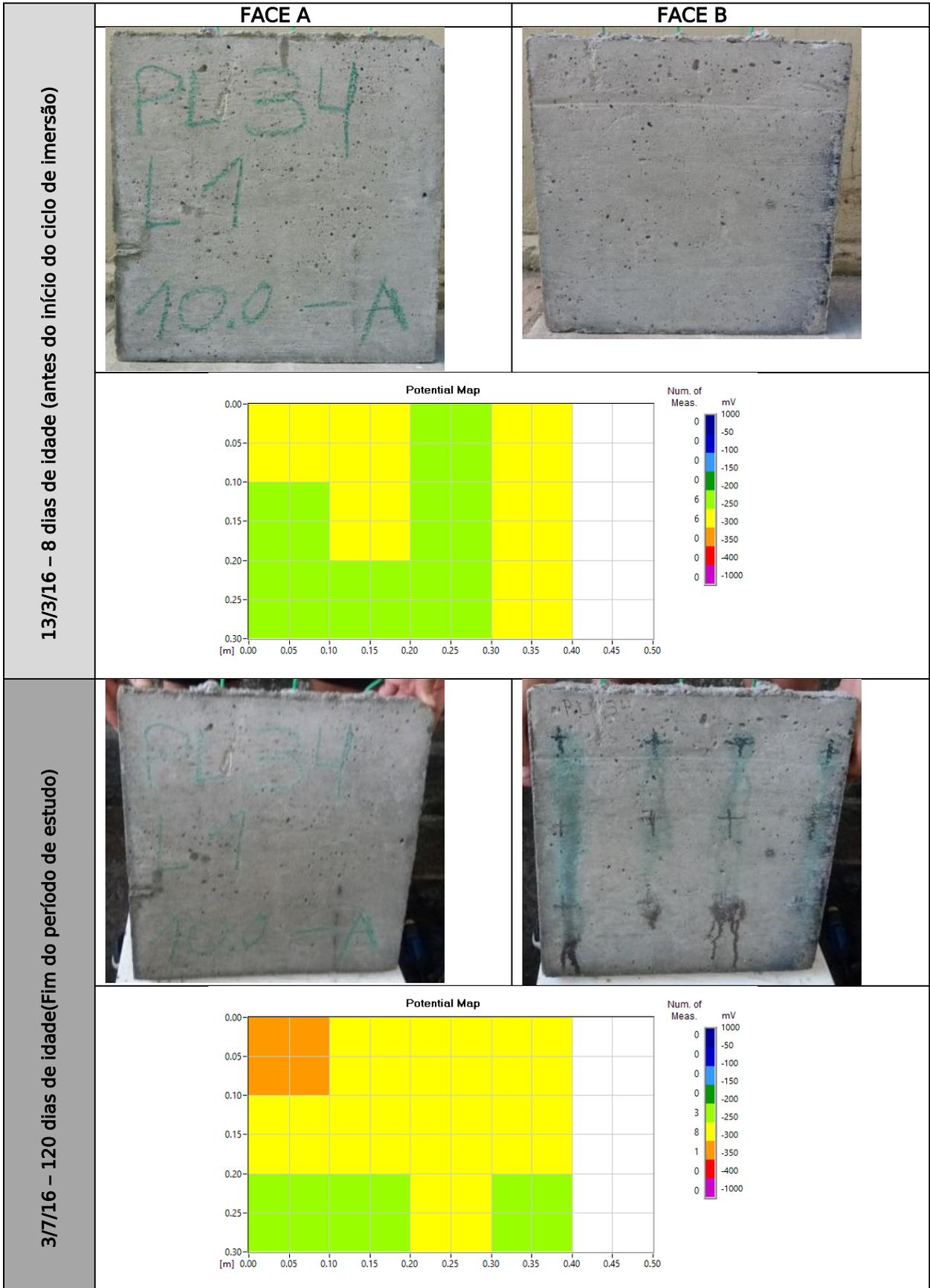


Foto 35-PLACA 35-FAMÍLIA L1

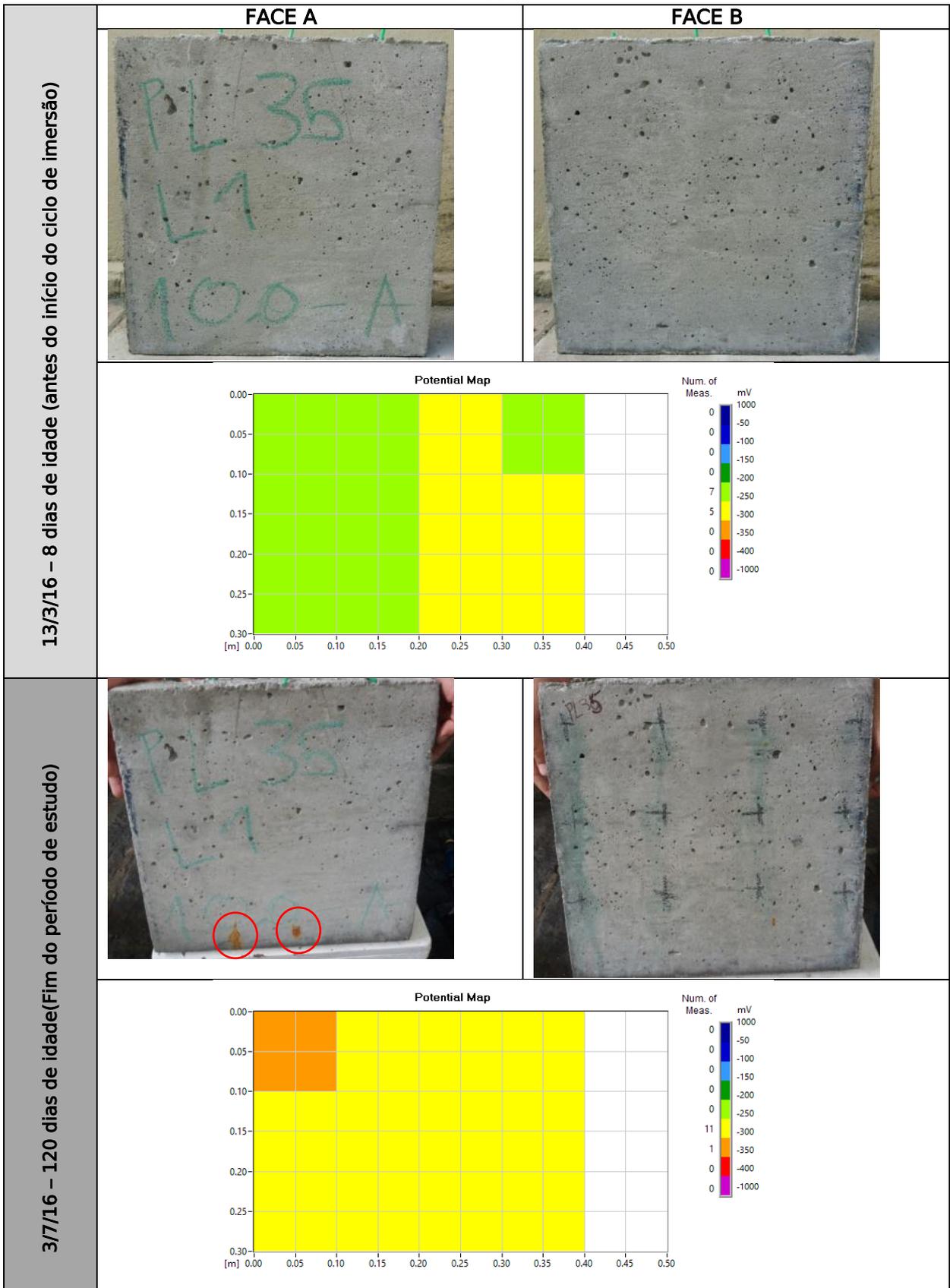


Foto 36-PLACA 36-FAMÍLIA L1

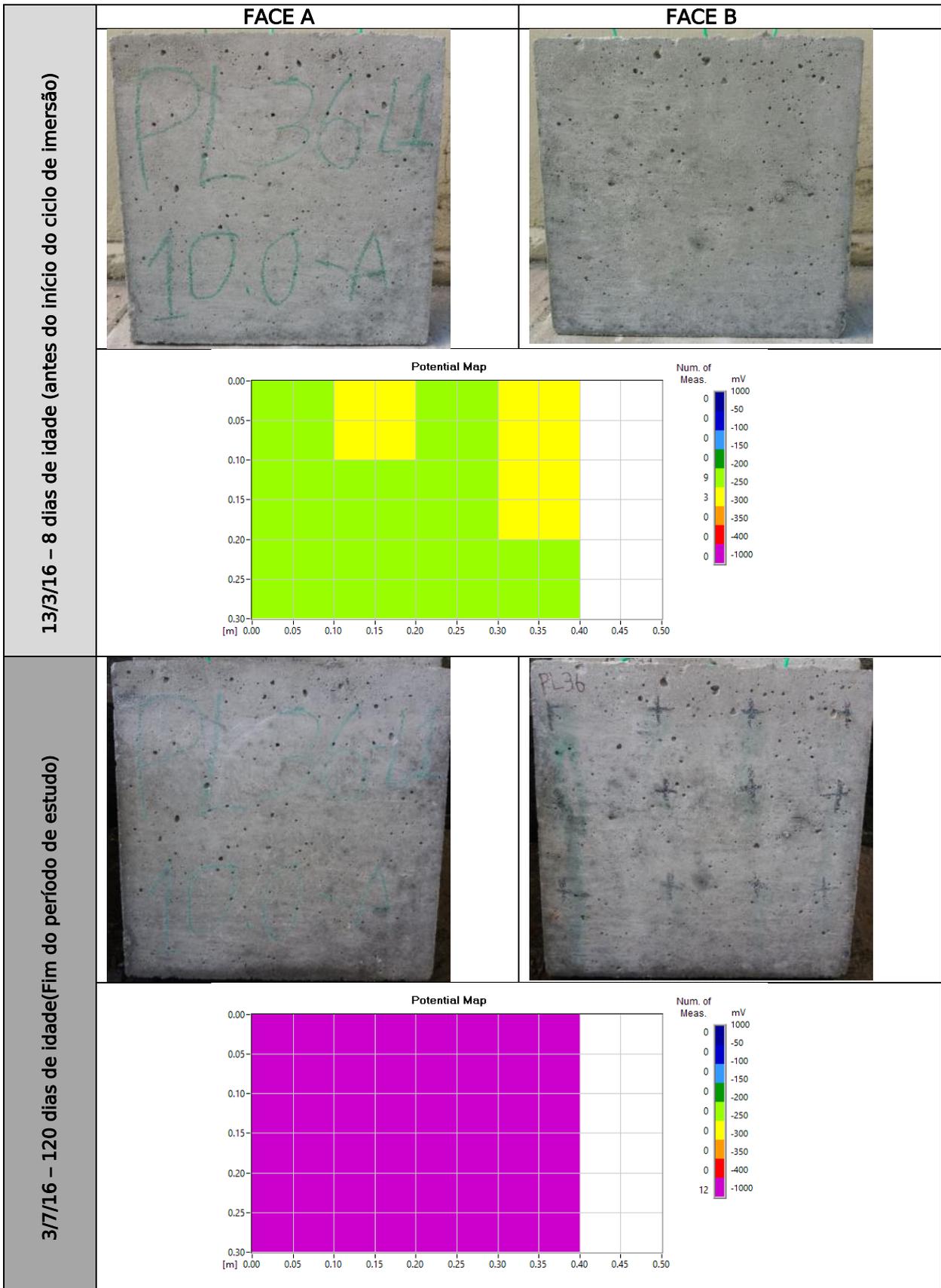


Foto 37-PLACA 37-FAMÍLIA L2

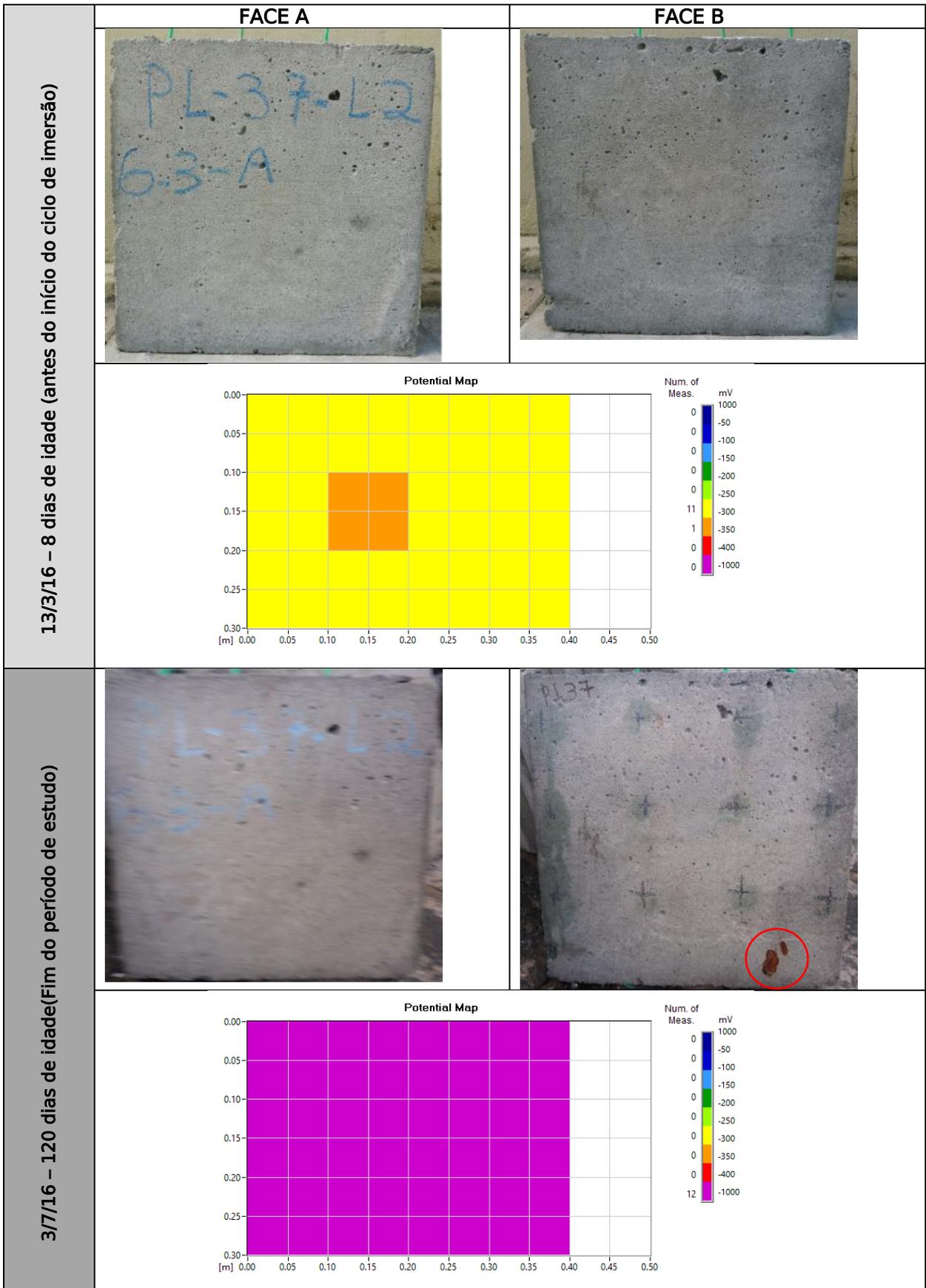


Foto 38-PLACA 38-FAMÍLIA L2

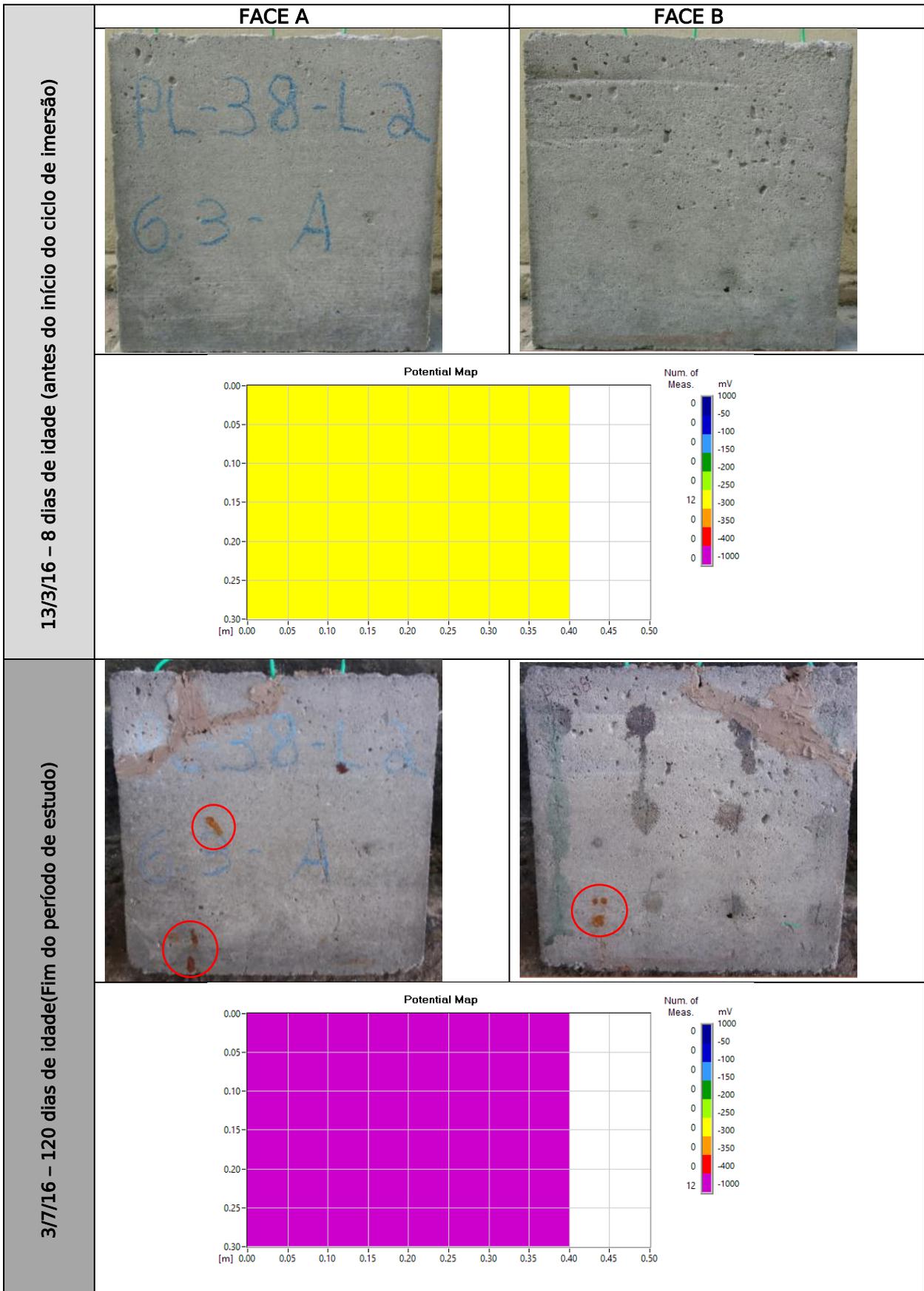


Foto 39-PLACA 39-FAMÍLIA L2

