



**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL DE CORPOS DE PROVA
DE ARGAMASSA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS
SUBMETIDOS AO ATAQUE POR ÁCIDO SULFÚRICO**

CURITIBA
2017



ADRIANO MOHR BONATTO
JULIANA JANOWSKI ZANDONÁ
MARION SCHEFFER DE ANDRADE SILVA

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL DE CORPOS DE PROVA
DE ARGAMASSA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS
SUBMETIDOS AO ATAQUE POR ÁCIDO SULFÚRICO**

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

Orientador: Prof. MSc. Luís César De Luca.

CURITIBA
2017

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil prof. De Luca pela valiosa colaboração no de campo deste trabalho.

Ao professor MSc. Maurício Bianchini pelo auxílio no fornecimento de materiais necessários para a moldagem dos corpos de prova de argamassa.

Ao professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros pelo empréstimo de formas, pinos e outros equipamentos necessários para a moldagem dos corpos de prova.

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL DE CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS SUBMETIDOS AO ATAQUE POR ÁCIDO SULFÚRICO

Por

ADRIANO MOHR BONATTO

JULIANA JANOWSKI ZANDONÁ

MARION SCHEFFER DE ANDRADE SILVA

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

Curitiba (PR) ____ de _____ de _____.

Luís César De Luca, MSc.

Mateus de Azevedo Barão, MSc.

Sandro Eduardo da Silveira Mendes, MSc.

RESUMO

As construções sofrem diversos tipos de ataque ambiental ao longo de sua vida útil. Alguns dos compostos de enxofre são conhecidos por atacarem concreto e argamassa causando manifestações patológicas severas. Neste trabalho foi realizada uma avaliação da variação dimensional de corpos de prova de argamassa moldados com diferentes tipos de cimento submetidos ao ataque ácido de agentes compostos de enxofre com o intuito de avaliar a diferença entre os diferentes tipos de cimento a essas agressões. Dentre os corpos de prova moldados, foram utilizados três tipos diferentes de cimento, sendo que esses foram CP II Z, CP IV-32 RS e CPV. Os ensaios foram realizados submetendo parte dos os corpos de prova à solução de sulfato de sódio, solução prescrita pela NBR 13853 (2014), outra parte dos corpos de prova em ácido sulfúrico e a terceira parte em solução de água saturada com cal, para referência. Após a cura dos corpos de prova, foi realizada a medida inicial dos mesmos em um relógio comparador e posterior imersão dos mesmos nas soluções. As medições para avaliar a variação dimensional foram realizadas aos 14, 28, 51, 58 e 63 dias. O tipo de cimento que apresentou maior variação dimensional foi o CP II-Z, sendo a menor do CP IV 32 RS, entretanto, ao longo das medições, principalmente nas primeiras idades, não foi observada apenas expansão relativa à solução de referência de água saturada com cal. A variação do pH da solução de referência e da solução de sulfato de sódio só tiveram divergência para os diferentes cimentos a partir da medição de 63 dias. Foi observada uma maior agressão pela solução de ácido sulfúrico, já havendo necessidade de realizar correção no pH da solução nas primeiras medições.

Palavras chave: Ataque ácido. Ataque por sulfatos. Variação dimensional.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teores dos componentes do cimento Portland (Os autores, 2016).	30
Tabela 2. Características do cimento Portland	31
Tabela 3. Classe de Agressividade AMBIENTAL (CAA) (ABNT, 2014a).	37
Tabela 4. Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10$ mm (ABNT, 2014).	38
Tabela 5. Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto, com consumo mínimo de cimento. (ABNT, 2014).	39
Tabela 6. Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos (ABNT, 2006).....	39
Tabela 7. Expansão média das barras de argamassa por idade de cura ^(*)	45
Tabela 8. Materiais utilizados na preparação das soluções agressivas	46
Tabela 9. Quantidade de corpos de prova (Os autores, 2016).	48
Tabela 10. Idades de medição dos corpos de prova.	50
Tabela 11. Caracterização do agregado miúdo (Os autores, 2016).	52
Tabela 12. Equações para o cálculo da massa específica do agregado (Os autores, 2016).	53
Tabela 13. Parâmetros para cálculo da massa específica dos agregados miúdos (Os autores, 2016).	54
Tabela 14. Dimensões do recipiente paralelepípedo do ensaio de massa unitária do agregado miúdo (ABNT, 1982).	54
Tabela 15. Massa mínima por amostra de ensaio (ABNT, 2003a).	55
Tabela 16. Peneiras da série normal e intermediária (ABNT, 2003a).	56
Tabela 17. Massa mínima da amostra de ensaio (ABNT, 2003c).	57
Tabela 18. Caracterização do agregado miúdo e graúdo (Os autores, 2016).	68
Tabela 19. Caracterização do cimento CP II Z, CP IV e CP V ARI. (Fonte: Relatórios dos fabricantes, 2016).	70
Tabela 20. Expansão média para os corpos de prova de argamassa (Os autores, 2016).	82

Tabela 21. Expansão resultante dos corpos de prova de argamassa com diferentes tipos de cimento (Os autores, 2016).	84
---	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Origem das manifestações patológicas (HELENE & FIGUEIREDO, 2003).....	18
Figura 2. Planta do processo de produção de cimento Portland (GOBBO, 2003).	29
Figura 3. Evolução da reação dos sistemas pozolânicos. Fonte: Hoppe, 2008.	34
Figura 4. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura	45
Figura 5. Expansão média das barras de argamassa por idade de cura	46
Figura 6. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura	46
Figura 7. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura	47
Figura 8. Sistematização do programa, incluindo o programa experimental e sua conclusão (Os autores, 2016).	49
Figura 9. Ensaio de granulometria (Os autores, 2016).....	56
Figura 10. Estufa utilizada nos ensaios (Os autores, 2016).....	61
Figura 11. Relógio comparador utilizado para medição dos corpos de prova (Os autores, 2016)	61
Figura 12. Corpos de prova imerso em água (Os autores, 2016).	63
Figura 13. Detalhe da identificação dos corpos de prova, contendo o tipo do cimento, face, número do corpo de prova e direção do ensaio de variação dimensional (Os autores, 2016).	64
Figura 14. Corpos de prova dentro do recipiente de imersão já identificados (Os autores, 2016).	64
Figura 15. Recipientes para imersão dos corpos de prova (Os autores, 2016). ...	65
Figura 16. Barra sendo medida em um comparador de medidas (Os autores, 2016).....	65
Figura 17. Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado (Os autores, 2016).....	69
Figura 18. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).	71

Figura 19. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).....	71
Figura 20. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).....	72
Figura 21. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, antes de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).	72
Figura 22. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).....	73
Figura 23. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).....	73
Figura 24. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).....	73
Figura 25. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, antes da imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).	74
Figura 26. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).....	74
Figura 27. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).	75
Figura 28. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).	75
Figura 29. Corpos de prova moldados com cimento CP V, antes da imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).....	76
Figura 30. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).....	76
Figura 31. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).	76
Figura 32. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 44 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016)	77
Figura 33. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, antes da imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).....	77

Figura 34. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).	78
Figura 35. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016)	78
Figura 36. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).	79
Figura 37. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).	79
Figura 38. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 44 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).	79
Figura 39. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de cimento CP IV-32 RS (Os autores, 2016).....	91
Figura 40. Solução de ácido sulfúrico dos corpos de prova de CP IV-32 RS após 7 dias de imersão (Os autores, 2016).....	92
Figura 41. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de CP V após 7 dias (Os autores, 2016).....	92
Figura 42. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de CP II V, após 7 dias de imersão (Os autores, 2016).....	92
Figura 43. Solução de imersão de ácido sulfúrico dos três recipientes, após 7 dias (Os autores, 2016).....	93
Figura 44. Barras moldadas com cimento CP V imersa em água saturada com cal aos 7 dias de idade (Os autores, 2016)	102
Figura 45. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	103
Figura 46. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 28 dias de idade (Os autores, 2016).....	104
Figura 47. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	105
Figura 48. Barras moldadas com cimento CP II Z imersa em água saturada com cal aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	106