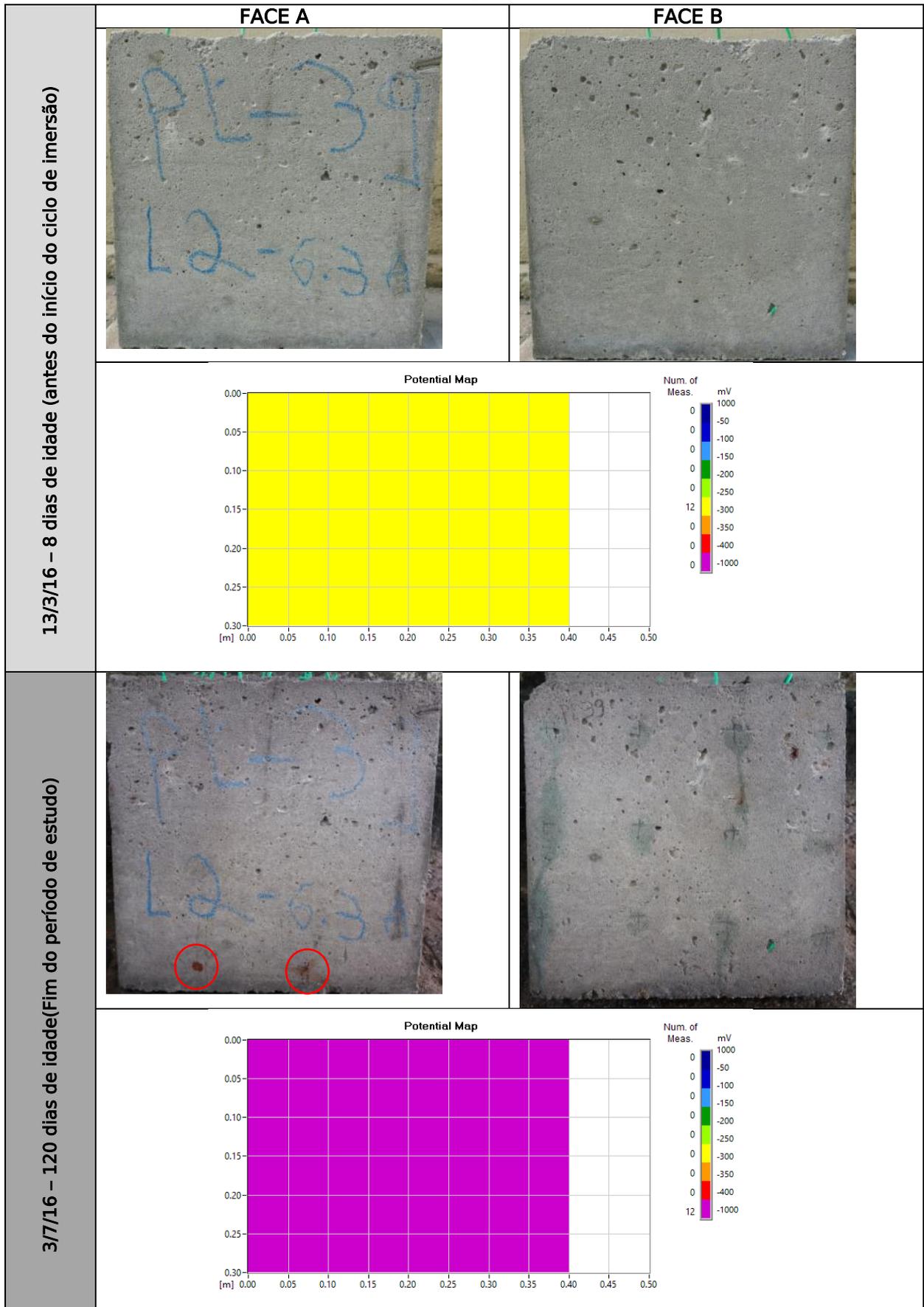


Foto 40-PLACA 40-FAMÍLIA L2

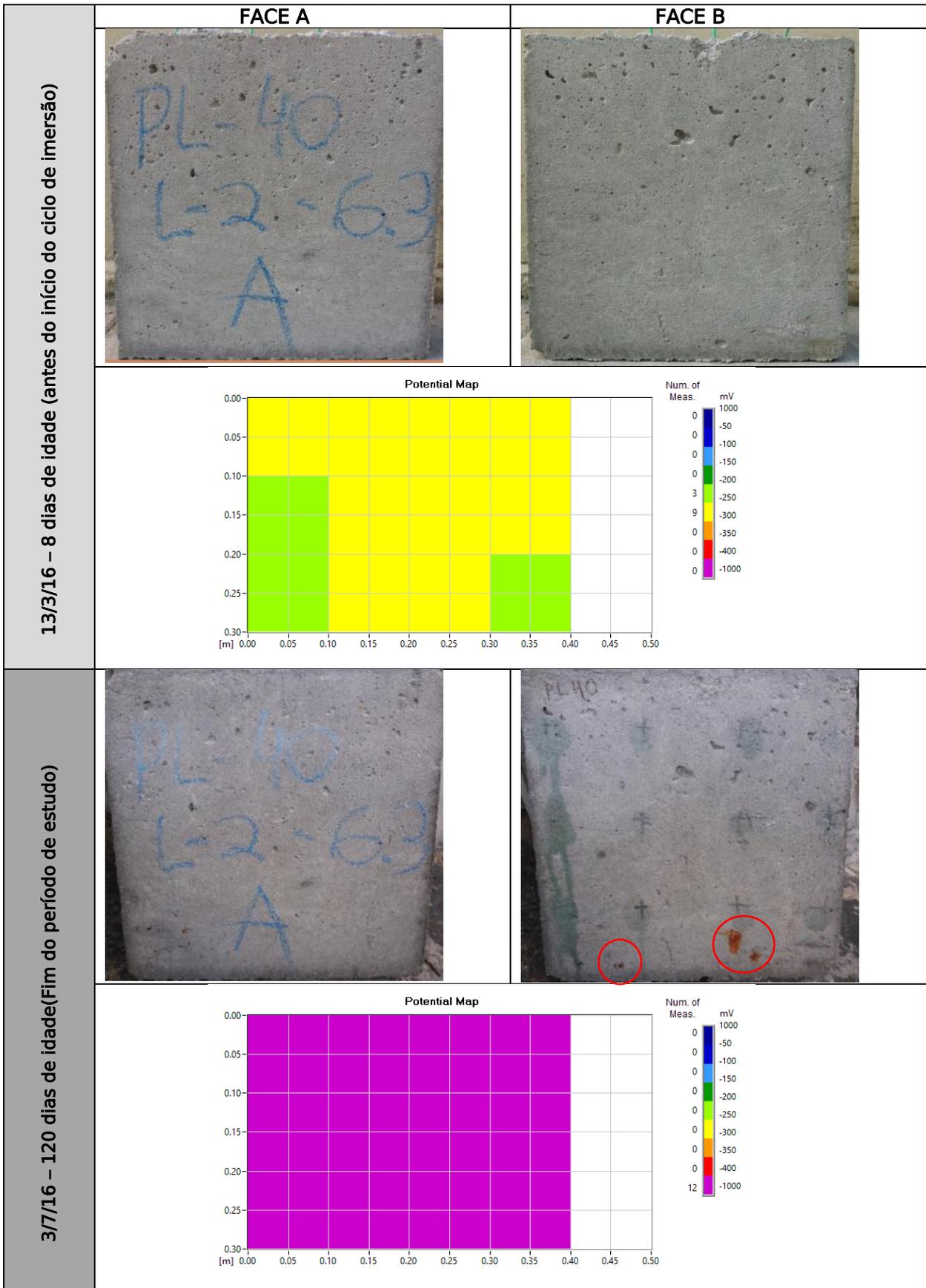


Foto 41-PLACA 41-FAMÍLIA L2

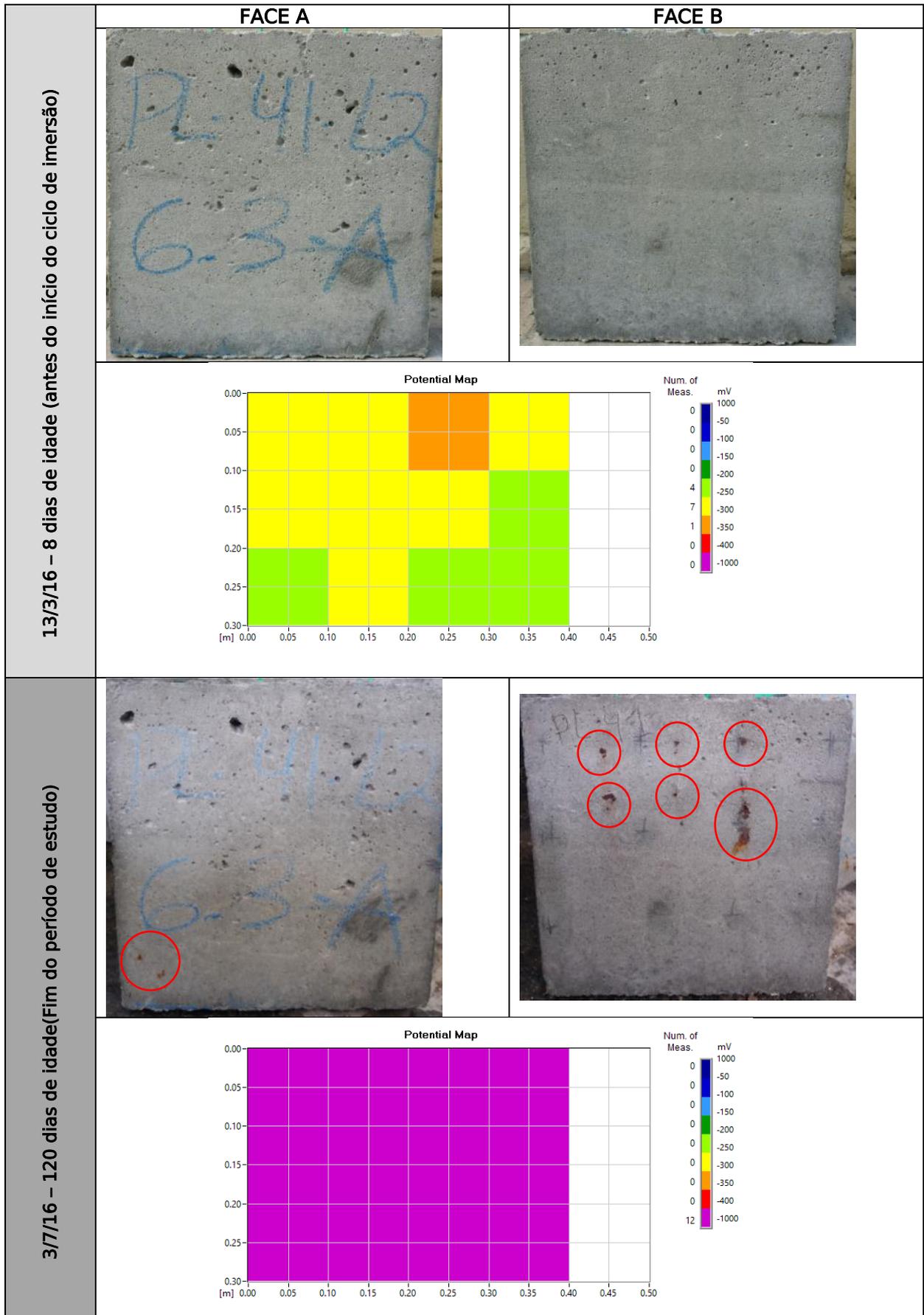


Foto 42-PLACA 42-FAMÍLIA L2

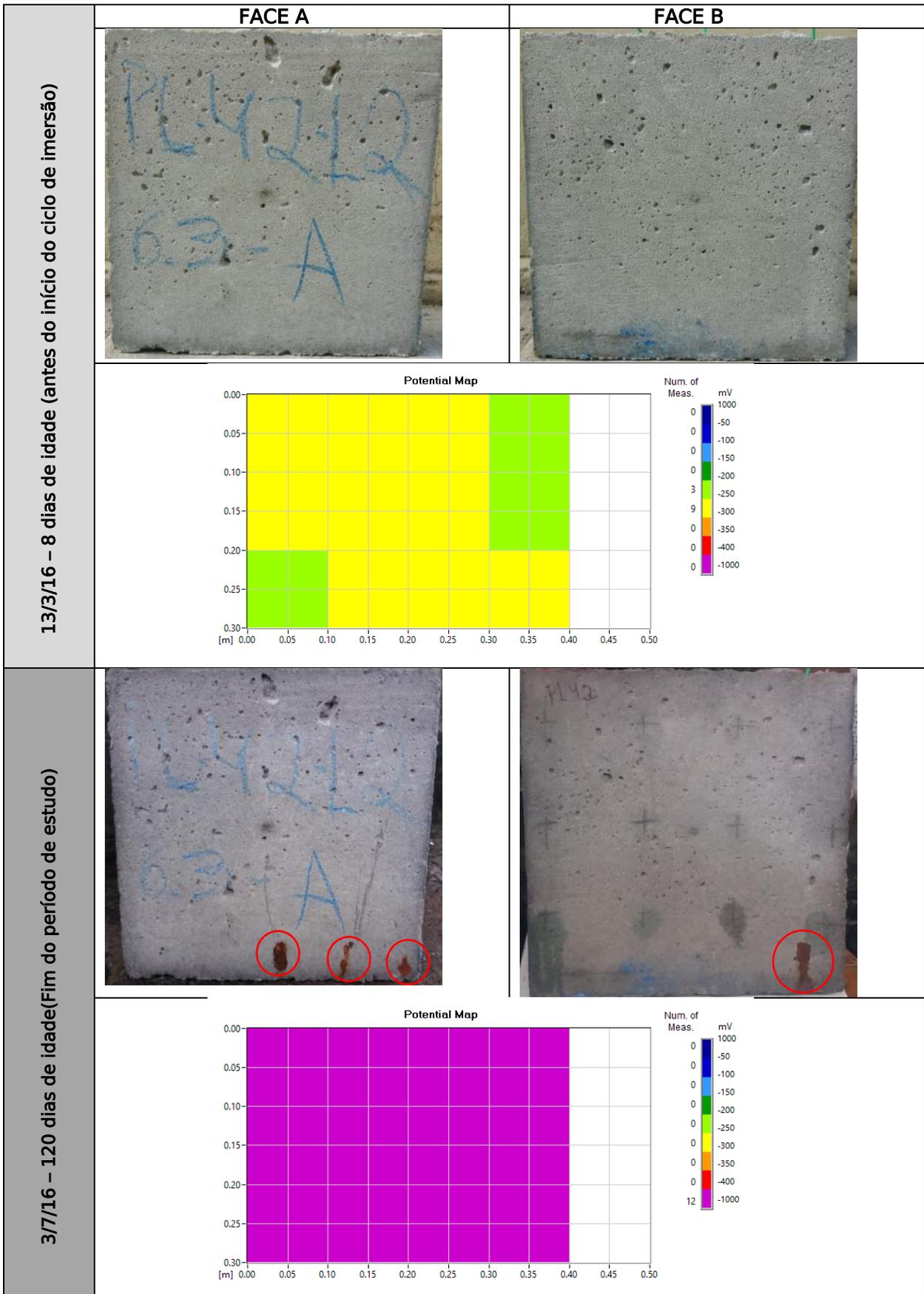


Foto 43-PLACA 43-FAMÍLIA L2

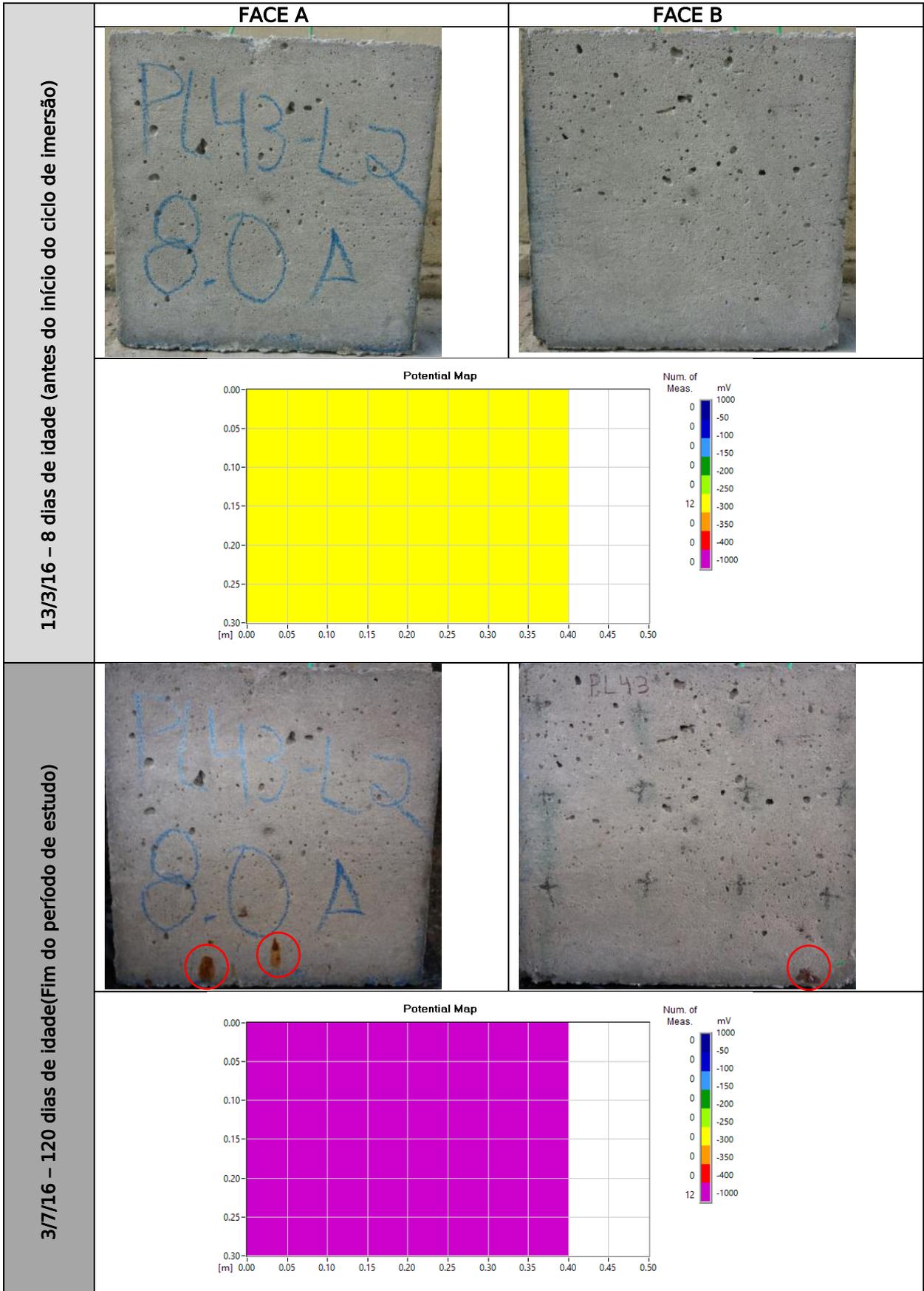


Foto 44-PLACA 44-FAMÍLIA L2

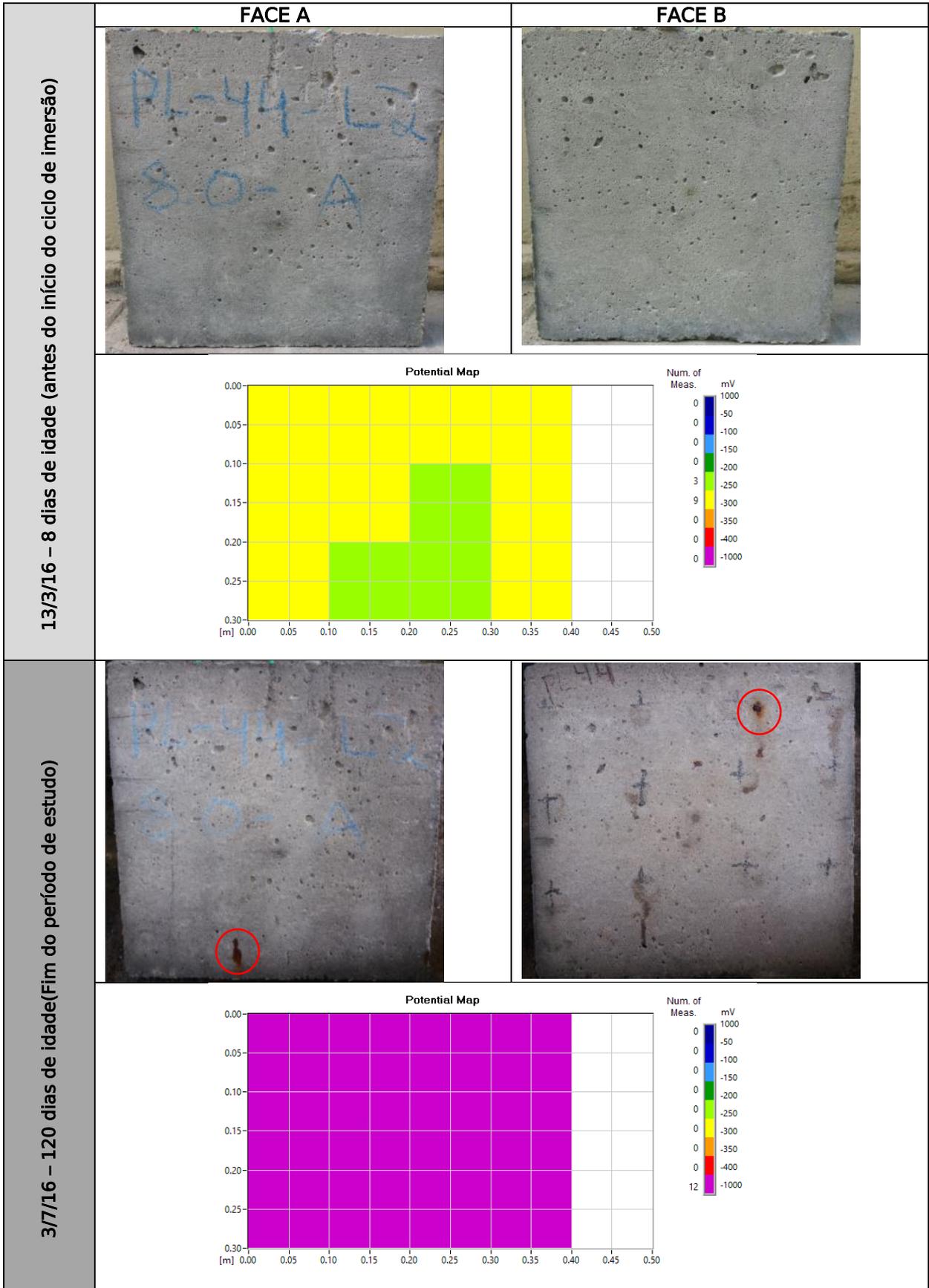


Foto 45-PLACA 45-FAMÍLIA L2

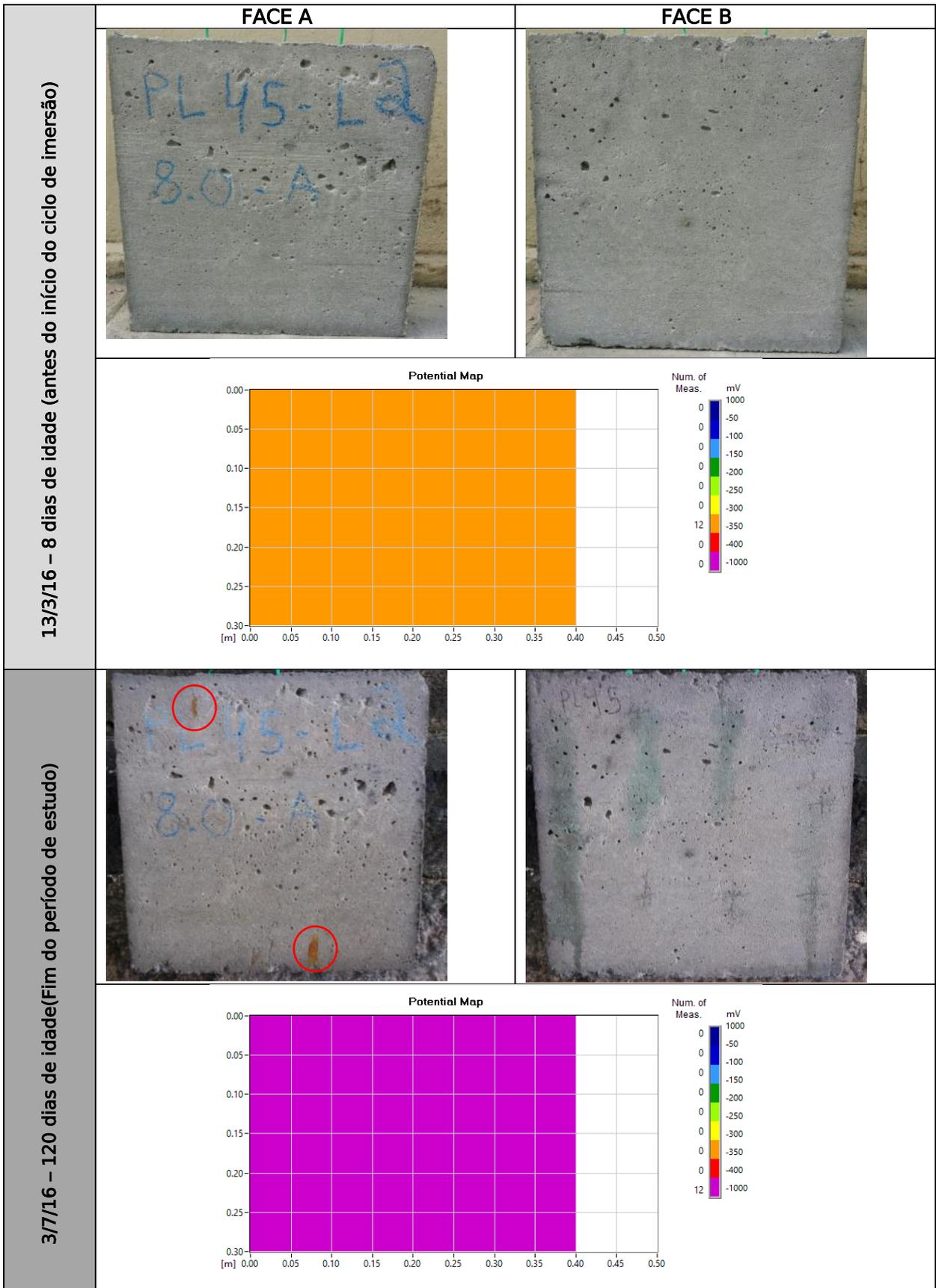


Foto 46-PLACA 46-FAMÍLIA L2

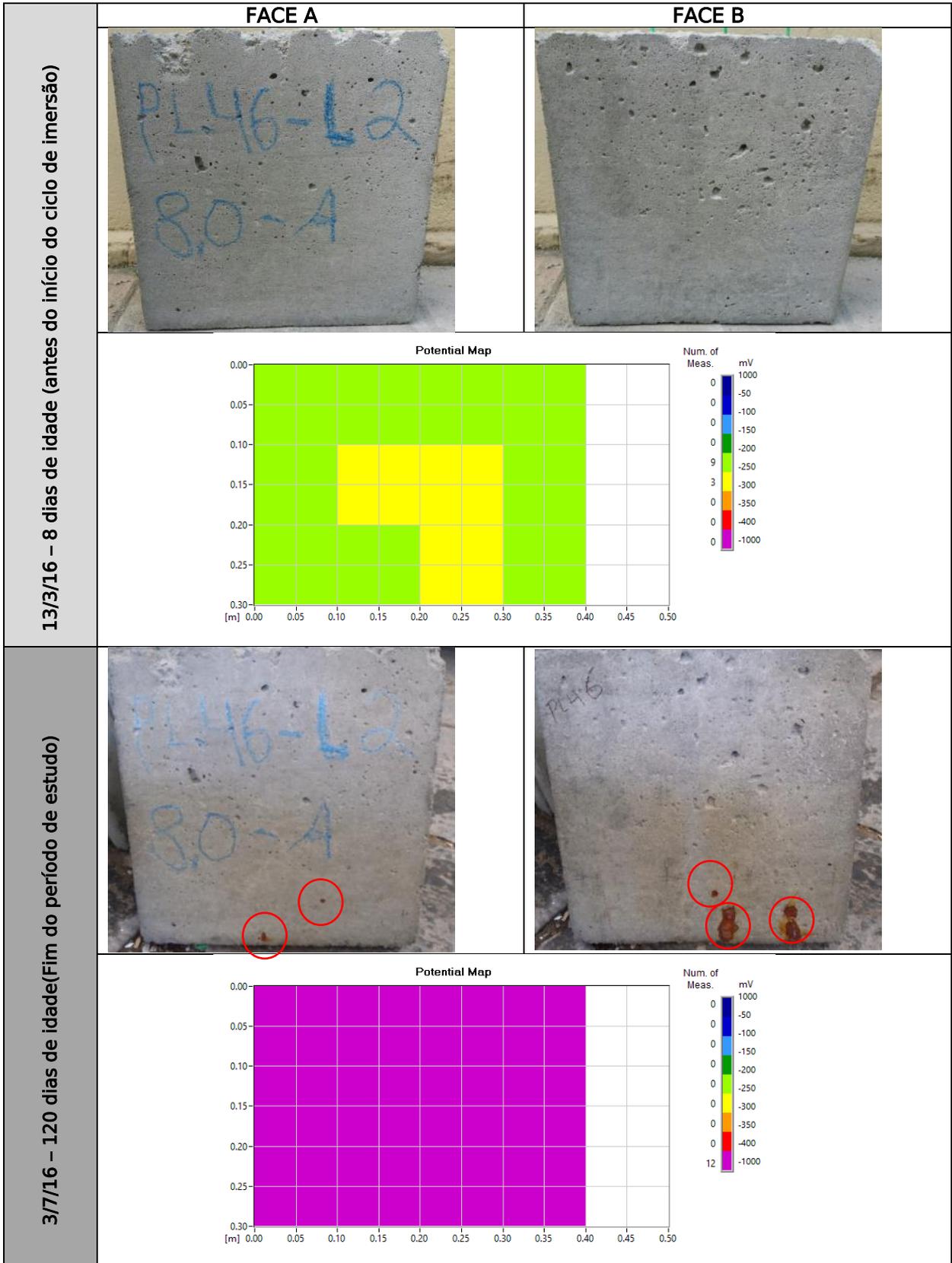


Foto 47-PLACA 47-FAMÍLIA L2

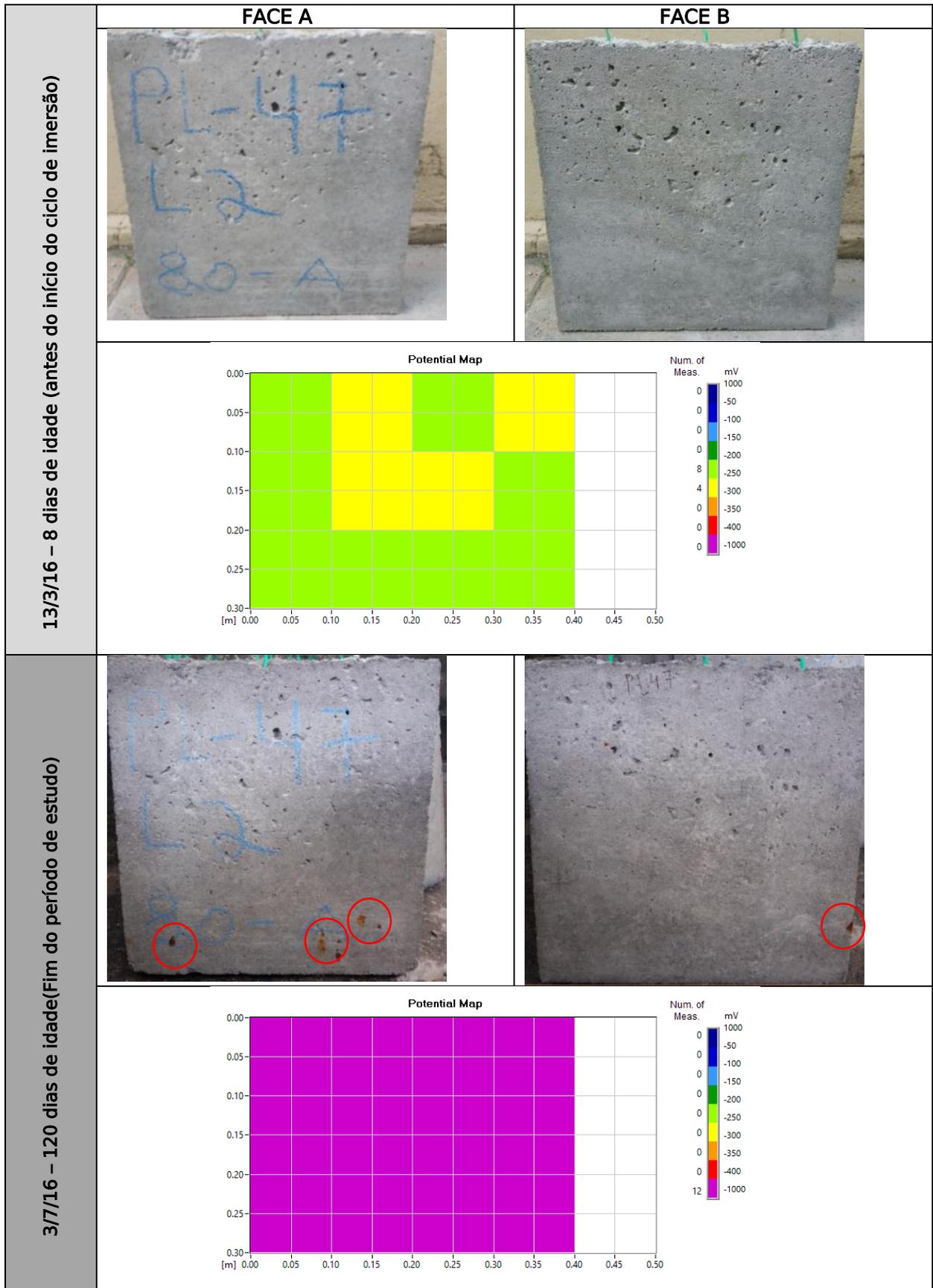


Foto 48-PLACA 48-FAMÍLIA L2

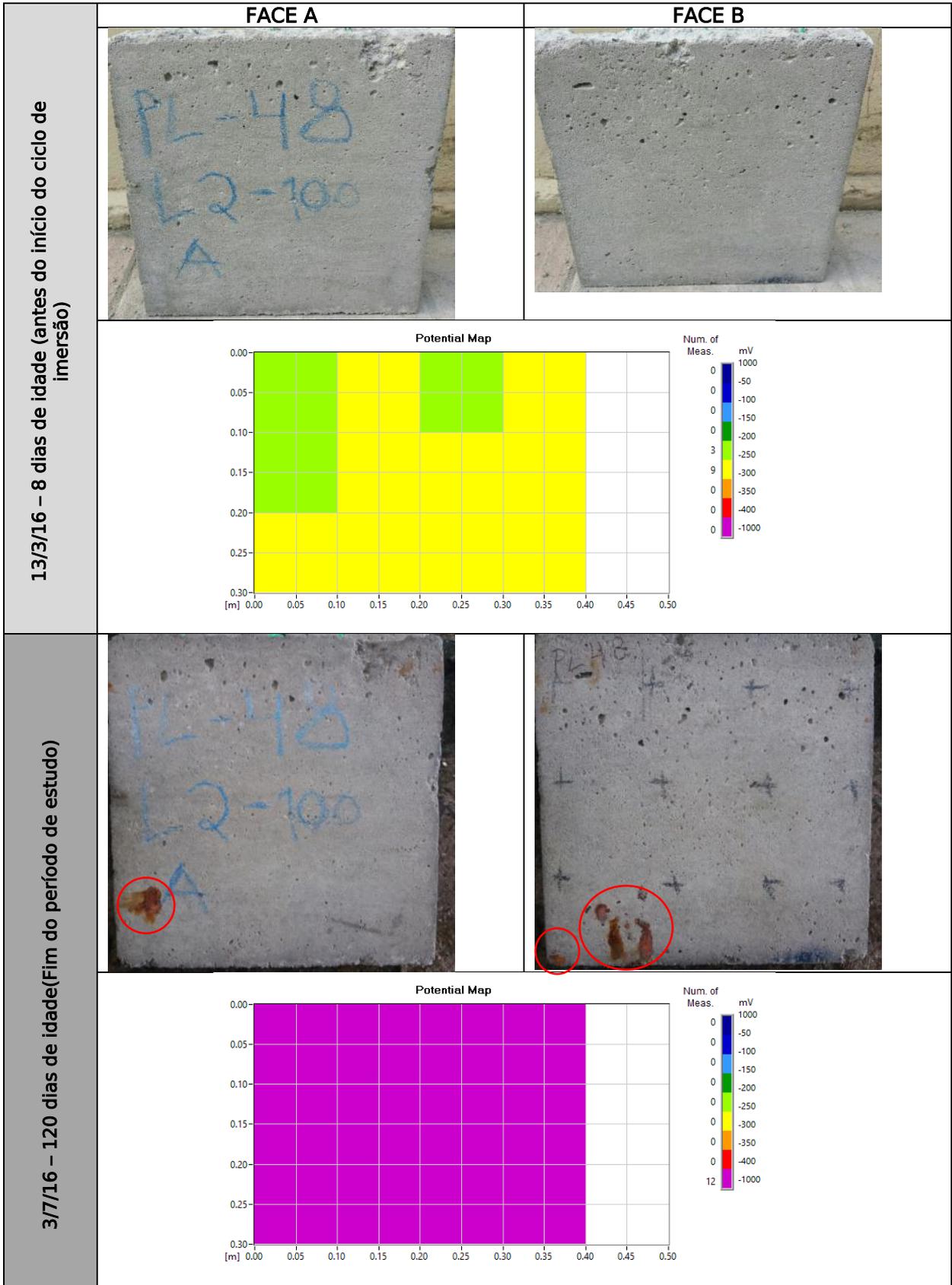


Foto 49-PLACA 49-FAMÍLIA L2

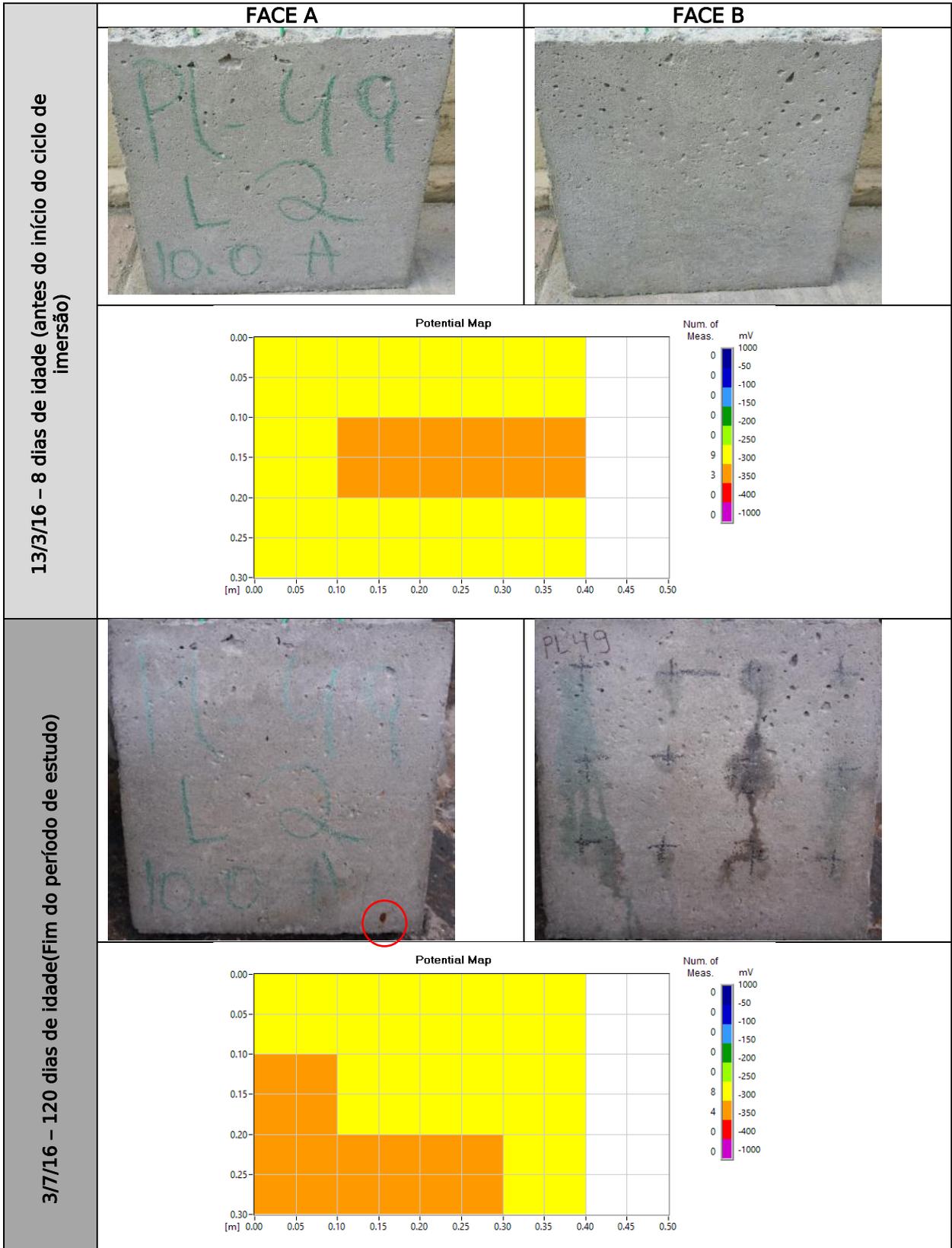