Figura 49. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	107
Figura 50. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	108
Figura 51. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com cal aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	109
Figura 52. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	110
Figura 53. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	111
Figura 54. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).	112
Figura 55. Barras moldadas com cimento CP V imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).	113
Figura 56. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de sulfato de sódio aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).	114
Figura 57. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	115
Figura 58. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).	116
Figura 59. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	117
Figura 60. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	118
Figura 61. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	118
Figura 62. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	119
Figura 63. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	120

Figura 64. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade com coloração alterada.....	121
Figura 65. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	121
Figura 66. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	122
Figura 67. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	123
Figura 68. Imagem ampliada das barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).	123
Figura 69. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade com coloração alterada (Os autores, 2016).....	124
Figura 70. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	125
Figura 71. Solução em que estavam imersas as barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).....	126
Figura 72. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).....	127
Figura 73. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).	128
Figura 74. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).....	128
Figura 75. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).	129
Figura 76. Solução em que estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).	129

Figura 77. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).	130
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Expansão resultante para os corpos de prova do CP V (Os autores, 2016).....	85
Gráfico 2. Expansão resultante para os corpos de prova de CP II Z (Os autores, 2016).....	86
Gráfico 3. Expansão resultante para os corpos de prova de CP IV-32 RS (Os autores, 2016).	86
Gráfico 4. Variação da massa dos corpos de prova expostos a soluções agressivas de sulfatos (Os autores, 2016).	88
Gráfico 5: Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP IV. (Os autores, 2016)	89
Gráfico 6: Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP V. (Os autores, 2016).	89
Gráfico 7 Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP II Z. (Os autores, 2016).	90
Gráfico 8. pH da solução de ácido sulfúrico (Os autores, 2016).....	91
Gráfico 9.pH da solução de sulfato de sódio (Os autores, 2016).	93
Gráfico 10.pH da solução de água saturada com cal (Os autores, 2016).	94

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Reação do ácido sulfúrico com hidróxido de cálcio	44
(2) Reação da gipsita com aluminato de cálcio hidratado	44
(3) Equação para determinação da quantidade de material passante	58
(4) Equação para determinação da expansão resultante	83

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO.....	5
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE GRÁFICOS	14
LISTA DE EQUAÇÕES	15
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. PROBLEMA	19
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos	20
1.3. HIPÓTESE.....	20
1.4. JUSTIFICATIVAS	21
1.4.1. Tecnológicas.....	21
1.4.2. Econômicas.....	22
1.4.3. Sociais.....	23
1.4.4. Ecológicas.....	23
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	25
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1. ARGAMASSA.....	27
2.2. CIMENTO.....	28
2.2.1. CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana	32
2.2.2. CP IV-32 RS – Cimento Portland pozolânico.....	32
2.2.3. CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial	33
2.3. REAÇÃO POZOLÂNICA.....	33
2.4. DURABILIDADE DE ESTRUTURAS	35
2.4.1. Ambiente de exposição.....	36

2.5. ATAQUE POR SULFATOS	40
2.5.1. Reações do Sulfato de Sódio	42
2.5.2. Reações do Ácido Sulfúrico	43
2.5.3. Produtos Formados com o Ataque	43
2.5.4. Variação dimensional de cimentos Portland expostos às soluções agressivas	44
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	51
3.1.1. Cimento	51
3.1.2. Agregado Miúdo.....	51
3.2. ENSAIOS	58
3.2.1. Ensaio de determinação da variação dimensional de cimento Portland expostos à solução agressiva	59
3.2.2. Análise visual	66
3.2.3. Ensaio de determinação de perda de massa.....	66
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	68
4.2 caracterização do cimento.....	69
4.3 ANÁLISE VISUAL	70
4.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL	80
4.5 VARIAÇÃO DE MASSA.....	87
4.6 PH DA SOLUÇÃO	90
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
7. ANEXOS	101
7.1. FOTOS DO TRABALHO.....	101
7.1.1. Análise Visual das barras imersas em água saturada com cal....	101

7.1.2. Análise Visual das barras imersas em solução de sulfato de sódio	
.....	112
7.1.3. Análise Visual das barras imersas em solução de ácido sulfúrico	
.....	120

1.INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland tem demonstrado ser um material de construção que supera outros materiais como madeira, aço ou alvenaria, ao ser utilizado para execução de estruturas. Apesar de ser considerado um material de vida útil longa, as estruturas realizadas com esse material ainda exibem manifestações patológicas em magnitude e incidência significativas. O surgimento desse tipo de manifestação leva a altos custos para a realização de manutenções corretivas (HELENE; FIGUEIREDO, 2003).

As ações que estão associadas às manifestações patológicas em estruturas podem ser de origem externas ou internas. Sendo que o estudo de como foi originada e determinar se há outra ação associada é importante para além de definir a influência das ações sobre as estruturas, deve-se verificar a probabilidade de ocorrência, os métodos de mitigação da ação e como fazer a recuperação na mesma. Algumas ações são simples de avaliar e identificar, enquanto outras são influenciadas por mais de um fator (HUSNI et al., 2003), por isso a dificuldade de considerá-las no projeto. Por isso, o estudo do comportamento das estruturas no campo deve ser preocupação e objeto de estudo também de engenheiros, não apenas cientistas e pesquisadores (NEVILLE, 2004).

A origem das manifestações patológicas tem sido estudada e classificada por diversos autores, na Figura 1 é possível observar um desses estudos de quantificação. Sendo que 40% das manifestações patológicas são originadas por falhas no projeto, 4 % por falhas no planejamento, 28 % por falhas de execução, 18% originárias da má qualidade dos materiais e 10% é resultado do mau uso da edificação (HELENE; FIGUEIREDO, 2003).

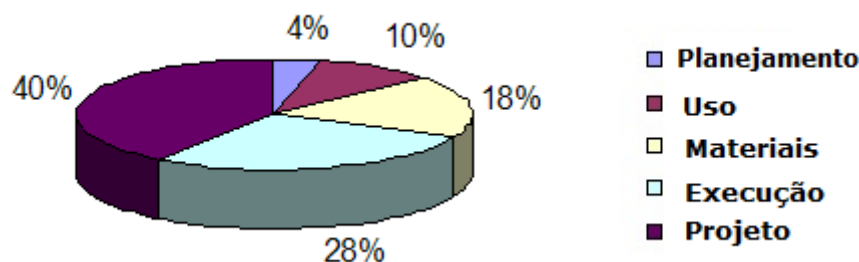


Figura 1. Origem das manifestações patológicas (HELENE & FIGUEIREDO, 2003).

Ao observar a Figura 1, nota-se que o planejamento e o projeto com suas porcentagens somadas, resultam em 44% da origem das manifestações patológicas. Logo, caso fosse realizado um estudo mais aprofundado do ambiente, projeto e/ou da estrutura, alguns custos desnecessários com manutenção corretiva, preventiva e reabilitações poderiam ser evitados (HELENE; FIGUEIREDO, 2003).

Além das falhas de projeto e falhas executivas propiciarem danos às estruturas de concreto, existem ainda diversos fatores externos que também podem majorar esses danos e devem ser sempre considerados no projeto e execução das estruturas. Os processos de deterioração do concreto podem ser causados por processos químicos ou físicos, no qual, os agentes agressivos interagem com os componentes o cimento. Dentre estes mecanismos de degradação são elencados os que causam maior danos a estruturas, sendo esses o ataque por sulfatos, a reação álcali agregados, corrosão das armaduras, que com frequência ocorre por ataque por cloretos.