Foto 50-PLACA 50-FAMÍLIA L2

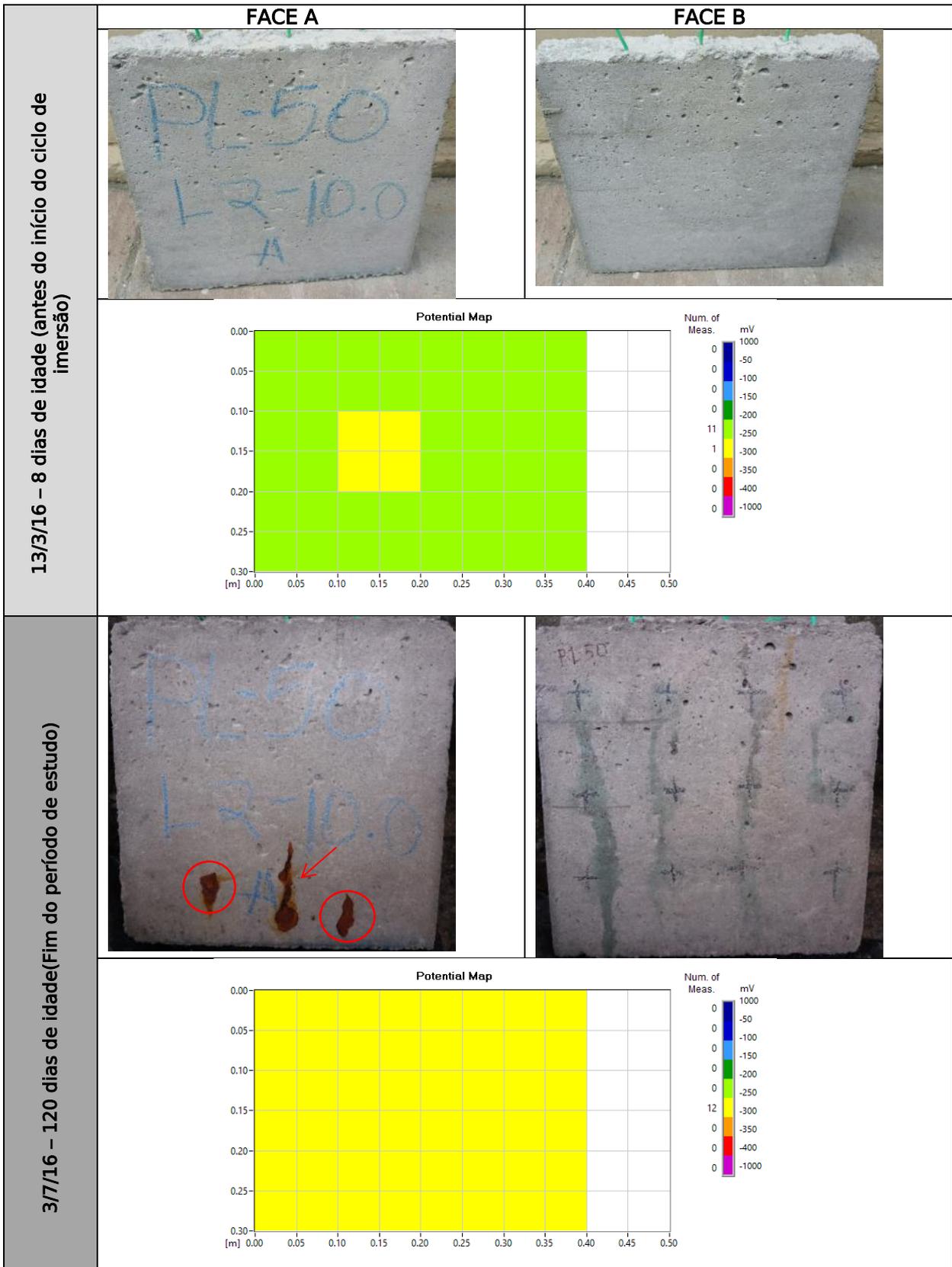


Foto 51-PLACA 51-FAMÍLIA L2

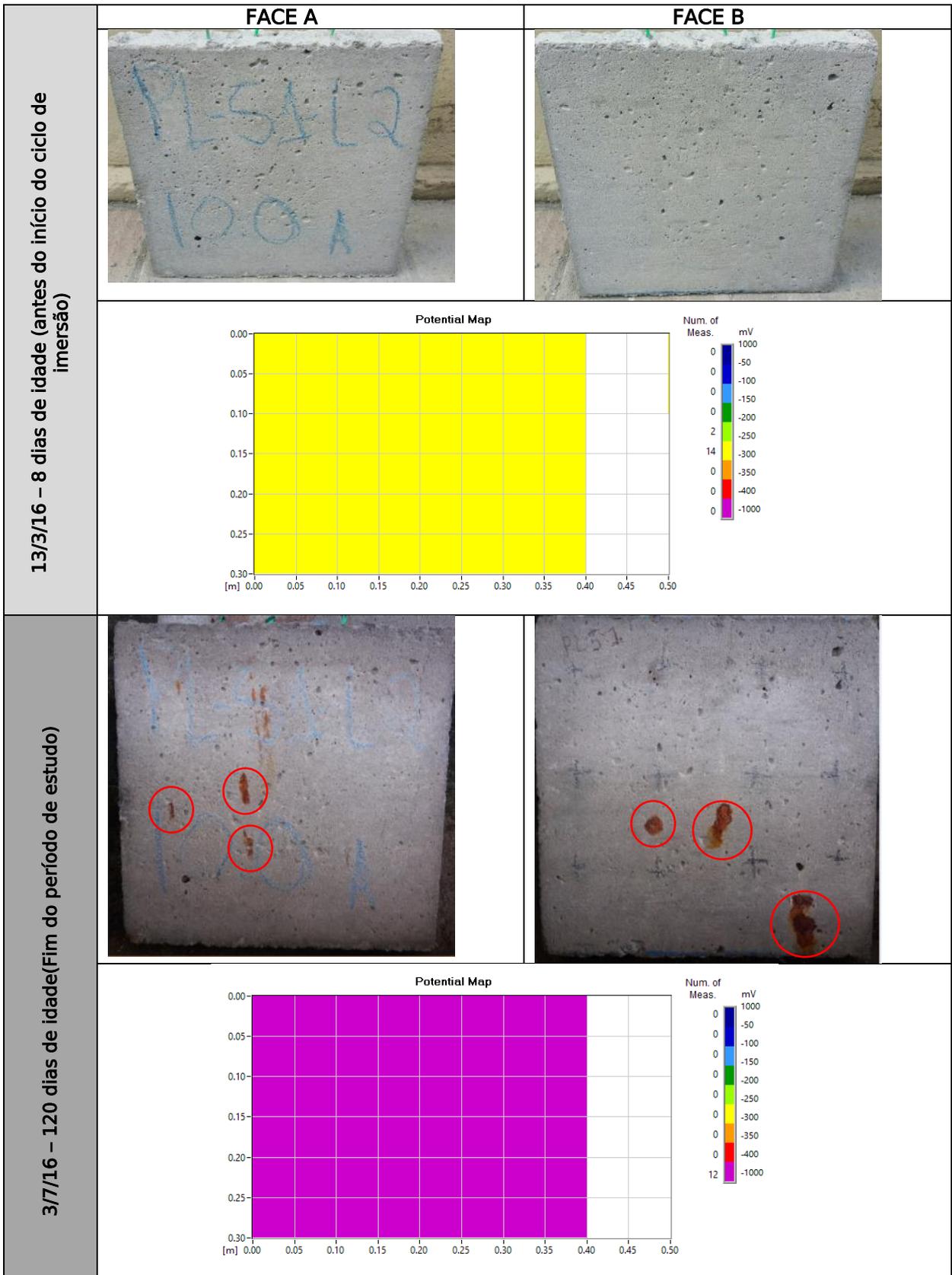


Foto 52-PLACA 52-FAMÍLIA L2

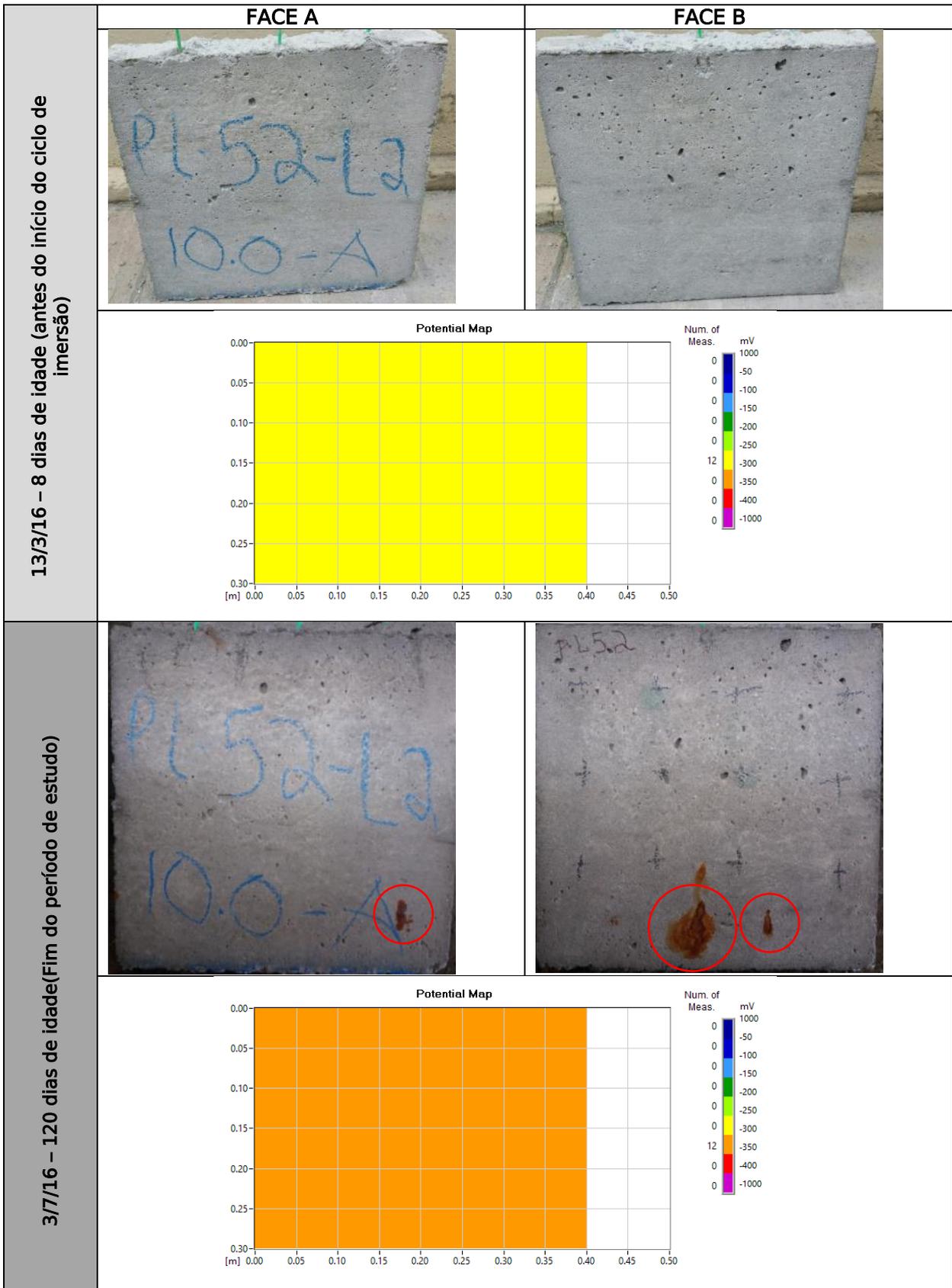


Foto 53-PLACA 53-FAMÍLIA L2

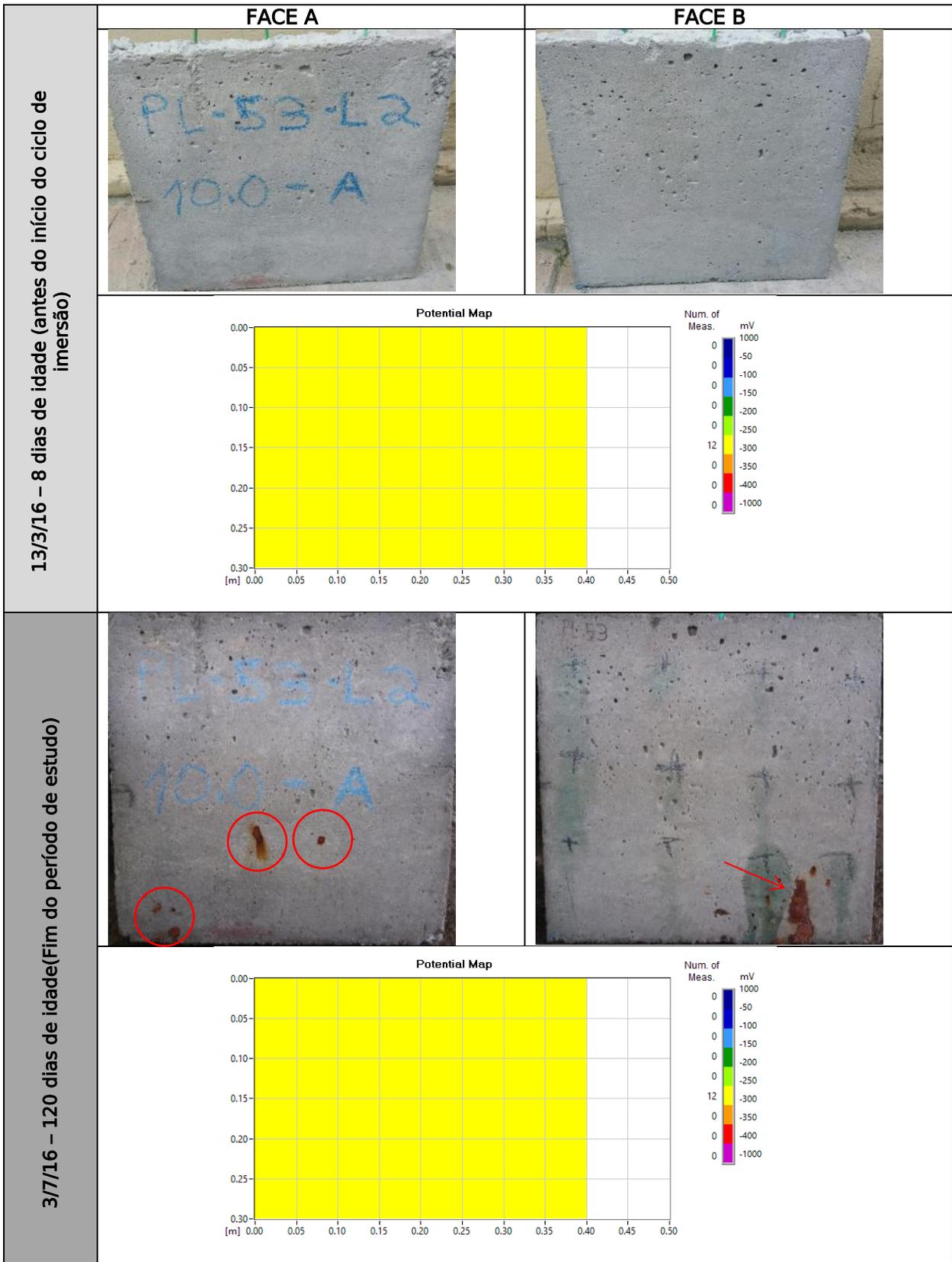


Foto 54-PLACA 54-FAMÍLIA L2

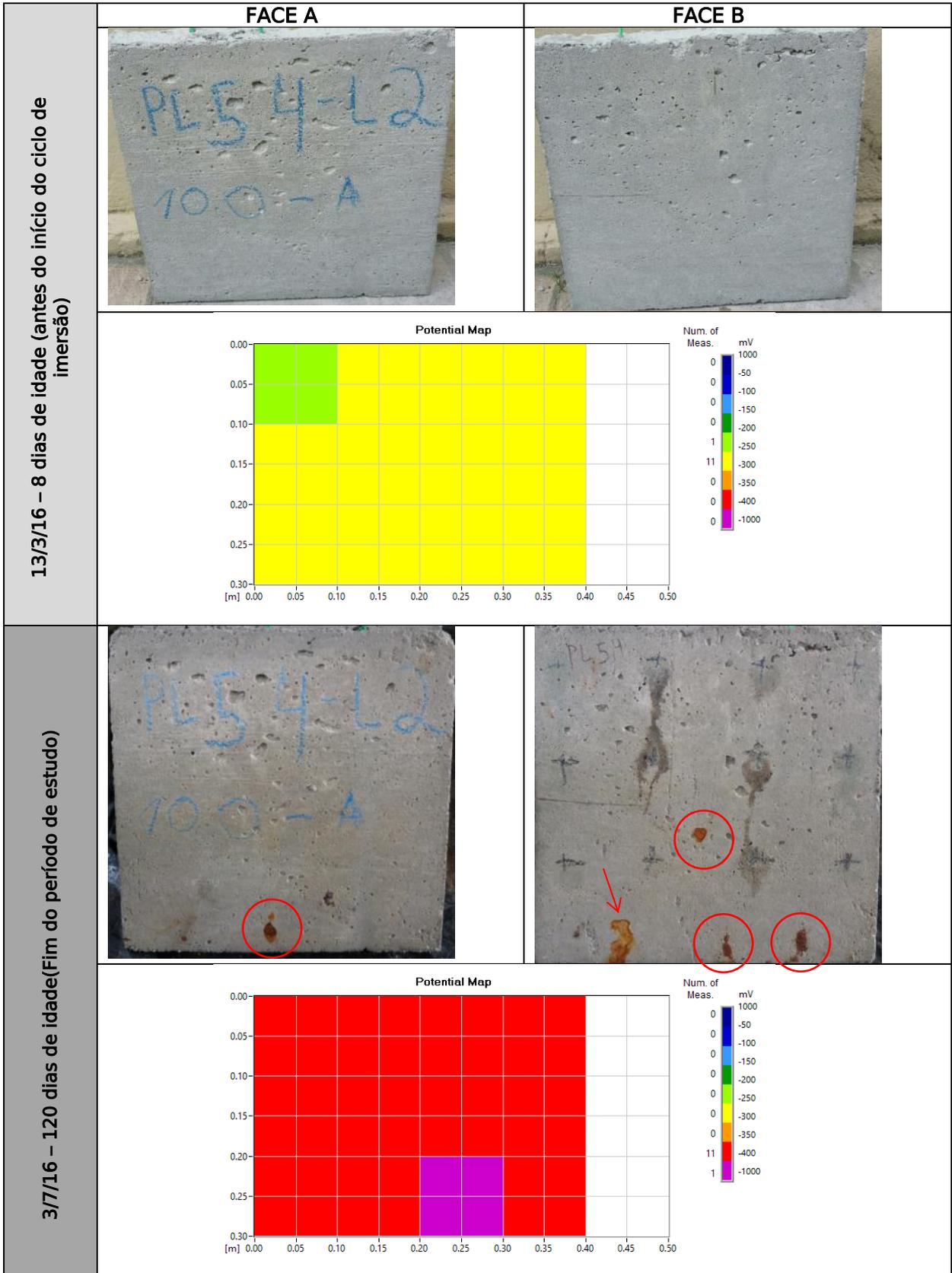


Foto 55-PLACA 55-FAMÍLIA L3