O ataque por sulfatos pode ocorrer pelo contato entre o concreto e solos que contenham sulfato, em águas subterrâneas que possuem em sua concentração sulfato de magnésio, sódio e potássio. Além do sulfato de amônia estar presente em terras e águas agrícolas, ácido sulfúrico liberado por indústrias, ou ácido sulfúrico biogênico presente nos esgotos domésticos, poços de mineração e rios e pântanos que tenham matéria orgânica em processo de decomposição. O ataque por sulfatos ao concreto pode se manifestar por expansão ou fissuração, que pode levar a aumento da permeabilidade do

concreto, problemas estruturais e iniciar processos de corrosão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A NBR 6118 (ABNT, 2014a) não especifica os materiais para serem aplicados a estas estruturas sujeitas a ataque por ácido sulfúrico ou ácido sulfúrico biogênico, em particular. As especificações apenas remetem a algumas propriedades dos materiais utilizando o quesito de classificação por agressividade ambiental e então delimitam a resistência à compressão mínima, fator água/cimento máximo e o cobrimento mínimo das armaduras. Em outra parte da NBR 6118 (ABNT, 2014a) é especificado que para prevenir a expansão por sulfatos, deve-se utilizar um cimento resistente a sulfatos, sendo este regulamentado pela NBR 5737 (ABNT., 1992) e é especificado ainda um ensaio pela NBR 13853 (ABNT., 1996) para verificar se o cimento é resistente a sulfatos ou não. As normas técnicas não especificam as características deste tipo de estrutura quanto ao tipo de agregado que deve ser utilizado, tipo de impermeabilização ou até mesmo outras especificações para essas estruturas em particular.

Visto que há lacunas quanto às especificações técnicas de materiais para esse tipo de estrutura, é importante que os estudos nessa área sejam realizados com o intuito de entender os processos de degradação neste tipo de estrutura e assim gerar conhecimento científico e técnico acerca dos materiais que atendam mais satisfatoriamente as características de vida útil nestes microclimas. Assim, a presente pesquisa pretende responder a seguinte questão: a utilização de diferentes tipos de cimentos tem influência na durabilidade de corpos de prova de argamassa sujeitos ao ataque ácido por ácido sulfúrico?

1.1. PROBLEMA

A utilização de diferentes tipos de cimento em de corpos de prova de argamassa expostos à solução agressiva de ácido sulfúrico tem diferentes variações dimensionais?

1.2. OBJETIVOS

Serão apresentados os objetivos gerais e específicos da presente pesquisa.

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência do tipo de cimento na variação dimensional de corpos de prova de argamassa expostos ao ataque por soluções agressivas de ácido sulfúrico.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a. Analisar visualmente as alterações nos corpos de prova;
- b. Verificar a perda de massa dos corpos de prova de argamassa com diferentes tipos de cimento;

Avaliar a alteração na porosidade dos corpos de prova de argamassa com diferentes tipos de cimento

1.3. HIPÓTESE

Acredita-se que corpos de prova de argamassa moldados com cimento com quantidade maior de adições estariam menos sujeitos ao ataque por soluções agressivas de ácido sulfúrico, logo apresentariam menor variação dimensional. Além disso, acredita-se que o comportamento dos corpos de prova expostos a soluções de ácido sulfúrico diverge do comportamento dos corpos de prova expostos a soluções de sulfato de sódio.

Serão apresentados os objetivos gerais e específicos da presente pesquisa.

1.4. JUSTIFICATIVAS

As obras de infraestrutura, saneamento, reservatórios utilizam as estruturas de concreto armado na maior parte das suas estruturas. Mas o ambiente no qual essas estruturas estão expostas está cada vez mais agressivo e pode colocar em risco a operação do sistema, assim como a durabilidade das estruturas.

1.4.1. Tecnológicas

De acordo com Neville (2004), o ataque por sulfatos em estruturas de concreto em serviço ainda não está difundido como deveria, exceto por algumas áreas. Assim como, a classificação do grau de severidade da exposição do concreto a sulfatos apesar de estar definida e não se adequa aos danos reais causados às estruturas de concreto sob condições variadas.

Ao serem realizadas pesquisas com o intuito de mitigar as manifestações patológicas, são realizados avanços técnicos que levam a estrutura à maior durabilidade. O estudo do ataque por sulfatos tem sido realizado há bastante tempo e tem levado a melhorias em especificações que repercutem em maior durabilidade de estruturas. Para exemplificar, podemos analisar os dados expostos por Reinheimer e Khoe (2013), analisaram o corpo de prova de concreto extraído de uma Estação de Tratamento de Esgoto a partir de um projeto elaborado em 1995. A NBR 6118 – Projetos de estruturas de concreto armado – Procedimento, especificava que o concreto deveria ter 15 MPa e 1,5 cm de cobrimento das armaduras. No projeto da ETE estudada, a especificação era e 22 MPa de resistência à compressão e 2,5 cm de cobrimento de armaduras. Ainda assim foram encontradas evidências de severas manifestações de ataque por sulfatos ao concreto. Após serem realizados estudos na área foi estabelecido, na revisão atual da NBR 6118 (ABNT, 2014a), que estruturas expostas a ambientes

agressivos devem ter concreto com resistência a compressão mínima de 40 MPa e cobrimento de armaduras igual a 4,5 cm.

Apesar desse avanço, as estruturas executadas recentemente, mesmo com as especificações de projeto para ambientes agressivos, ainda apresentam manifestações patológicas, que podem ter sido ocasionadas pelo ataque por sulfatos. Logo, a necessidade de dar continuidade a estudos na área é imprescindível. Assim como a divulgação dos resultados obtidos para que os mesmos sejam considerados no planejamento e projeto de estruturas realizadas posteriormente.

1.4.2. Econômicas

Além da questão técnica tratada no item anterior é importante também ressaltar os motivos de econômica que o estudo do ataque de sulfatos pode gerar. Não é incomum encontrar estruturas com baixa vida útil e tem sido uma grande preocupação na construção civil durante os últimos 20 a 30 anos. Em alguns países desenvolvidos, em certas situações, grande percentual dos recursos, tal como 30 a 50% do total do orçamento de infraestrutura, é destinada ao reparo e manutenção das estruturas existentes. Com a percepção desse contexto, muitos governos e promotores privados estão olhando para os custos de ciclo de vida das estruturas, ao invés de analisar apenas o primeiro custo de construção inicial (HO, 2003).

Então, a pesquisa com intuito de tornar as estruturas de concreto mais duráveis, deve ser realizada com o objetivo de diminuir o custo de manutenção da edificação, além de economia de material na construção inicial ao direcionar a escolha de materiais corretos para cada finalidade e peculiaridade das estruturas. Sendo importante ressaltar que o impacto que essa economia pode vir a causar para o orçamento de uma prefeitura, estado ou governo é considerável.

1.4.3. Sociais

O estudo das manifestações patológicas em uma estrutura e o completo entendimento das mesmas podem levar os profissionais da área a utilizarem técnicas mais adequadas a manutenção, reabilitação ou recuperação de uma edificação. A correta utilização de recursos que seriam destinados a reabilitações e manutenções corretivas e podem ser destinados a outras obras. Além disso, ações nas fases de projeto e execução ou ainda as realizações de manutenções preventivas são menos onerosas do que execução de manutenções corretivas ou reformas invasivas. A “lei de Sitter”, ou “lei dos cinco”, afirma que os custos crescem em progressão geométrica de razão 5 (cinco) quanto mais tardia for a correção da deficiência. Isto significa que se a ação corretiva for tomada na fase de projeto, essa terá um custo relativo de valor um, enquanto a mesma deficiência solucionada apenas na fase de manutenção corretiva terá custo relativo de 125 (cento e vinte e cinco) (HELENE & PEREIRA, 2007).

O concreto pode estar exposto ao ataque químico em várias situações. De acordo com Real (et al, 2016), sob a ação de efluentes domésticos, ambientes industriais e agrícolas, poços de mineração e até mesmo em solos, águas subterrâneas e na atmosfera. São necessários mais estudos para melhorar entendimento dos mecanismos de degradação de argamassa e concreto frente ao ataque químico, que culminam por gerar transtornos à população com interrupção de serviços, vias e edificações.

1.4.4. Ecológicas

A dosagem adequada de concreto pode trazer economia de material, pois o material será utilizado de maneira eficiente, sem desperdícios. Logo a solução para reduzir o impacto ambiental é buscar a redução do seu consumo e do consumo dos materiais que o compõe (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Ainda é importante levar em consideração que o aumento da durabilidade das estruturas,

como reservatórios ou estações de tratamento de esgotos que possuem grande quantidade de sulfato em contato com o concreto, pode evitar o aparecimento de trincas e infiltrações que poderiam contaminar o solo, lençol freático e ambiente no qual a estação de tratamento de esgoto está inserida.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O programa experimental será realizado baseado na exposição de argamassas com diferentes tipos de cimento ao ataque por solução ácida de ácido sulfúrico. Depois, será analisado se há modificações basicamente em dois parâmetros, que serão citados a seguir:

- a) Expansão da pasta de cimento através da análise da variação dimensional dos corpos de prova de argamassa, de acordo do ensaio preconizado pela NBR 13583 Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio (ABNT., 1996);
- b) Variação de massa do corpo de prova de acordo com ensaio experimental não normatizado descrito por Girardi e Di Maggio (2011);

Os cimentos utilizados para o experimento foram cimento CP IV-32 RS, CP II Z e CP V. Os corpos de prova de argamassa serão de 2,5x2,5x28,5 cm de acordo com o especificado pela NBR 13853 (ABNT., 1996). Assim como, o traço determinado para o ensaio foi 1:3,2:0,6, também especificado pela NBR 13853(ABNT, 1995).

A norma preconiza o ensaio com CP nas idades de 14, 28 e 42 dias contados a partir do instante em que os corpos-de-prova são expostos às condições de cura final, ou seja, exposição à aquosa com solução sulfato de sódio com concentração de 100000ppm (de Na_2SO_4). Para complementar o estudo os corpos de prova foram expostos imersos em soluções de ácido sulfúrico a concentração de 1% e imersos em água.

No fim do período de ataque por sulfatos, serão confeccionados gráficos demonstrando a evolução de cada característica escolhida de acordo com as idades dos ensaios e outro inter-relacionando os três parâmetros alcançados, esperando assim chegar a alguma conclusão e/ou interligação de fenômenos oriundos da exposição à solução agressiva.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta cinco capítulos que visam aprofundar o estudo da variação dimensional de corpos de prova de argamassa expostos ao ataque por soluções agressivas de sulfato.

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

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre a microestrutura do concreto e do cimento as reações de hidratação do cimento, o mecanismo de ataque por sulfatos, assim como maneiras já estudadas para a mitigação dos mesmos.

O Capítulo 3 trata sobre os procedimentos experimentais realizados com corpos de prova expostos a soluções agressivas de sulfato de sódio e ácido sulfúrico dentre os outros ensaios utilizados para avaliar as propriedades dos corpos de prova de argamassa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e a análise dos resultados deste estudo com base nos ensaios empregados e com resultados obtidos anteriormente na literatura.

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

No presente capítulo foram apresentados o problema da pesquisa a hipótese e os objetivos que motivaram a realização deste trabalho. No capítulo a seguir é possível compreender alguns assuntos no âmbito do ataque por sulfatos e

ácido sulfúrico, que podem influenciar a severidade deste ataque, assim como os métodos de mitigação do mesmo.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No capítulo 1 foi abordado o objeto de estudo dessa pesquisa que é a manifestação patológica do ataque por sulfatos. Foram apresentados também o objetivo geral da pesquisa, os objetivos específicos e o procedimento de estudo experimental que será apresentado nesse trabalho. Para melhor compreensão do assunto abordado, é necessário o conhecimento de alguns conceitos sobre as estruturas de concreto, cimento e as manifestações dos ataques por sulfatos que serão apresentados ao longo do capítulo 2.

2.1. ARGAMASSA

Argamassas possuem uma importante aplicação na construção civil, podendo ser empregadas em assentamentos, encunhamento, revestimentos de teto ou parede ou contrapisos.

A NBR 13.281:2005 define argamassas como uma mistura homogênea de agregado (s) miúdo (s), aglomerante (s) inorgânico (s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Silva (2006) dispõe que os revestimentos de argamassas têm, em geral, as seguintes funções:

- Proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos e, por consequência, evitar a degradação precoce das mesmas, aumentando a durabilidade e reduzindo os custos de manutenção dos edifícios;
- Auxiliar as vedações a cumprirem com as suas funções, tais como: isolamento termo acústico, estanqueidade à água e aos gases e segurança ao fogo;

- Estéticas, de acabamento e aquelas relacionadas com a valorização da construção ou determinação do padrão do edifício (*apud* SABBATINI, 1984).

Quando argamassas precisam desempenhar a função de proteção a porosidade é uma das características mais importantes a serem atentadas, já que caso os poros estejam interligados, o material terá elevada permeabilidade e este terá maior propensão a apresentar manifestações patológicas. Segundo Lourenço (2010), o traço é o fator de influência direta e maioritária nas características de resistência mecânica e porosidade das argamassas. Tão importante quanto os materiais que constituem a argamassa é a relação com que estes são doseados, e esta relação da quantidade de agregado, ligante e água é denominada traço.

Neste caso a escolha do cimento também é um fator importante em argamassas, já que cada tipo de cimento possui uma composição diferente e conseqüentemente acarreta em comportamentos e desempenhos diferentes. Os tipos de cimento serão descritos no item a seguir.

2.2. CIMENTO

Os materiais utilizados nas estruturas devem ser escolhidos para proporcionar maior vida útil à estrutura, por isso, deve-se estudar com cautela o ambiente no qual o material está sendo inserido.

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes que reage em contato com água, endurecendo e se tornando um material insolúvel e resistente a diversos agentes ambientais. De acordo com ABCP (2003), ele foi patenteado em 1824, na Inglaterra, e o seu nome é devido à semelhança com a coloração da pedra de Portland, ilha ao sul do país. A união do cimento Portland com água e outros materiais de construção, tais como areia, pedra britada, pó-de-pedra e cal, resulta em argamassas e concretos utilizados na construção em geral.

O cimento Portland é composto de clínquer, o principal componente, e de adições, que variam conforme o tipo de cimento. O clínquer tem como

matérias-primas o calcário e a argila. Após a britagem da rocha calcária, a mistura dos materiais é feita e passa por forno de altas temperaturas, resultando no clínquer, que é posteriormente moído. As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland. Essas outras matérias-primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (GIRARDI, 2014).

A figura abaixo ilustra o processo de produção do cimento Portland, apresentado por Gobbo (2003):

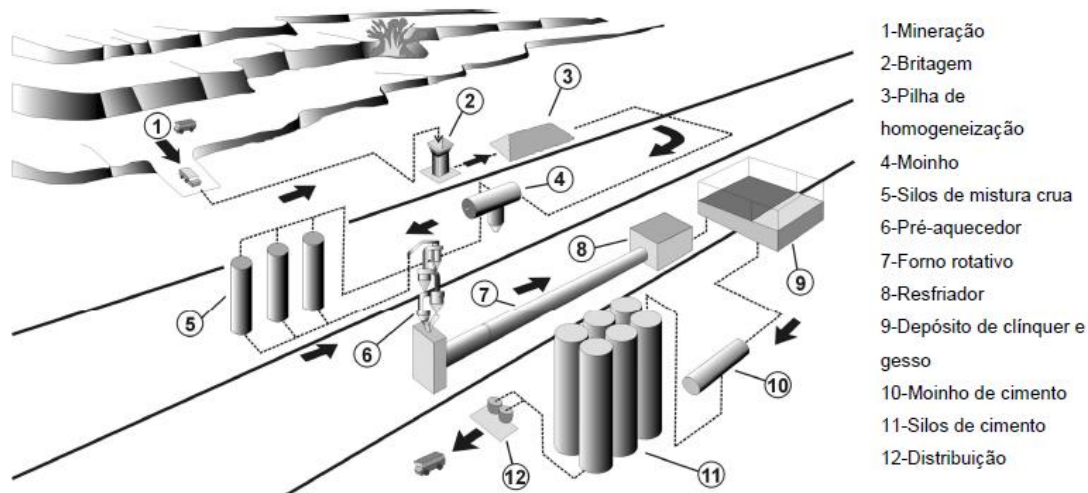


Figura 2. Planta do processo de produção de cimento Portland (GOBBO, 2003).