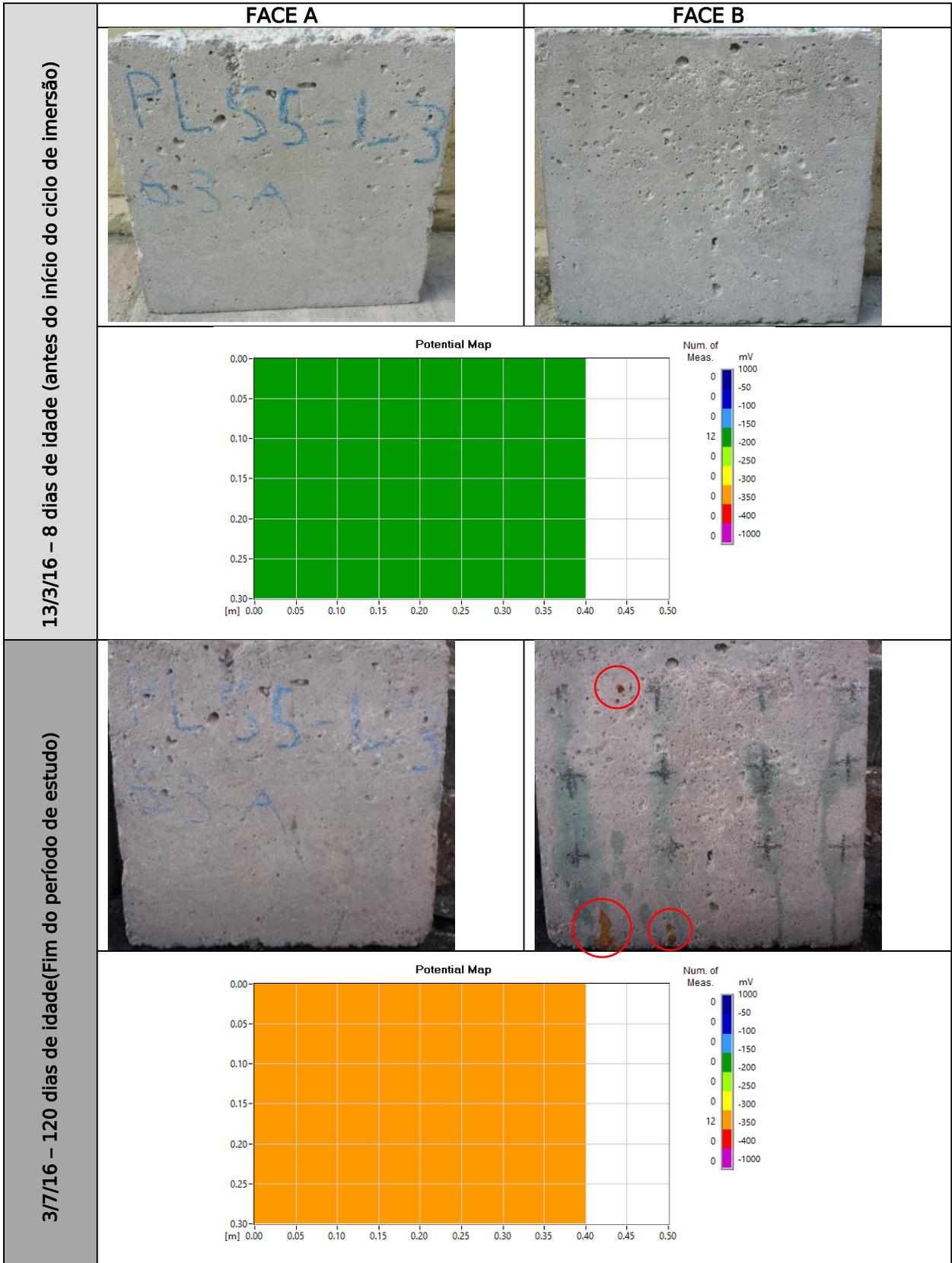


Foto 56-PLACA 56-FAMÍLIA L3

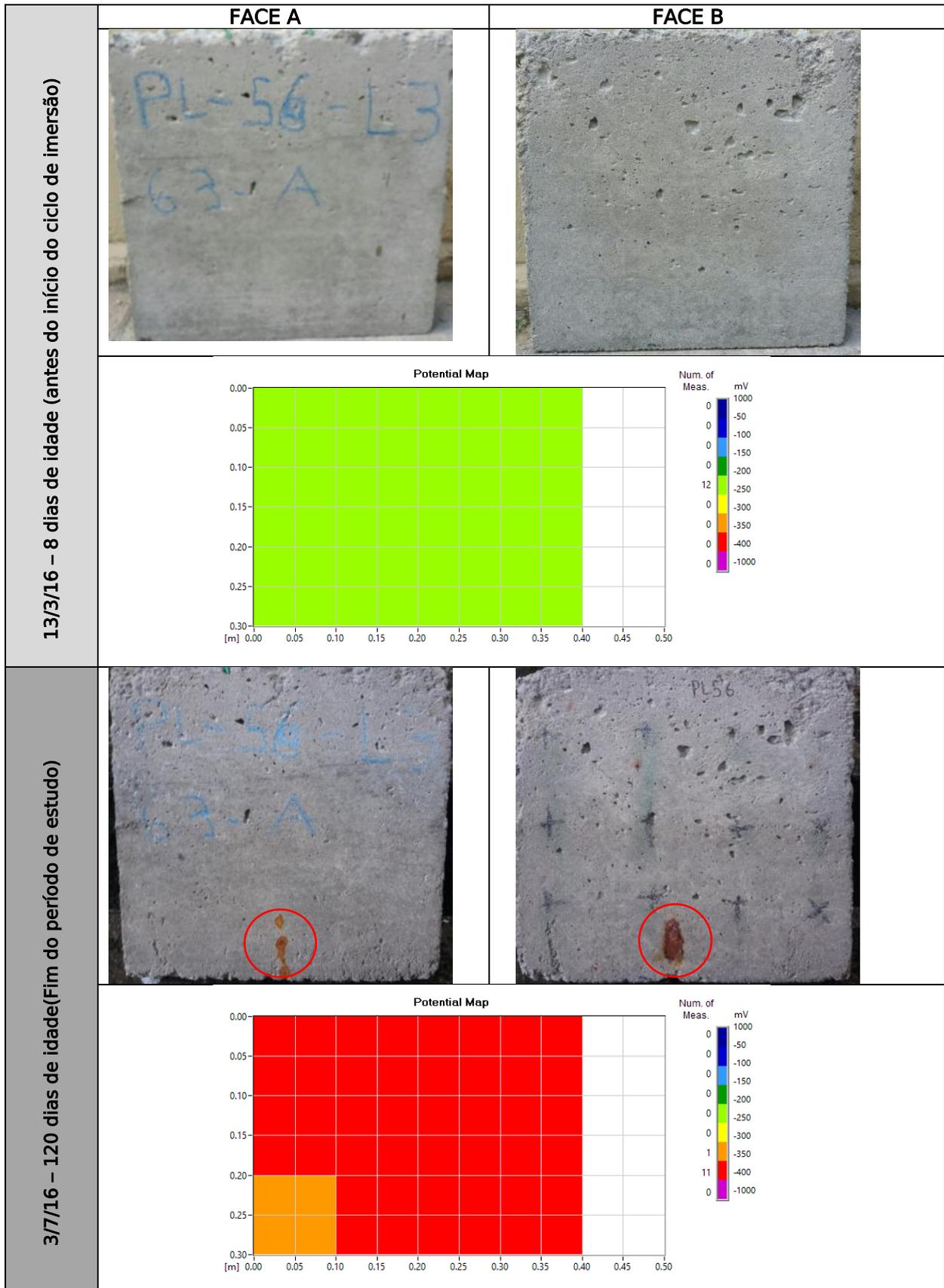


Foto 57-PLACA 57-FAMÍLIA L3

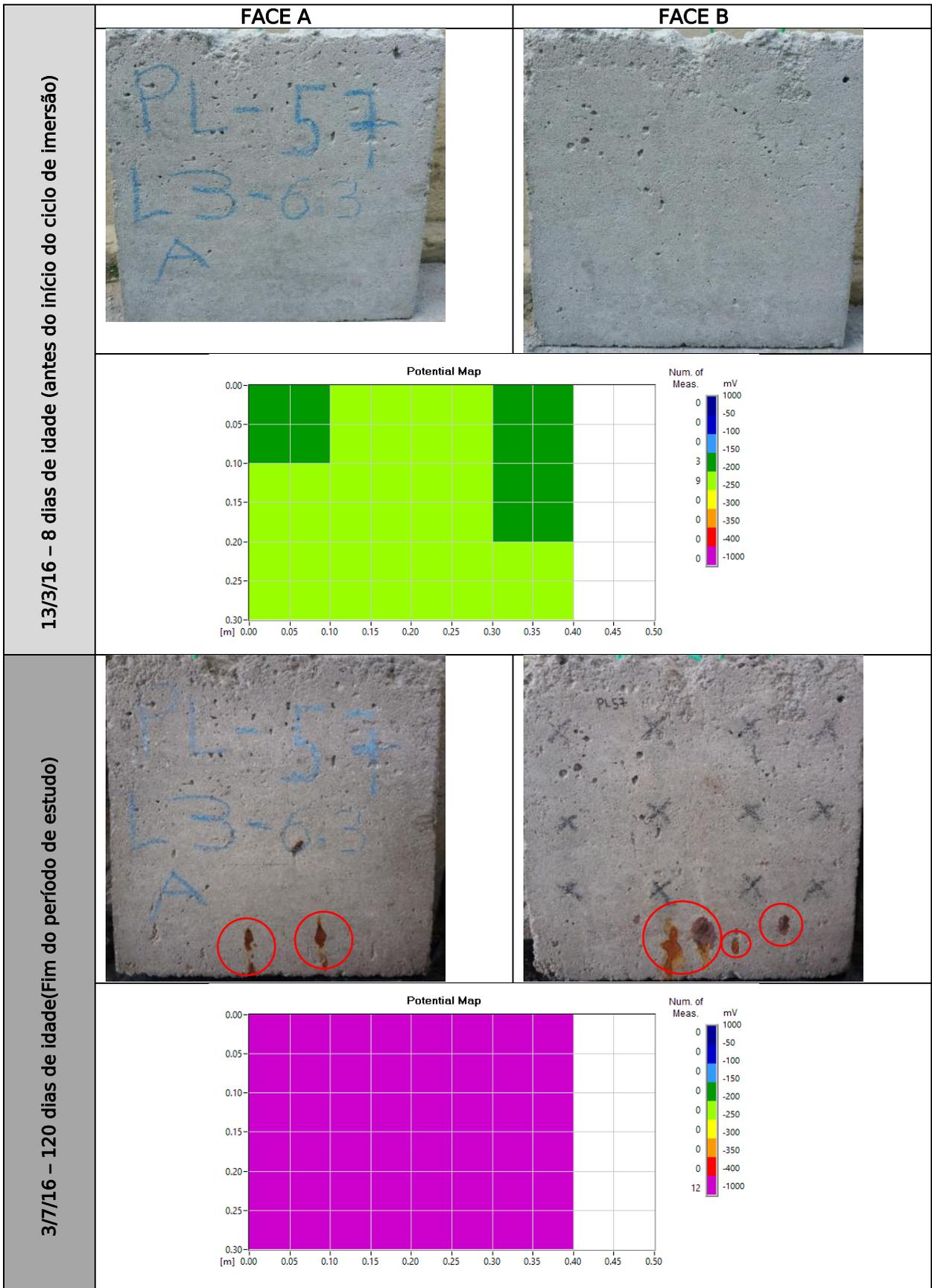


Foto 58-PLACA 58-FAMÍLIA L3

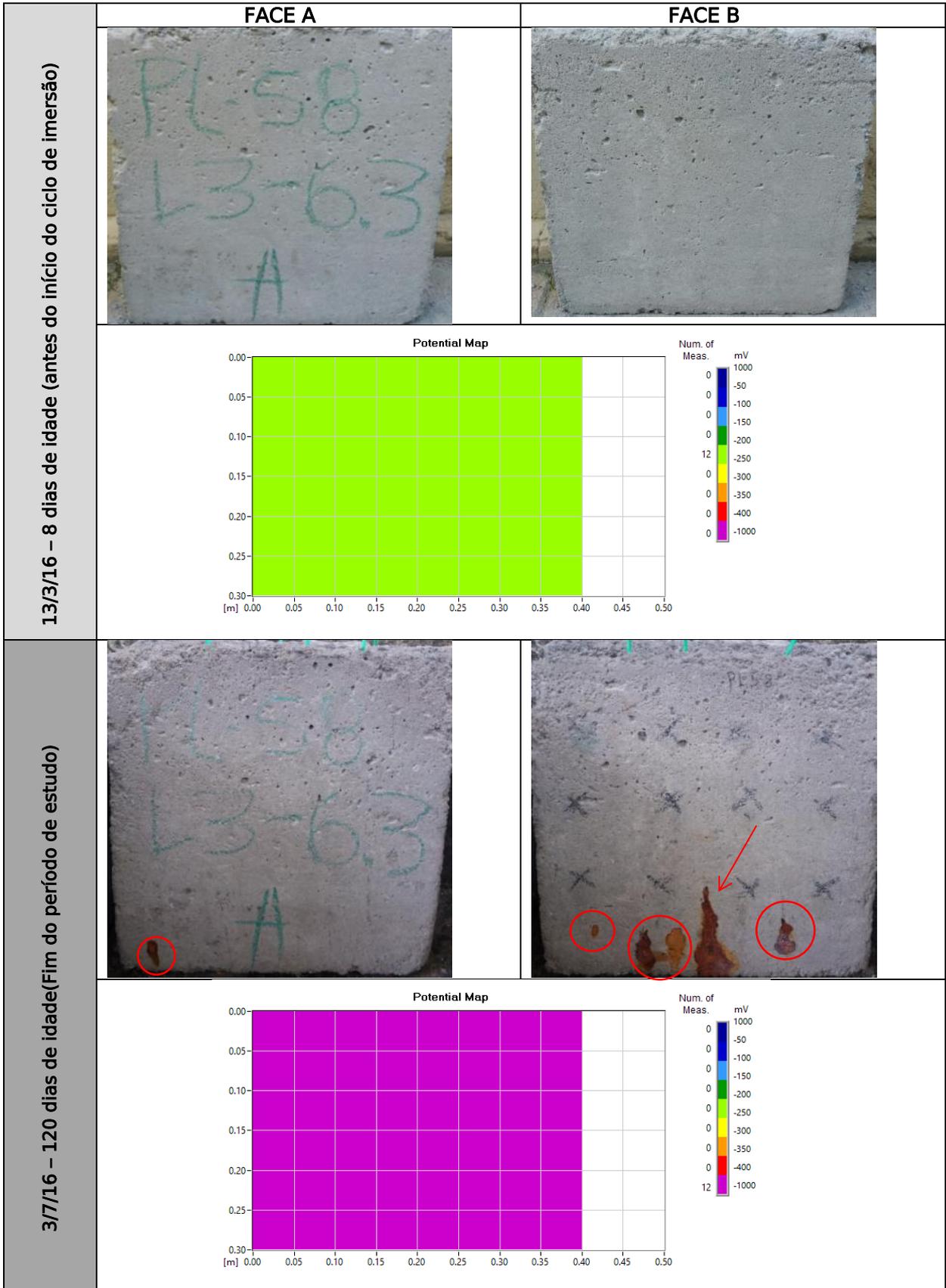


Foto 59-PLACA 59-FAMÍLIA L3

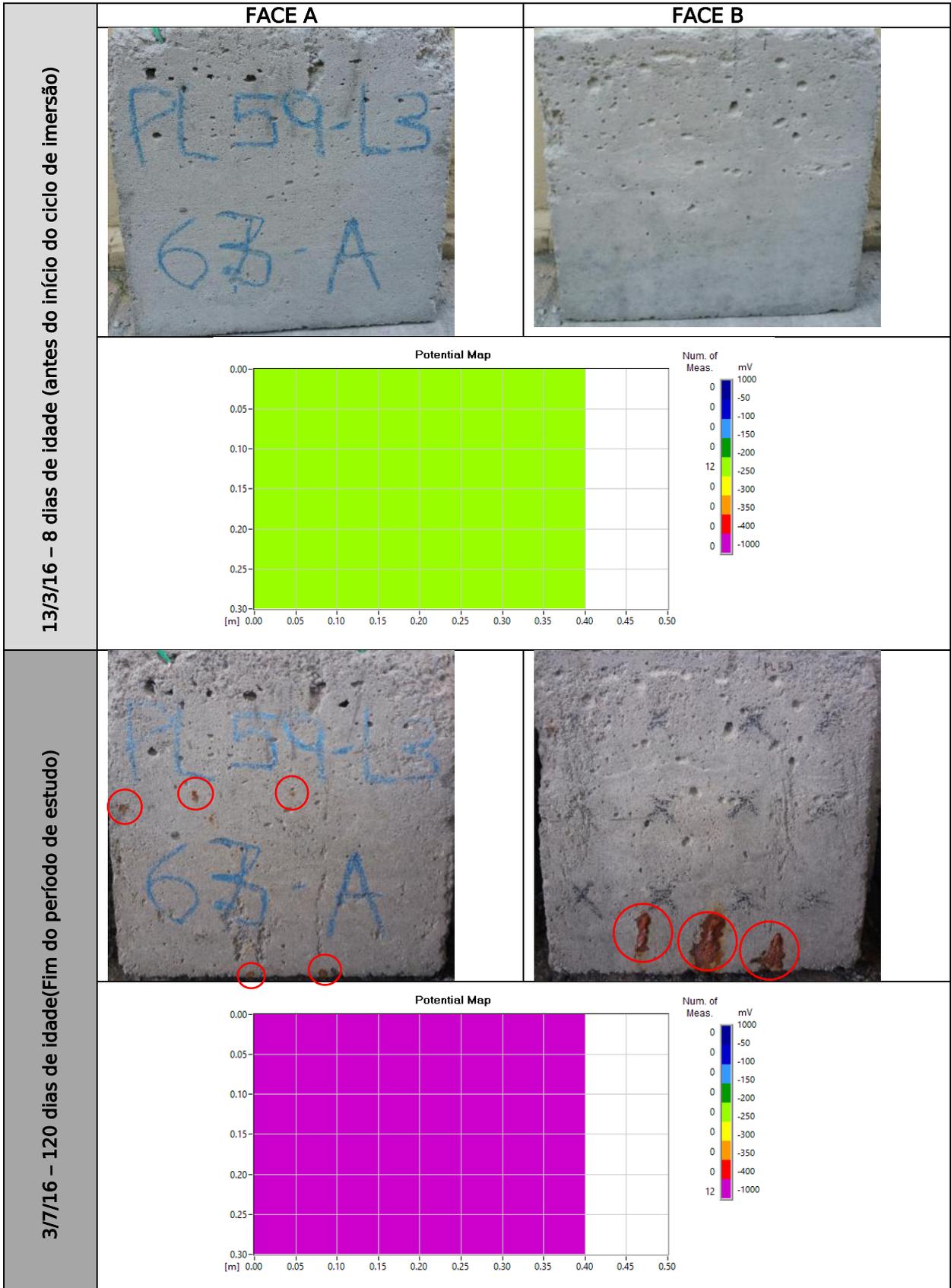


Foto 60-PLACA 60-FAMÍLIA L3

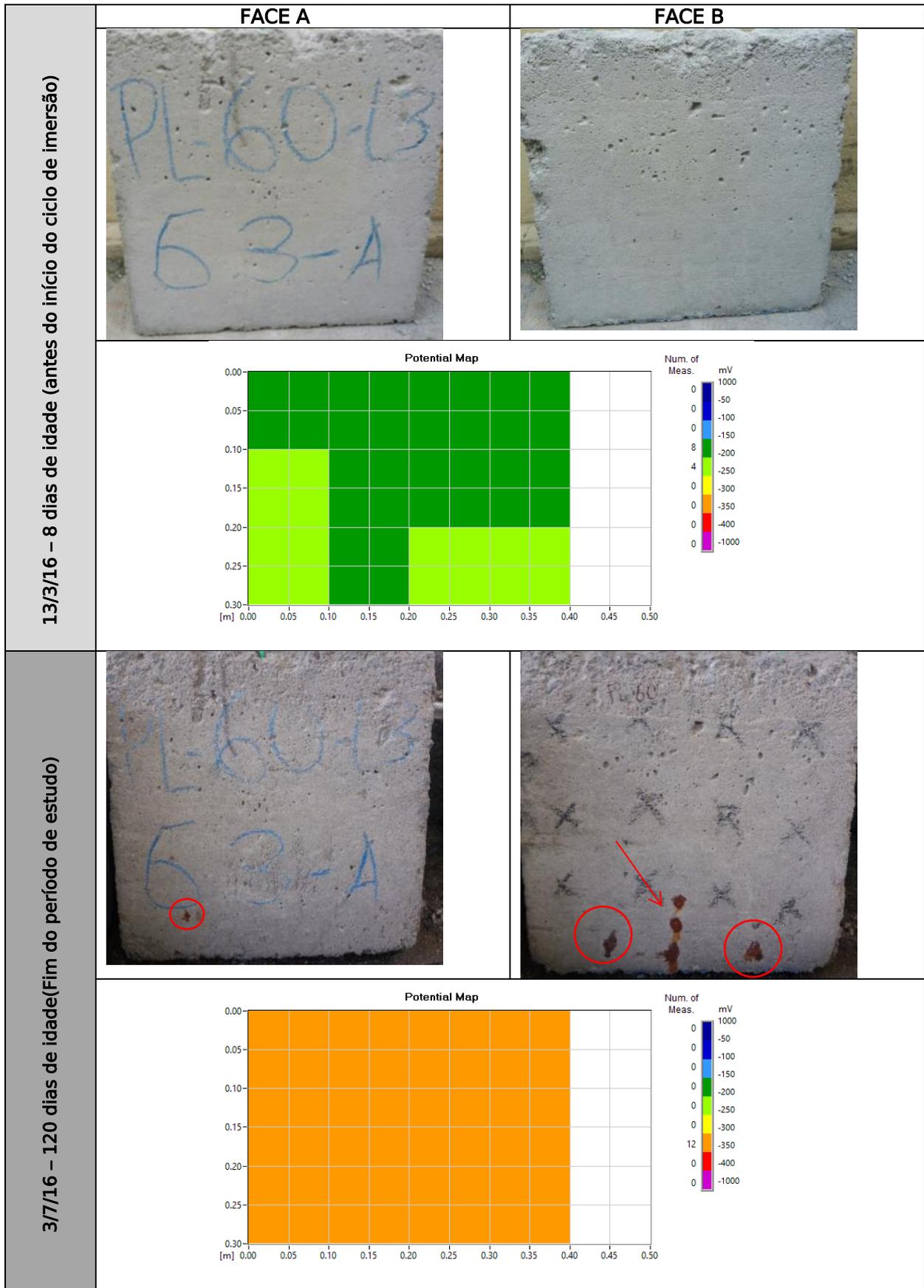


Foto 61-PLACA 61-FAMÍLIA L3

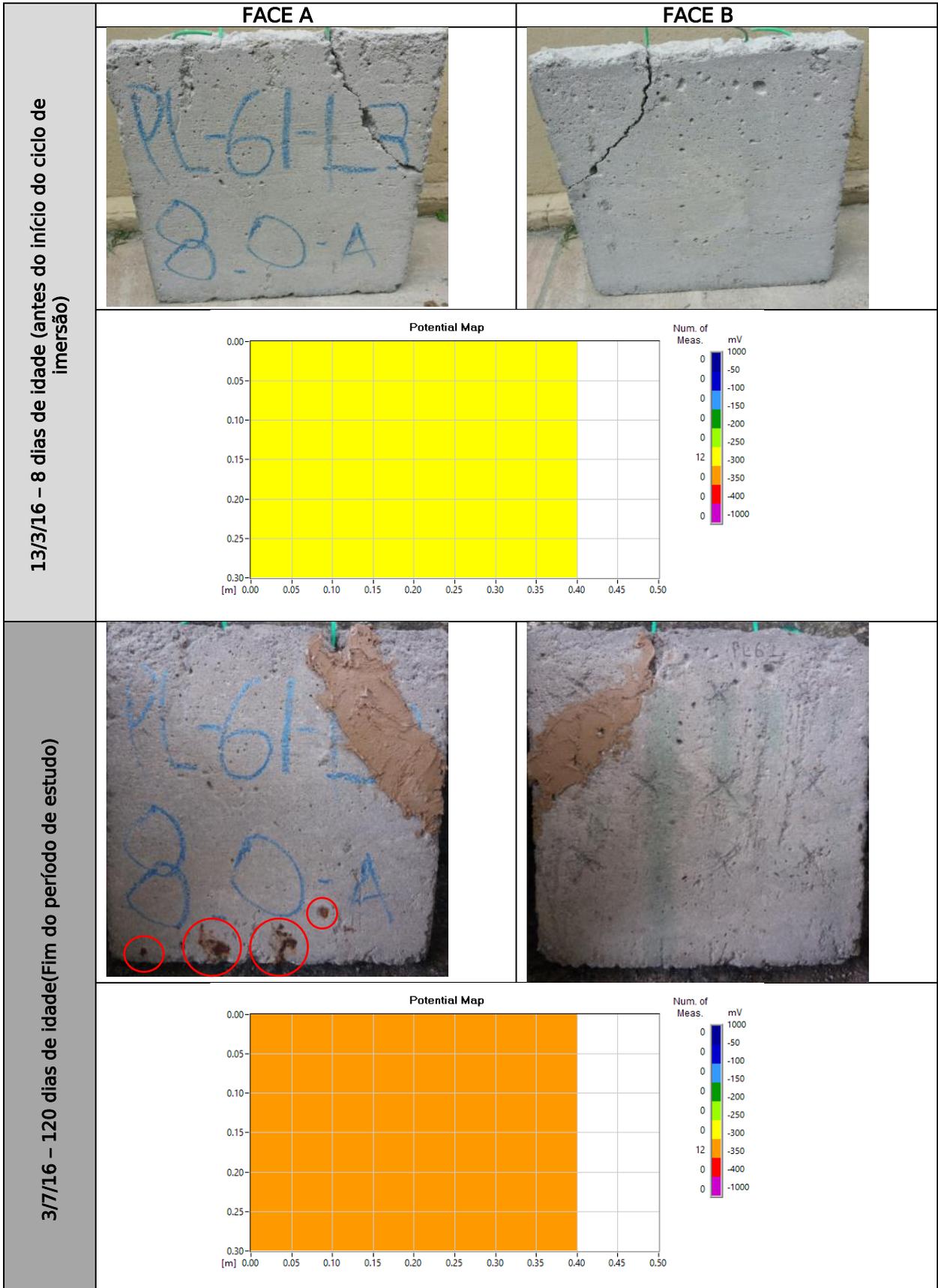


Foto 62-PLACA 62-FAMÍLIA L3

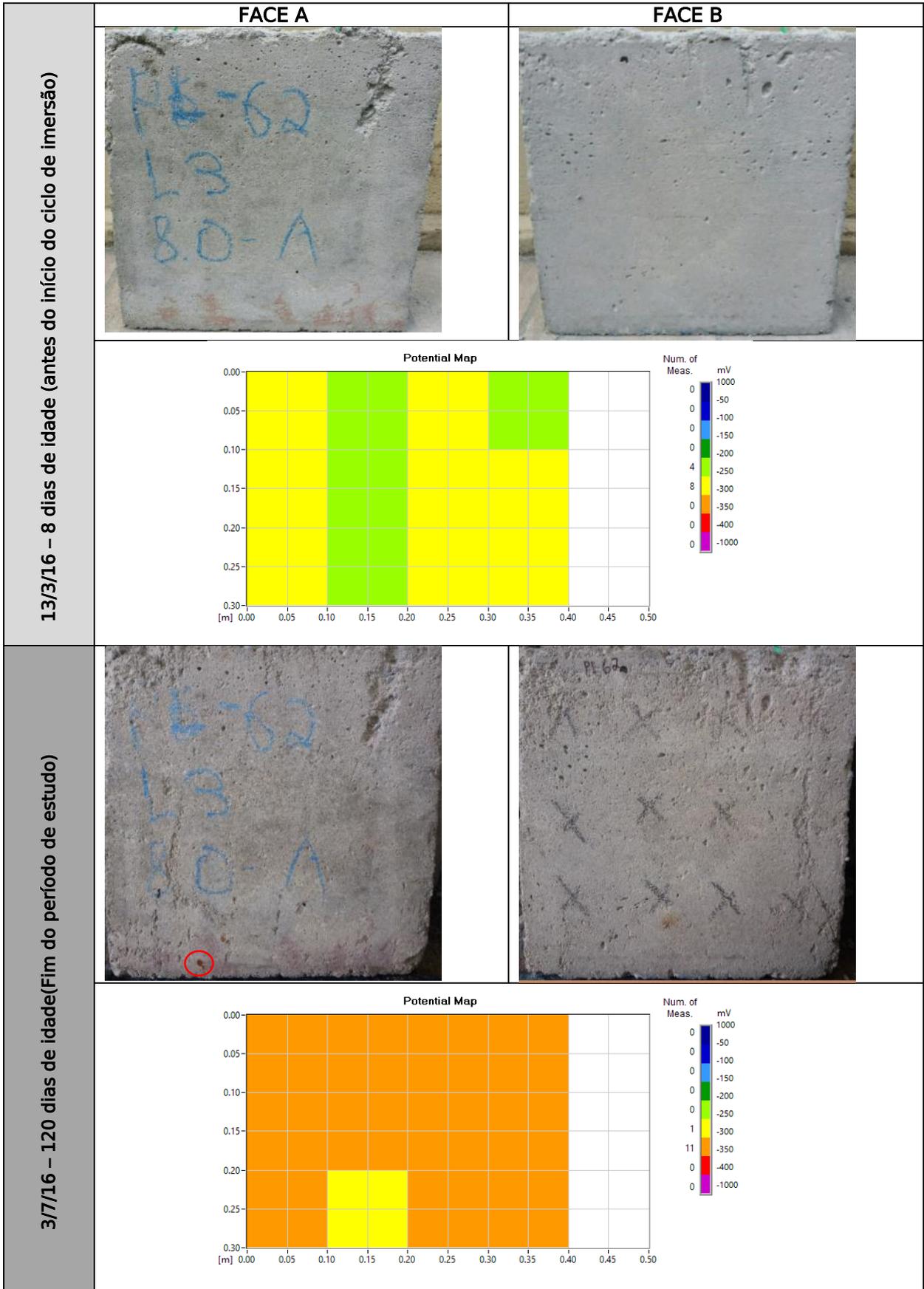


Foto 63-PLACA 63-FAMÍLIA L3

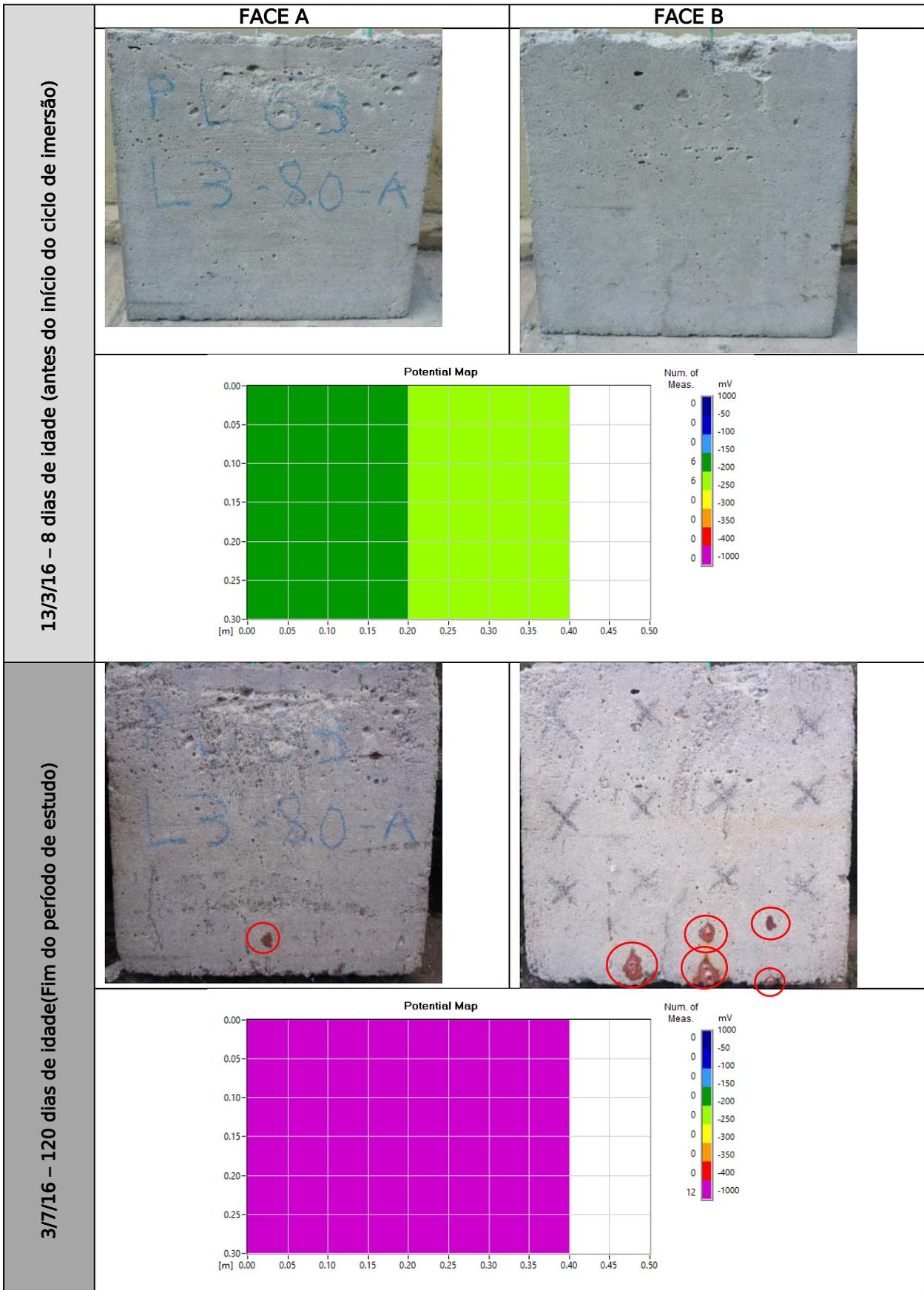


Foto 64-PLACA 64-FAMÍLIA L3

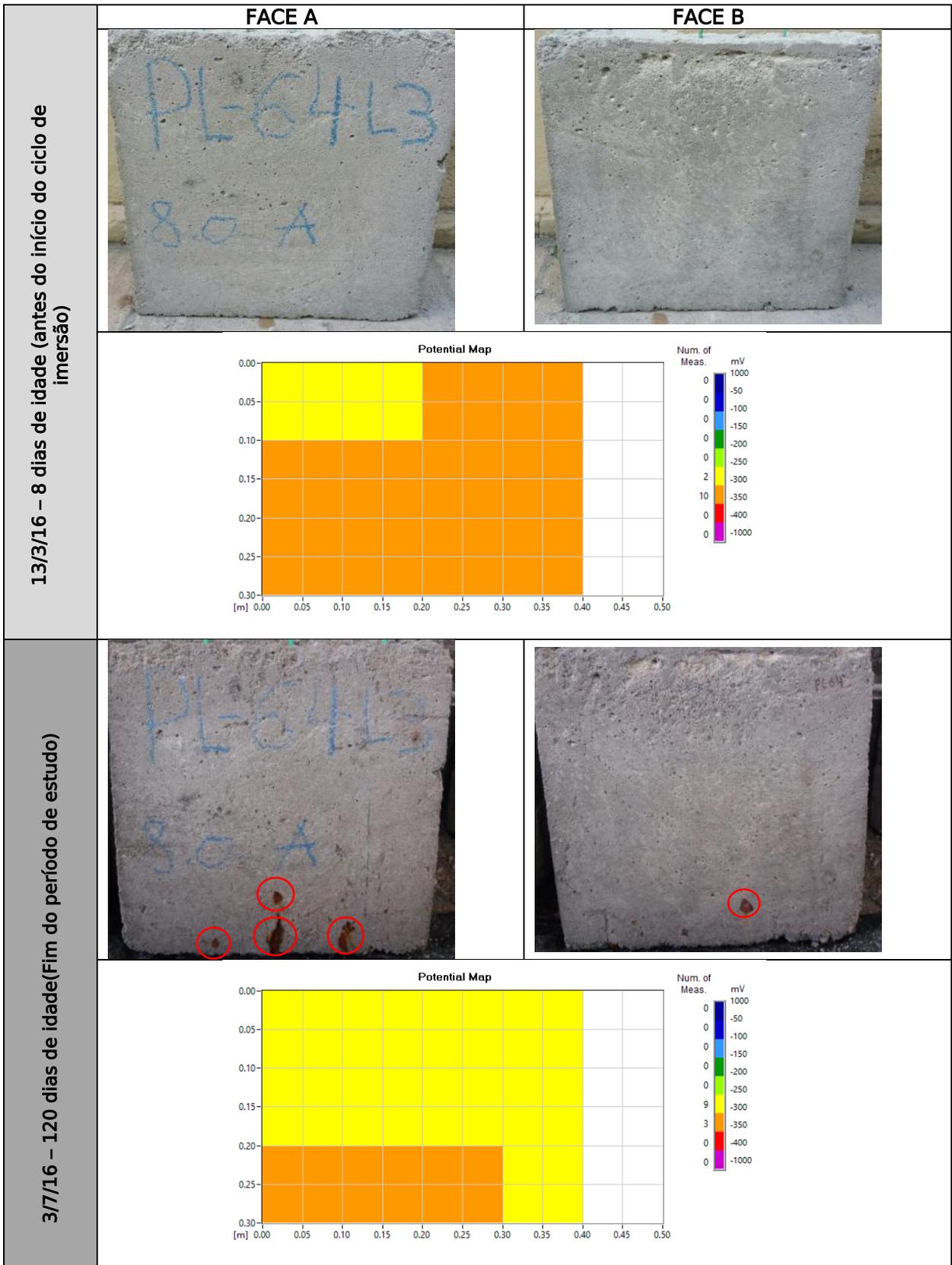


Foto 65-PLACA 65-FAMÍLIA L3

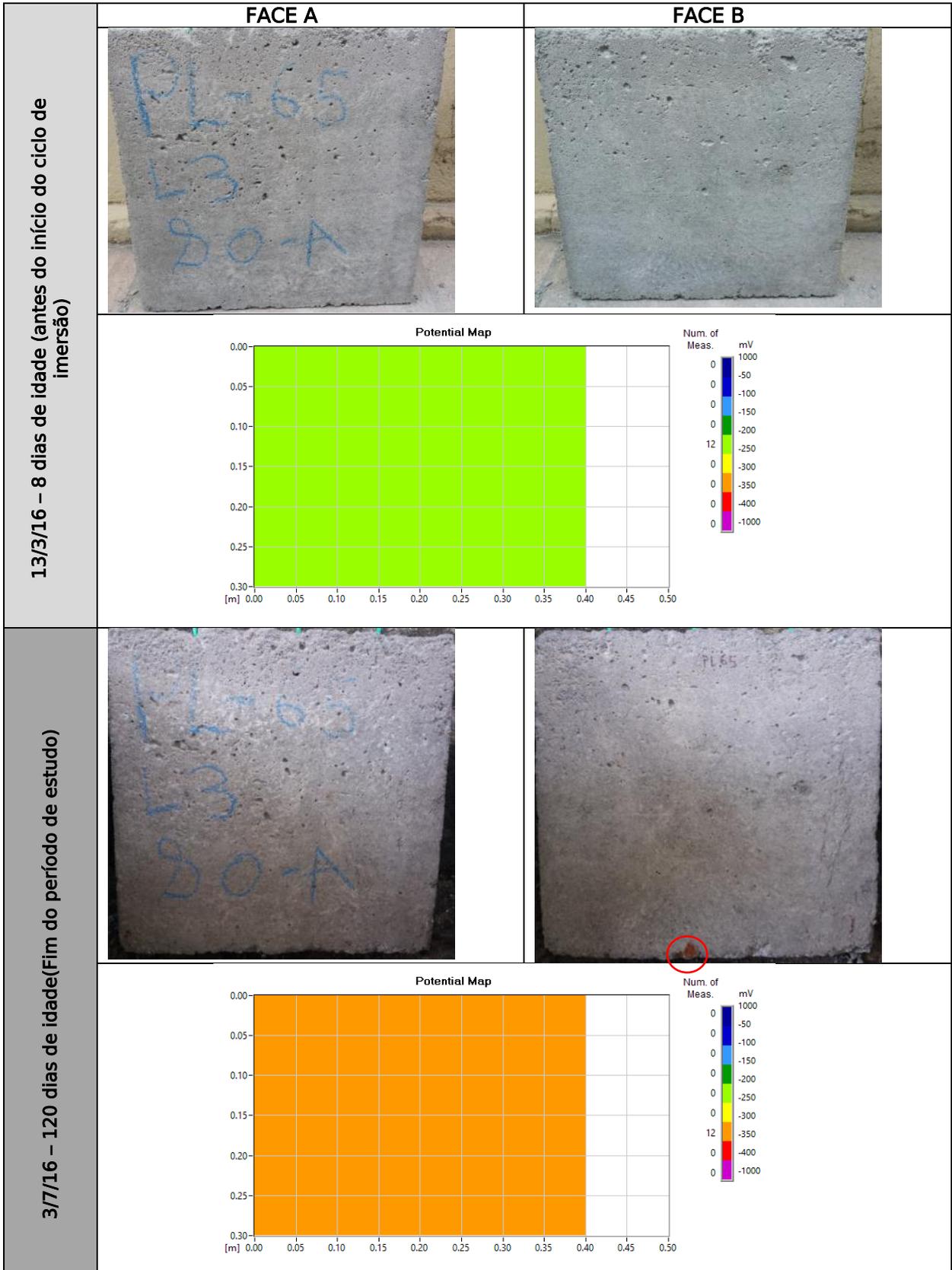