Gobbo (2003) desenvolveu um trabalho de caracterização e quantificação dos compostos químicos do clínquer de cimento Portland. De acordo com ele os constituintes do clínquer podem ser subdivididos em três grupos:

- Os silicatos cálcicos, compostos mais abundantes, C_3S (Ca_3SiO_5) e C_2S (Ca_2SiO_4), que são normalmente cristais bem formados;
- A fase intersticial, aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos, C_3A ($Ca_3Al_2O_6$) e C_4AF (Ca_4AlFeO_5);
- Compostos menos frequentes, como periclásio (MgO), cal livre (CaO), entre outros.

A ABNT regulamenta os seguintes tipos de cimento Portland:

- CP I – Cimento Portland comum
- CP I-S – Cimento Portland comum com adição
- CP II-E– Cimento Portland composto com escória
- CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana
- CP II-F – Cimento Portland composto com fíler
- CP III – Cimento Portland de alto-forno
- CP IV – Cimento Portland pozolânico
- CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

Abaixo são apresentados os teores dos componentes de cada um dos tipos de cimento Portland:

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)				Norma Brasileira ABNT
			Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória gran de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I	25	100	-	-	-	NBR 5732
		32					
		40					
	CP I-S	25	99 - 95	-	1 - 5	-	
		32					
		40					
Composto	CP II-E	25	94 - 56	6 - 34	-	0 – 10	NBR 11578
		32					
		40					
	CP II-Z	25	94 - 76	-	6 - 14	0 – 10	
		32					
		40					
	CP II-F	25	94 - 90	-	-	6 - 10	
		32					
		40					
Alto-forno	CP III	25	65 - 25	35 - 70	-	0 - 5	NBR 5735
		32					
		40					
Pozolânico	CP IV	25	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
		32					
Alta resistência inicial	CP V-ARI		100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

Tabela 1. Teores dos componentes do cimento Portland (Os autores, 2016).

De acordo com o tipo de cimento, a ABNT especifica quais as resistências a compressão esperadas em certas idades, de acordo com metodologia de ensaio da NBR 7215 (ABNT, 1996) e qual a superfície específica Blaine, de acordo com NBR NM 76 (ABNT, 1998). Estes valores podem ser observados na tabela abaixo:

Tipo de Cimento Portland	Classe de resistência	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	Resistência à compressão (MPa)				
			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CP I CP I-S	25	≥ 2400	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	-
	32	≥ 2600		≥ 10	≥ 20	≥ 32	
	40	≥ 2800		≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP II-E CP II-F CP II-Z	25	≥ 2400	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	-
	32	≥ 2600		≥ 10	≥ 20	≥ 32	
	40	≥ 2800		≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP III	25	-	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32			≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 48
	40			≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 40
CP IV	25	-	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32			≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
CP V-ARI		≥ 3000	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	

Tabela 2. Características do cimento Portland

Além disso, existem características específicas que podem ser acrescentadas aos tipos de cimento citados acima:

- RS – Cimento Portland Resistente a Sulfatos
- BC – Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
- CPB – Cimento Portland Branco

Neste trabalho foram utilizados para comparação os cimentos CP II-Z, CP IV-32 RS e CP V-ARI, onde apenas o CP V-ARI não possui atividade pozolânica.

2.2.1. CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana

A ABNT (1991) define na NBR 11578 o que é Cimento Portland Composto:

Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

No caso específico do CP II-Z, o material pozolânico representa de 6 a 14% em massa do cimento, podendo ser natural ou artificial.

São citados pela ABNT (1991) alguns materiais pozolânicos que podem ser inseridos para a fabricação do CP IV:

- Pozolanas naturais: materiais geralmente ácidos de origem vulcânica;
- Pozolanas artificiais: argilas calcinadas, cinzas volantes, escórias siderúrgicas ácidas, microssílica, rejeito silicoalminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral.

2.2.2. CP IV-32 RS – Cimento Portland pozolânico

O cimento Portland pozolânico, CP IV-32 RS, assim como o CP II-Z, possui em sua formulação um percentual de material pozolânico. O que os diferencia é o percentual deste material frente ao total de aglomerante, maior no CP IV-32 RS. Para o CP IV-32 RS este percentual deve estar compreendido entre 15 e 50%.

2.2.3. CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, tem a particularidade de atingir altas resistências mais rapidamente que os demais tipos de cimento. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, atingindo valores de superfície específica Blaine acima dos 3000 cm²/g. Ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade. Assim como o CP-I, o CP V-ARI não contém adições, apenas até 5% em massa de material carbonático (GIRARDI, 2014)

O CP V ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. É muito utilizado para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte (ABCP, 2016).

2.3. REAÇÃO POZOLÂNICA

As pozolanas podem ser materiais naturais, que geralmente são materiais de origem vulcânica; artificiais, que são materiais resultantes de processos industriais ou de tratamento térmico, como, por exemplo, a sílica ativa e cinzas volantes; ou calcinadas, que são provenientes da calcinação de argilas, que quando submetidas à altas temperaturas garantem a reatividade do hidróxido de cálcio, por exemplo o metacaulim. Os materiais pozolânicos possuem pouca ou nenhuma atividade ligante, porém por estarem finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio na presença da água ou em solução alcalina, formando compostos com propriedades ligantes, normalmente silicatos ou aluminatos de cálcio (MEDINA, 2011).

A diferença da reação pozolânica e da reação da hidratação do cimento é que o cimento, ao se hidratar, produz hidróxido de cálcio como

subproduto, enquanto a cinza volante o consome por atividade pozzolânica. (HOPPE, 2008)

Estudos feitos por Hoppe (2008) mostraram atividade pozzolânica de corpos de prova moldados com argamassa na proporção de 22% de cal hidratada e 78% de cinza volante e com 45% de hidróxido de cálcio e 55% de cinza volante. O gráfico abaixo mostra a evolução da reação pozzolânica representada pela termogravimetria, onde a faixa 1, de 30°C a 125°C é atribuída à decomposição de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a faixa 2, de 125°C a 225°C, e a faixa 3, de 225°C a 415°C, são atribuídas à decomposição das fases do aluminato, entre 415°C e 600°C há desidratação do hidróxido de cálcio, e a partir de 600°C acontece a volatilização do anidrido carbônico do carbonato de cálcio. Observa-se que nas idades até 28 dias há evidente formação de aluminatos hidratados (pico na DTG na temperatura de 170°C) e pode-se observar então expressiva formação de C-S-H a partir desta idade.