Foto 66-PLACA 66-FAMÍLIA L3

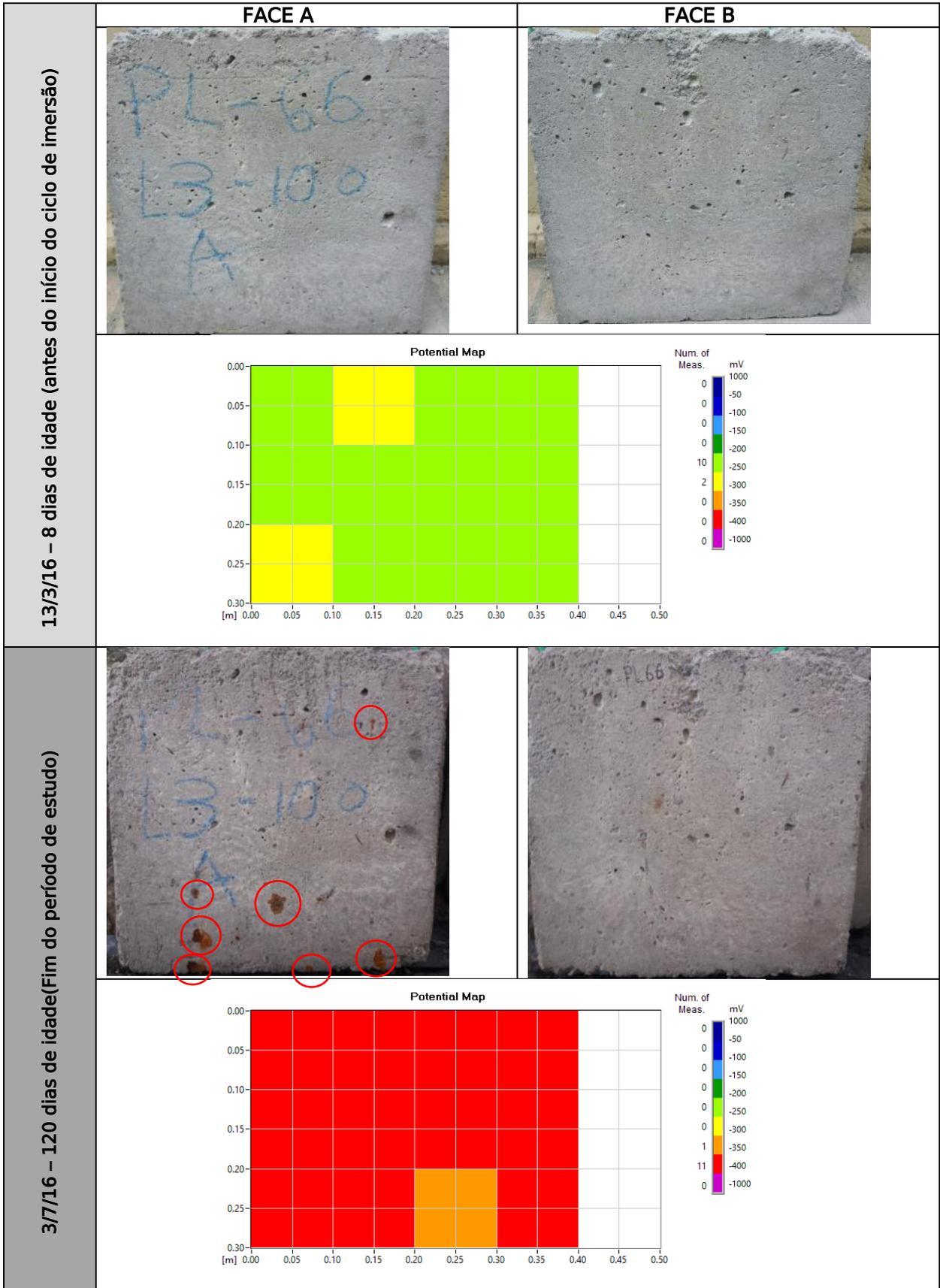


Foto 67-PLACA 67-FAMÍLIA L3

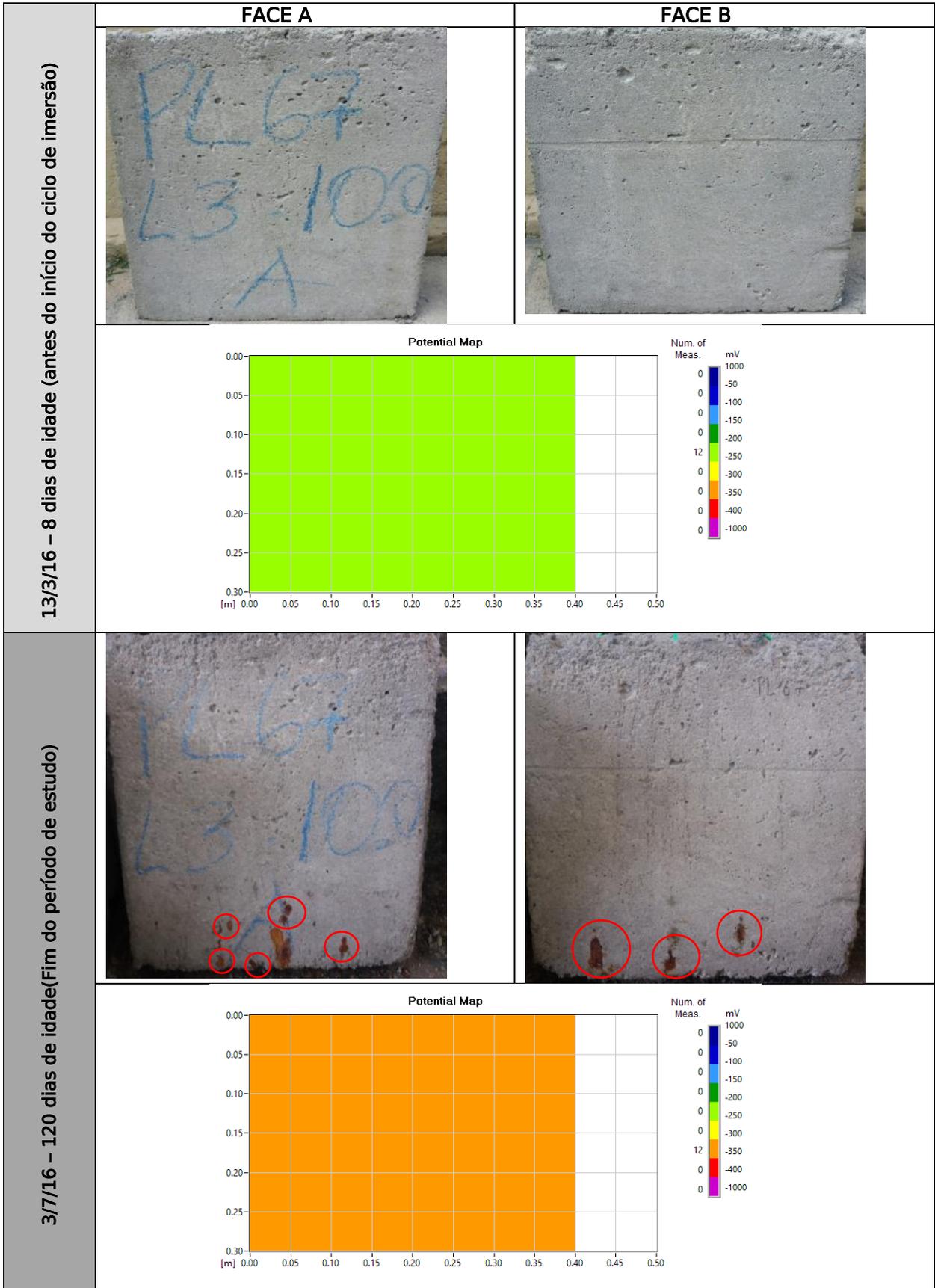


Foto 68-PLACA 68-FAMÍLIA L3

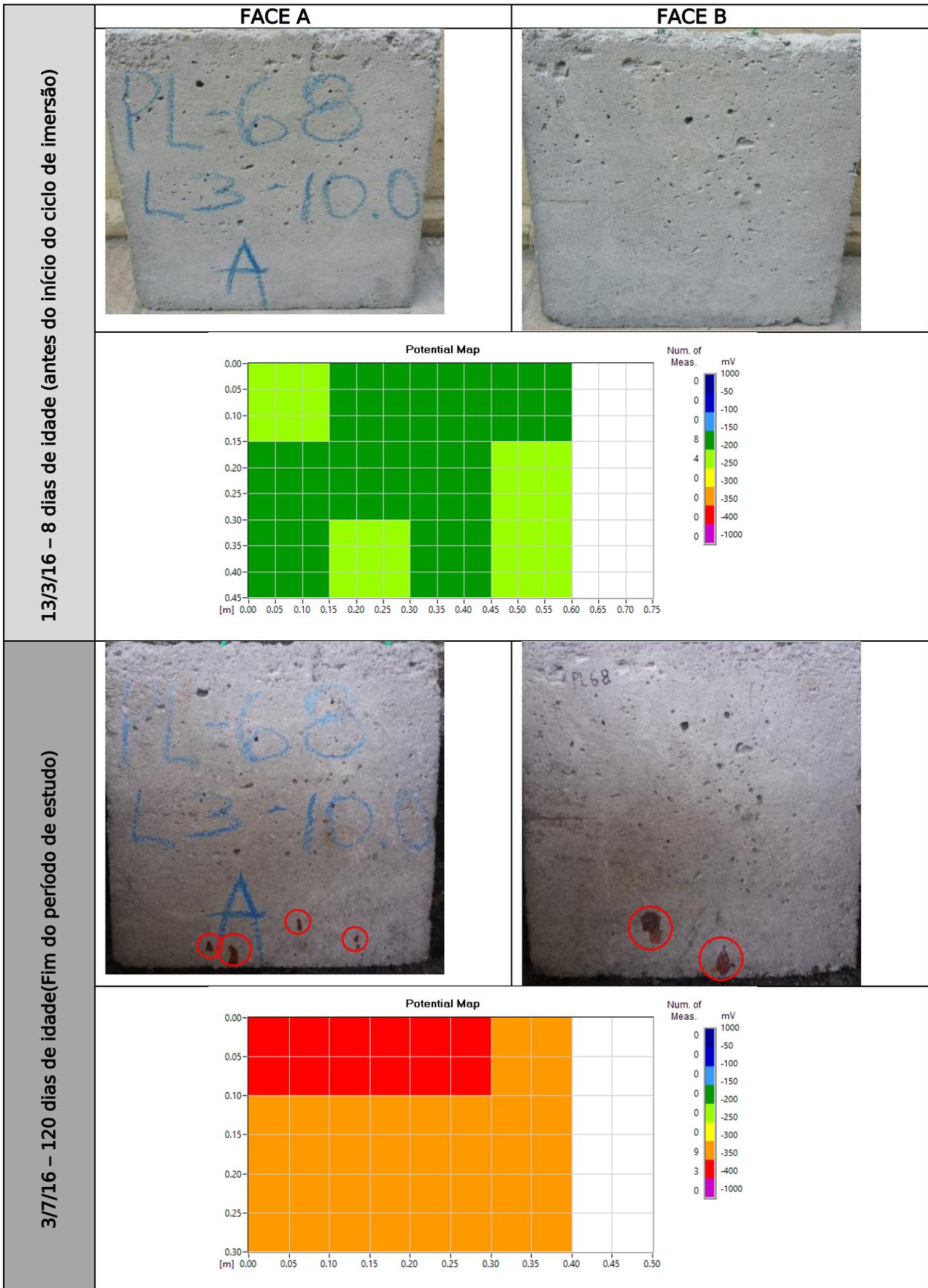


Foto 69-PLACA 69-FAMÍLIA L3

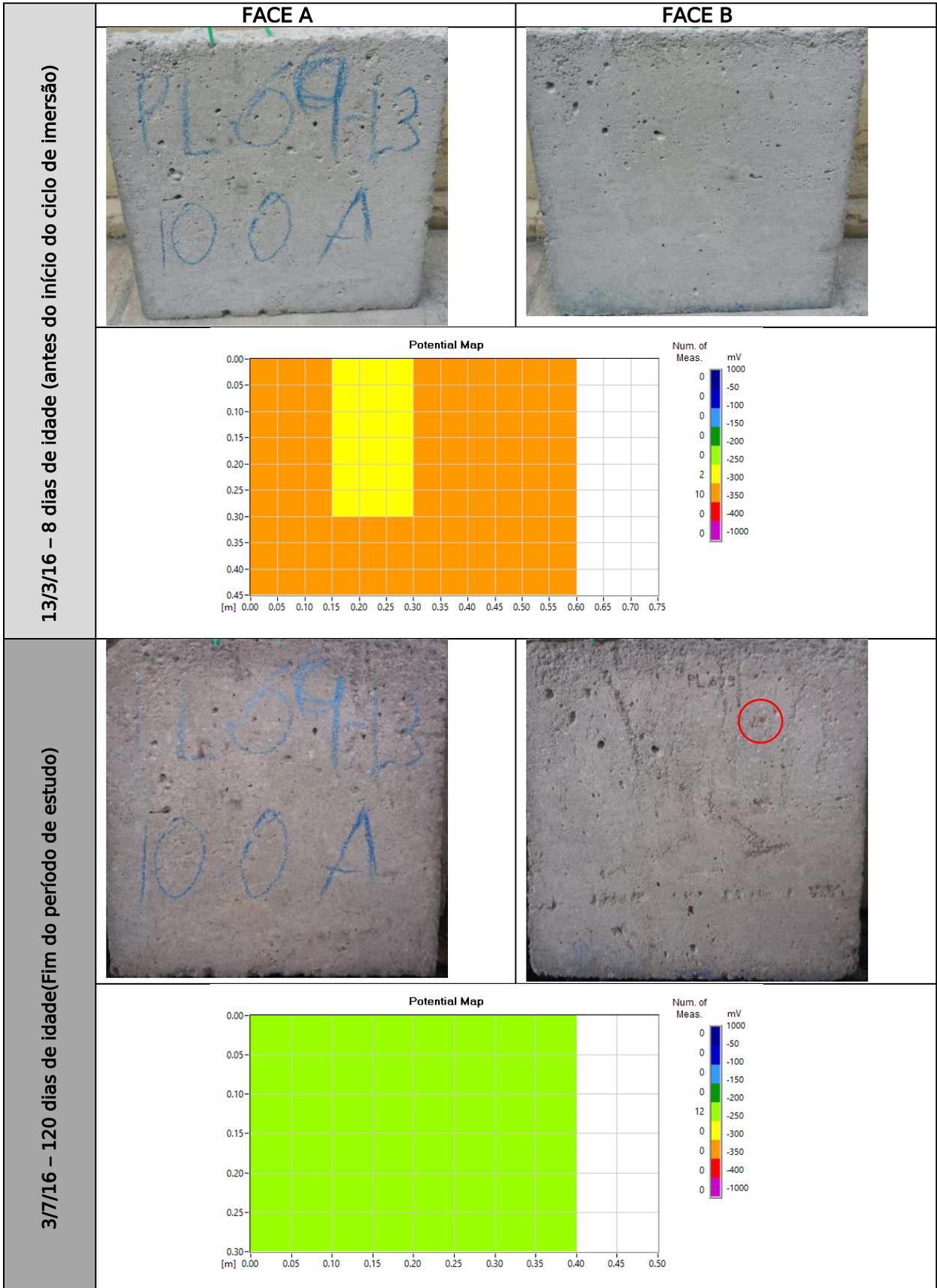


Foto 70-PLACA 70-FAMÍLIA L3

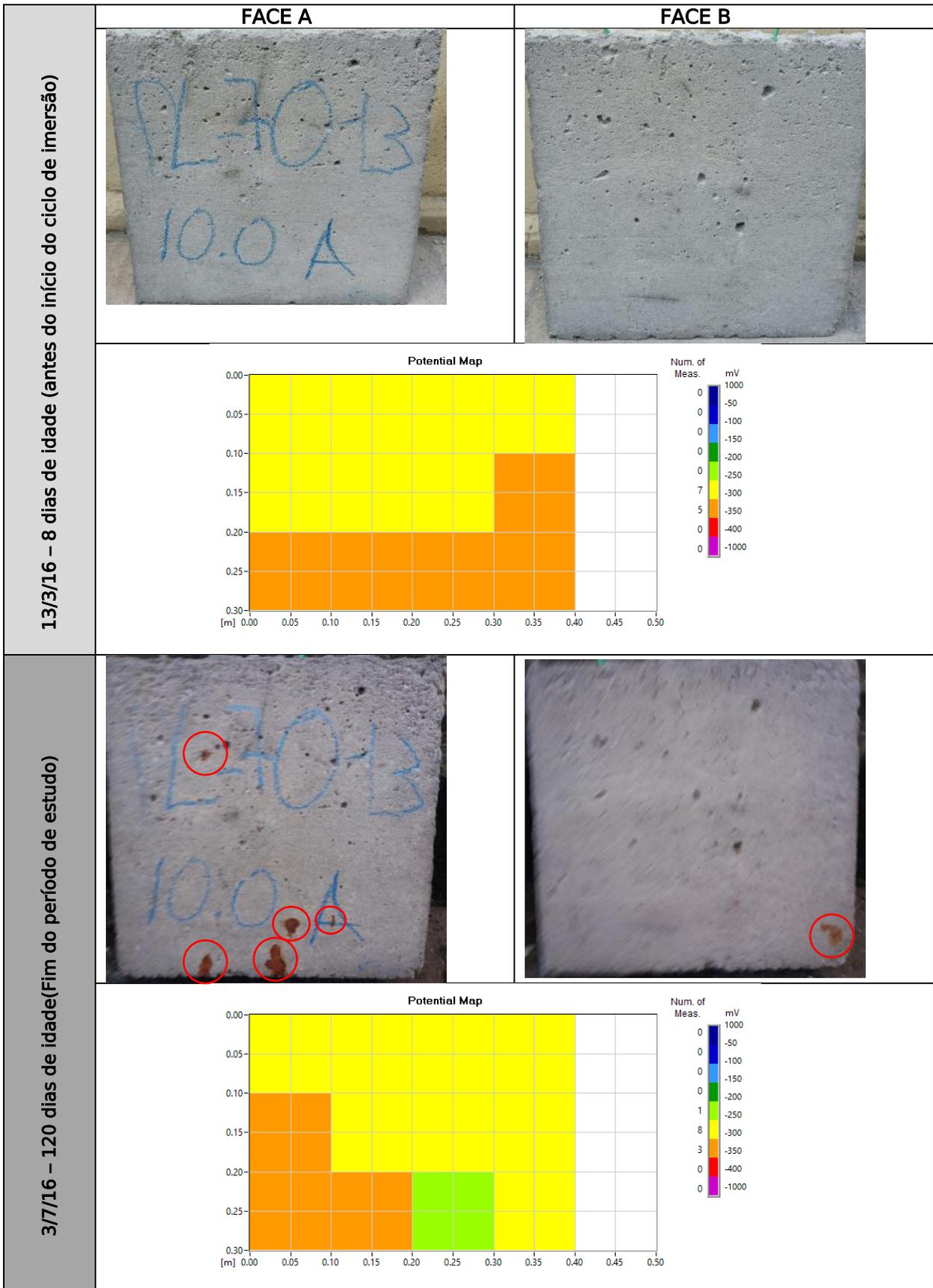