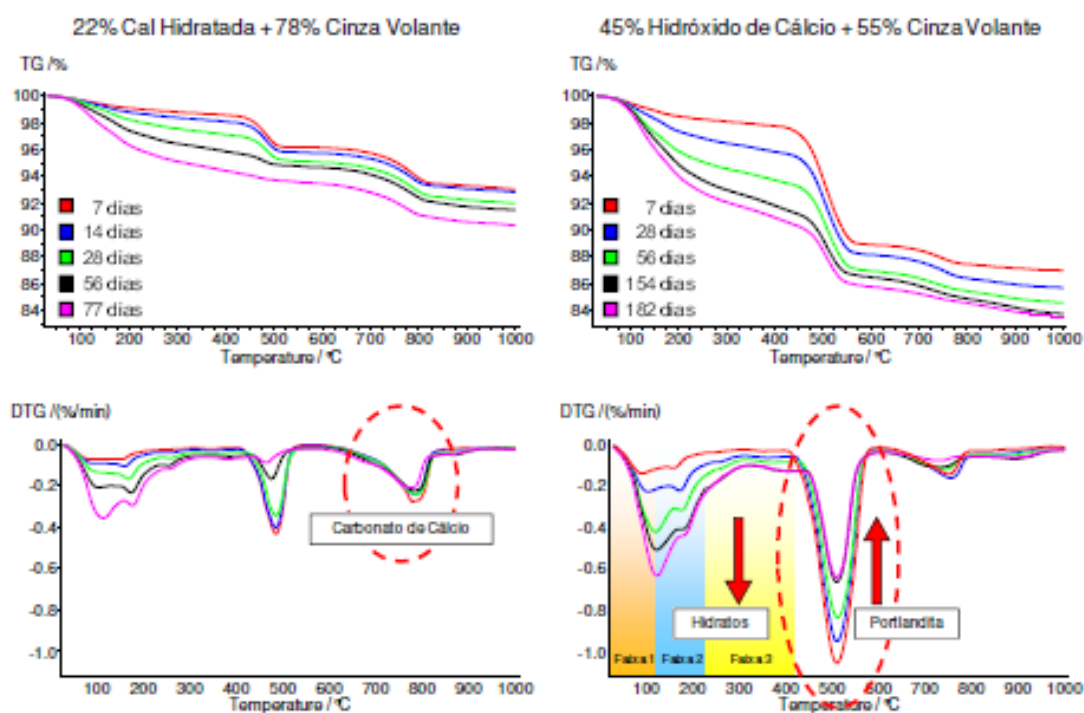


Figura 3. Evolução da reação dos sistemas pozzolânicos. Fonte: Hoppe, 2008.

Outrossim, foi observado que o maior teor de hidróxido de cálcio aumenta a taxa de formação do C-S-H e das fases aluminato nos primeiros 56

dias de reação e a partir desta idade a reação se assemelhou com a reação da pasta com cal hidratada. A partir de 154 dias as taxas de reação observadas foram mínimas e a partir de 182 dias tenderam à nulidade. (HOPPE, 2008).

Segundo Kobayakawa (et al, 2003) citado por Hoppe (2008), em seu estudo o consumo de portlandita se estabilizou ao longo do tempo, mantendo um elevado teor remanescente após 6 meses de reação.

A reação pozolânica ocorre somente após a hidratação da alita e da belita e da consequente formação do $Ca(OH)_2$, isto posto, pode-se determinar que as reações pozolânicas e de hidratação do cimento ocorrem separadamente, e que a pozolânica é mais lenta que a hidratação do clínquer. Entretanto, os produtos obtidos destas reações possuem a mesma composição básica (MASSAZZA, 1980 apud HOPPE, 2008).

2.4. DURABILIDADE DE ESTRUTURAS

A durabilidade das estruturas de concreto deve estar atrelada a atitudes coordenadas de dos processos de projeto construção e utilização, sendo ainda relacionadas às diretrizes adotadas para o uso, inspeção e manutenção das edificações e estrutura (ABNT, 2014a).

A ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014a) elenca os mecanismos de ataque que podem vir a causar deterioração do concreto, dentre eles estão lixiviação, expansão por sulfatos e reação álcali agregado. Mas também são citados os mecanismos que podem causar a deterioração da armadura presente nas estruturas, sendo eles: despassivação por carbonatação, despassivação por ação de cloretos(COSTA, 2004).

Kulisch (2011) classifica os mecanismos de degradação das estruturas de concreto em agentes físicos, químicos e biológicos. Os agentes físicos são: a variação de temperatura, umidade, ciclo de gelo e degelo, ciclos de umedecimento e secagem. Enquanto os agentes biológicos se referem aos micro-organismos, algas, solos e águas contaminadas, já os agentes químicos se referem

à carbonatação, água do mar, chuva ácida, corrosão, ataque de ácidos, águas brandas e resíduos industriais.

Dentre os mecanismos citados está o ataque ácido, que ocorre quando o concreto está inserido em ambientes agressivos. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), é considerado agressivo qualquer ambiente com pH menor do que 12,5, pois reduz a alcalinidade da solução dos poros e desestabiliza os produtos da hidratação.

Dentre os ataques ácidos ou ataques químicos, está o ataque por sulfatos, que será a manifestação patológica estudada nesse trabalho, com algumas de suas peculiaridades apresentadas na sequência.

2.4.1. Ambiente de exposição

No que diz respeito a estruturas de concreto armado, a NBR 6118 regulamenta que as estruturas de concreto devem ser projetadas para o ambiente no qual as mesmas serão inseridas. Ao serem executadas, conforme os projetos precisam conservar a sua segurança aptidão e estabilidade durante a vida útil. Sendo que o conceito de vida útil atribuído é “o período no qual a estrutura mantém as suas características iniciais sem intervenções significativas”(ABNT, 2014a). A norma em questão também classifica a agressividade ambiental de acordo com as condições de exposição da estrutura, como está apresentado na Tabela 3.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a,b}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{a,c}	Elevado
		Respingos de maré	
a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura) b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou região onde raramente chove. c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas			

Tabela 3. Classe de Agressividade AMBIENTAL (CAA) (ABNT, 2014a).

Ainda explorando as especificações normativas da NBR 6118, é imprescindível considerar as características do concreto, espessura e qualidade do concreto e do cobrimento da armadura e ainda sugere que sejam realizados ensaios comprobatórios de desempenho da estrutura frente o nível de agressividade. Como nem sempre é possível realizar ensaios, então a norma orienta que sejam estabelecidos padrões de dosagem que estabeleçam uma relação direta entre o fator água/cimento, a resistência à compressão, sendo que os valores mínimos e máximos são expressos na Tabela 6.

As especificações da NBR 6118 quanto ao cobrimento estão relacionadas à agressividade do ambiente em questão, como pode ser observado na Tabela 4.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ²	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹	Todos	30	35	45	55

1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4, 7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Tabela 4. Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm (ABNT, 2014).

Sabe-se ainda que existe uma relação entre o fator água/cimento, o consumo de cimento por m³ e a resistência a compressão, por isso foram estipulados valores mínimos de resistência à compressão e de fator água cimento expressos pela NBR 6118, que estão ilustrados na Tabela 5, sendo que na NBR 12655 essa tabela esta reproduzida e ainda com um acréscimo dos valores mínimos de consumo de cimento por m³ de concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,65$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
NOTA: CA componentes e elementos estruturas de concreto armado; CP Componentes e elementos estruturas do concreto protendido					

Tabela 5. Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto, com consumo mínimo de cimento. (ABNT, 2014).

A NBR 12655 estabelece as concentrações de sulfato solúvel presente em água para diferentes classes de agressividade, como pode ser observado na Tabela 6. A norma brasileira em questão especifica que para condições de agressividades severas com concentração acima de 1500 ppm de sulfato solúvel em água deve-se adotar a utilização de cimentos resistentes a sulfatos (ABNT, 2006).

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água (ppm)	Máxima relação água cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Minimof _{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	--	--
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa**	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40
*Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.				
** Água do mar				
*** Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.				

Tabela 6. Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos (ABNT, 2006)

Em diversos estudos foram apresentados casos nos quais as estruturas estavam expostas a concentrações muito maiores de sulfatos, ou seja, é possível que a norma seja muito pouco restritiva nesse aspecto.

2.5. ATAQUE POR SULFATOS

As estruturas de concreto podem sofrer ataques por diversos tipos de sulfatos, sendo que a origem do sulfato pode ser classificada com interna ou externa. O ataque por sulfatos interno é tido quando o sulfato é encontrado nos componentes do cimento como cimento, agregado, aditivos, adições, água.

O ataque por sulfatos externo é a fonte de sulfato que será estudada nesse trabalho e é possível ser encontrada de várias formas no ambiente. No solo ou em águas subterrâneas (FATTUHI; HUGHES, 1988) pode ser encontrado como sulfato de cálcio (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2003), sulfato de magnésio, sódio e potássio (MEHTA e MONTEIRO, 2008; SKALNY, MERCHAND, ODLER, 2002). Em água subterrâneas é possível encontrar ácido sulfúrico como resultado da oxidação de minerais sulfetos minerais como pirita e marcassita, sendo esse processo acelerado pelas bactérias aeróbicas, *thiobacillus* oxidantes de ferro encontradas nesses ambientes (FATTUHI; HUGHES, 1988). Os sulfatos ainda podem estar presentes na atmosfera (COSTA, 2004; SKALNY, MERCHAND, ODLER, 2002) como SO_3 (SKALNY, MERCHAND, ODLER, 2002), em águas residuárias industriais, fertilizantes na forma de ácido sulfúrico, sulfato de magnésio, sulfato de amônia (SKALNY, MERCHAND, ODLER, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2008), no mar (COSTA, 2004). Assim como também é há possibilidade de encontrar sulfatos provenientes da decomposição bacteriana de pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubulações de esgoto formam gás sulfídrico e ácido sulfúrico (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em estações de tratamento de água e efluentes o ataque pode ser proveniente dos próprios produtos químicos usados rotineiramente nos tratamentos. Assim como, a água ou o esgoto podem conter substâncias químicas que em contato com os compostos de cimento hidratado, então existentes nas estruturas de concreto das que armazenam esses compostos, estarão sujeitos às reações químicas (KULISCH, 2011).

O ataque por sulfatos ocorre devido às reações dos sulfatos com componentes do cimento, como o hidróxido de cálcio livre e com os aluminatos

de cálcio hidratados, que são compostos resultantes da hidratação do cimento. Os produtos dessas reações são, respectivamente, gesso e o sulfoaluminato de cálcio, que se cristalizam com a água num processo acompanhado por aumento de volume, ou expansão. Essa expansão é seguida de fissuração progressiva de configuração irregular o que facilita o acesso de novas soluções de sulfato ao interior da estrutura. Ao ocorrer o ataque por sulfatos, o concreto adquire uma aparência esbranquiçada característica, podendo ocorrer também o desprendimento de lascas.

Quando se fala em mecanismos de ataque por sulfatos, existem duas linhas de pensamento dos pesquisadores. A primeira considera que deve ser considerado ataque por sulfatos, quando há presença de sulfatos no ambiente e não importa qual é o mecanismo que está atuando. Enquanto a segunda linha de pensamento pondera as consequências das reações químicas entre os íons de sulfato e a pasta de cimento hidratada, então ocorrem mudanças químicas da pasta de cimento, que causam danos (NEVILLE, 2004). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ataque por sulfatos se manifesta por expansão ou por perda progressiva de resistência e massa.

Os danos são físicos e os mesmos danos podem ocorrer com outros sais, sendo assim considerados ataque físico ou ataque físico por sulfatos. A principal diferença é que o ataque químico envolve necessariamente o íon de sulfato, enquanto o ataque físico envolve a cristalização de sais que pode também ocorrer com íons de sulfatos. A importância de reconhecer os produtos das reações de variados tipos de ataque é que as consequências causadas ao concreto resultam em diferentes tipos de danos, então as medidas preventivas também variam (NEVILLE A. , 2004).

Um dos fatores que contribuem para a manifestação do ataque é a estrutura de poros do concreto, assim como a intensidade dos agentes agressivos o facilitam a entrada de fluídos (GAIER, 2005). Mehta e Monteiro (2008) confirmam a constatação anterior, ao concluírem que a taxa do ataque químico será função do pH do fluído agressivo e da permeabilidade de concreto. Sendo que a permeabilidade é elevada se a porosidade for grande e os poros estiverem

interligados, permitindo o deslocamento dos fluídos através do concreto. Mas, se os poros forem descontínuos ou excessivamente estreitos ou tortuosos para permitir o deslocamento de fluídos, a permeabilidade do concreto diminui mesmo com porosidade alta.

A entrada desses fluídos ou gases se dá também pelas microfissuras na matriz da pasta de cimento em especial na interface da pasta-agregado (GAIER, 2005). Os íons sulfato podem penetrar através dos poros do concreto ou argamassa e reagir com os compostos hidratados do cimento, principalmente com os aluminatos tricálcicos (C_3A) e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). A partir desta reação formam-se compostos expansivos como a etringita e a gipsita, capazes de gerar o tensionamento da matriz e a entrada de novos agentes agressivos (LINHARES, 2010)

2.5.1. Reações do Sulfato de Sódio

O mecanismo de ataque por sulfato ao concreto pode ocorrer, primeiramente, da reação do sulfato de sódio com os produtos de hidratação da alumina ou aluminato tricálcico não hidratado produzindo etringita, que leva a expansão da pasta de cimento que compõe o concreto endurecido (COSTA, 2004).

No caso do sulfato de sódio, o mesmo reage com o hidróxido de cálcio (portlandita) e forma o sulfato de cálcio (gipsita). Nos ambientes em que o sulfato de sódio presente seja repostado com o tempo, a reação ocorre até que toda a portlandita seja consumida, então, após algum tempo com a reação ocorrendo, não será mais possível encontrar portlandita na composição da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2004).

O sulfato de cálcio, produto da reação da portlandita com sulfato de sódio, pode ainda reagir com o C_3A , formar a etringita e essa reação pode ou não causar expansão (NEVILLE, 2004).

2.5.2. Reações do Ácido Sulfúrico

O processo de expansão produz cristais no interior da pasta de cimento endurecida provocada por ataque de sais, no início a resistência aumenta, pois, estes cristais preenchem os poros da pasta dando a esta compacidade, ao decorrer da formação dos cristais podem surgir tensões internas que fissuram o concreto (GAIER, 2005).

2.5.3. Produtos Formados com o Ataque

A importância de reconhecer os produtos das reações de variados tipos de ataque é que as consequências causadas ao concreto resultam em diferentes tipos de danos, então as medidas preventivas também variam (NEVILLE, 2004).

Na pesquisa realizada por Monteny (2000), os corpos de prova de concreto foram expostos a soluções agressivas de ácido sulfúrico em laboratório e in situ. Verificou-se a formação, principalmente de gipsita e etringita em ambas as situações. A gipsita é formada no processo de deterioração do concreto, tem a consistência de "queijo cottage". Tanto a etringita, quanto a gipsita não fornecem suporte estrutural concreto.

A presença de etringita e gipsita também foram verificadas na pesquisa de Chang (et al, 2005), nos quais os corpos de prova de concreto foram submetidos ao ácido sulfúrico, é importante ressaltar que as amostras foram analisadas após imersão por 168 dias em ácido sulfúrico 1%. Jeffrey (et al, 1998) verificou em suas amostras que havia presença de gipsita, mas que a porção de etringita no concreto deteriorado era pequena, então é possível que os compostos tenham formado etringita por um curto período de tempo. As amostras da pesquisa realizada por Jeffrey (et al, 1998) foram coletadas de tubulações de concreto localizadas na cidade de Houston (EUA).

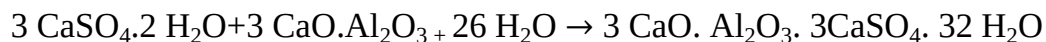
A formação da gipsita pode ser descrita com a reação do ácido sulfúrico com o hidróxido de cálcio, sendo essa apresentada na Equação **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**) (GUTIÉRREZ-PADILLA et al, 2010; CHANG, et al, 2005).



O ácido sulfúrico também reage com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (YUAN et al., 2013), muito embora a reação com a portlandita seja mais rápida do que com o C-S-H (GIRARDI; VAONA; DI MAGGIO, 2010).

Após a formação da gipsita, a mesma reage com o aluminato de cálcio hidratado (C_3A) e produz etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que possui propriedades expansivas (YOUSEFI; ALLAHVERDI; HEJAZI, 2014), de acordo com a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresentada.

(2)



A etringita não é formada em ambiente nos quais o pH é muito baixo, como no sistema de tratamento de esgotos o pH pode chegar abaixo de 2, então, nem sempre é possível encontrar esse composto. Embora, ao analisar o concreto em profundidades maiores do que a região degradada, é possível encontrar vestígios de etringita, pois a profundidade é suficiente para o ácido sulfúrico penetrar, mas o pH ainda não reduziu tanto (SKALNY, MARCHAND e ODLER, 2002).