Foto 71-PLACA 71-FAMÍLIA L3

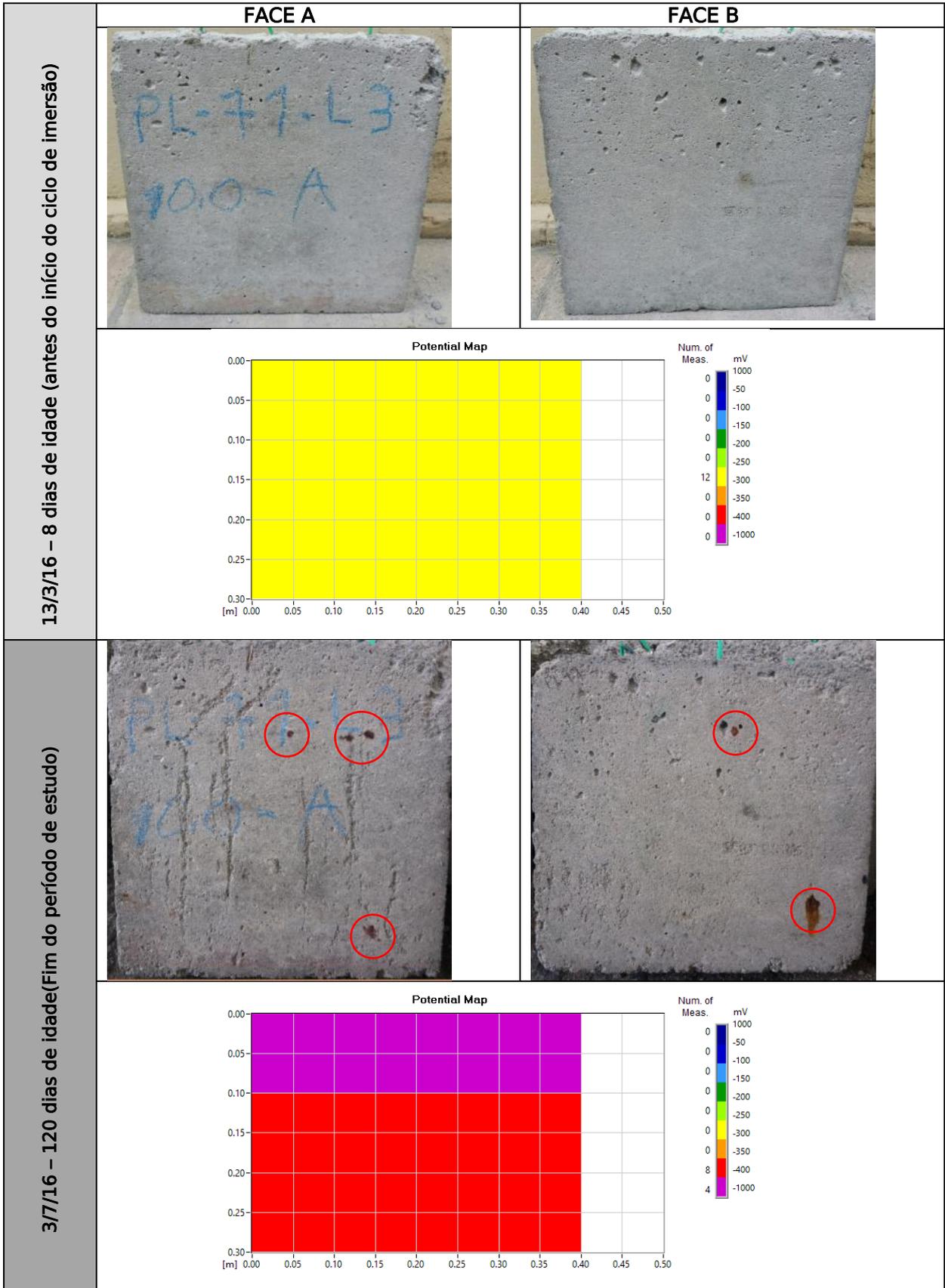
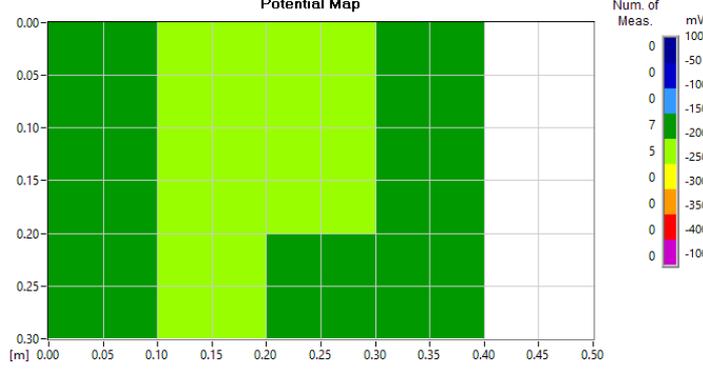
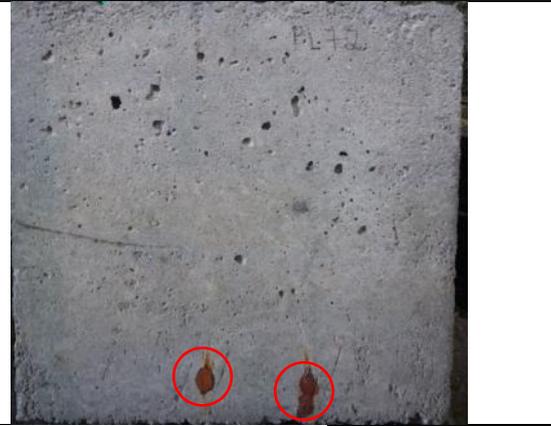


Foto 72-PLACA 72-FAMÍLIA L3

<p>13/3/16 – 8 dias de idade (antes do início do ciclo de imersão)</p>	<p>FACE A</p> 	<p>FACE B</p> 
	<p>Potential Map</p> 	
<p>3/7/16 – 120 dias de idade (Fim do período de estudo)</p>		
	<p>Potential Map</p> 