2.5.4. Variação dimensional de cimentos Portland expostos às soluções agressivas

Centurione, Kihara e Battagin (2003) estudaram a variação volumétrica de barras de argamassa confeccionadas com cimentos CP IV-32 RS, CP II-Z e CP II-F. Os resultados podem ser observados na Tabela 7 e na Figura 3, onde se observa uma tendência mais acentuada de expansão apenas de uma das três amostras de CP II-F, com maior teor de C3A. As demais amostras oscilam mantendo valores menores de expansão, próximas as de CP II-Z. Os menores valores encontrados são da amostra de CP IV-32 RS.

Idade (dias)	Amostras				
	A (CP IV-32)	B (CP II-Z-32)	C (CP II-F-32)	D (CP II-F-32)	E (CP II-F-32)
7	0,007	0,008	0,007	0,007	0,005
14	0,004	0,008	0,012	0,010	0,009
21	0,005	0,009	0,020	0,012	0,009
28	0,002	0,008	0,028	0,014	0,009
35	0,004	0,008	0,040	0,013	0,010
42	0,004	0,013	0,058	0,015	0,013

(*) Valores de expansão média ($A_e = E_s - E_a$), onde:

E_s = Média das variações dimensionais dos quatro corpos-de-prova curados em solução de sulfato de sódio.

E_a = Média das variações dimensionais dos quatro corpos-de-prova curados em solução saturada de cal.

Tabela 7. Expansão média das barras de argamassa por idade de cura (*)
Fonte: CENTURIONE, KIHARA E BATTAGIN (2003).

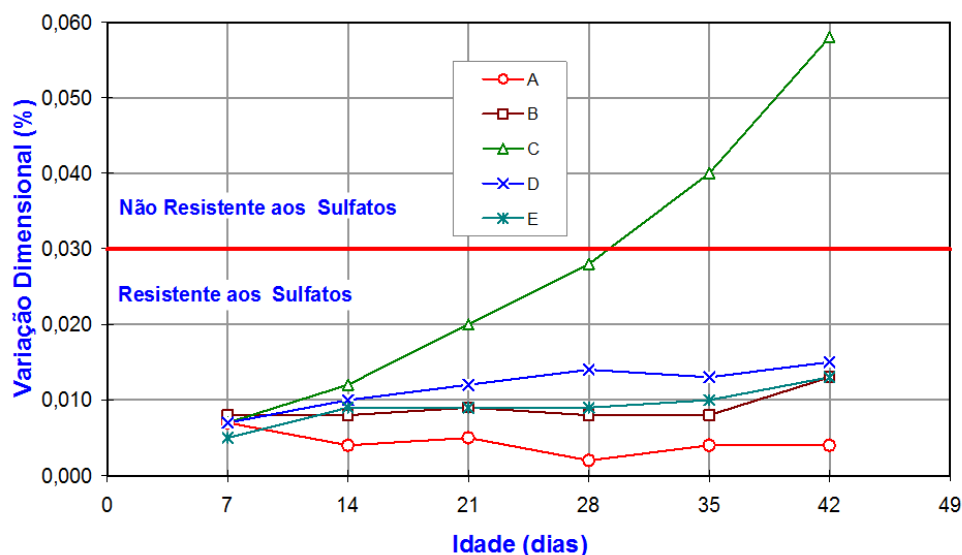


Figura 4. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura
Fonte: CENTURIONE, KIHARA E BATTAGIN (2003).

O trabalho desenvolvido por Kulisch (2011) avaliou o efeito de variadas concentrações de íon sulfato no ataque a corpos de prova de argamassa com cimento CP II-F. Os resultados apontam expansão acima do 0,03% de

referência para a Série 1, que segue os parâmetros da NBR 13583 (ABNT, 1996) para a determinação de resistência a sulfatos. Para as demais concentrações, de menor agressividade, os resultados foram dispersos.

	Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Série 5
Na ₂ SO ₄ (g/L)	100	0,067	0,592	2,22	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	67605,63	45,35	400	1500	-
Volume total (L)	2,5	2,5	2,5	2,5	-
Na ₂ SO ₄ (g)	250	0,17	1,48	5,55	-

Tabela 8. Materiais utilizados na preparação das soluções agressivas
Fonte: KULISCH (2011).

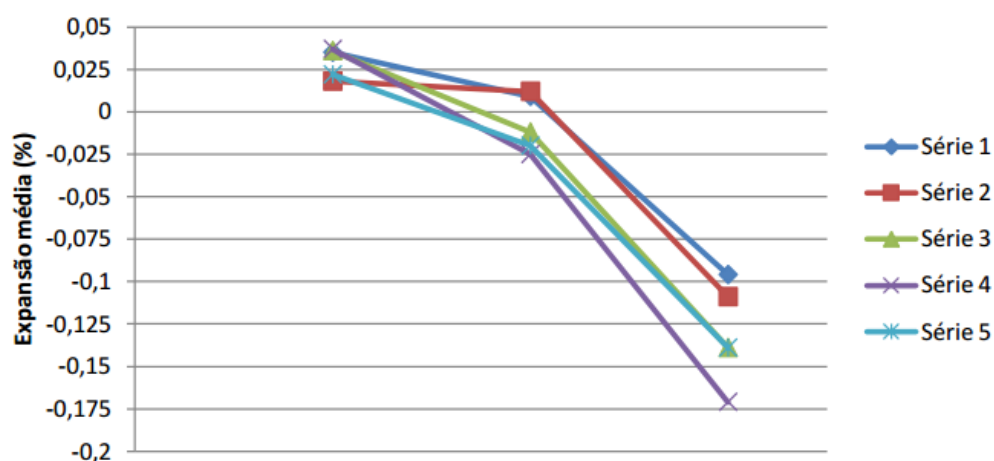


Figura 5. Expansão média das barras de argamassa por idade de cura
Fonte: KULISCH (2011).

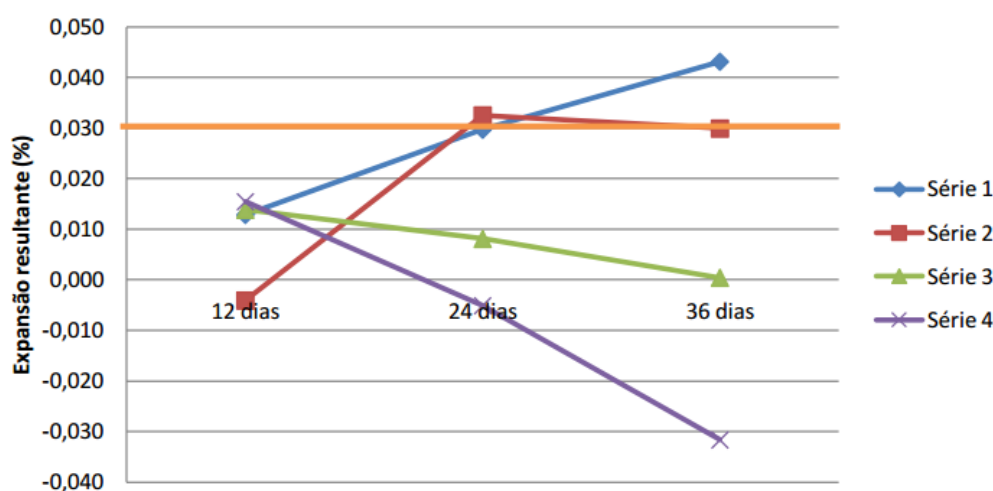


Figura 6. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura
Fonte: KULISCH (2011).

Hoppe Filho (et al, 2015) estudou o efeito de adições em argamassa confeccionada com CP V-ARI. As adições feitas foram de 10%, em massa. Como resultado, todas as amostras tiveram expansão resultante, entretanto as com adições pozolânicas tiveram menor expansão que o CP V-ARI.

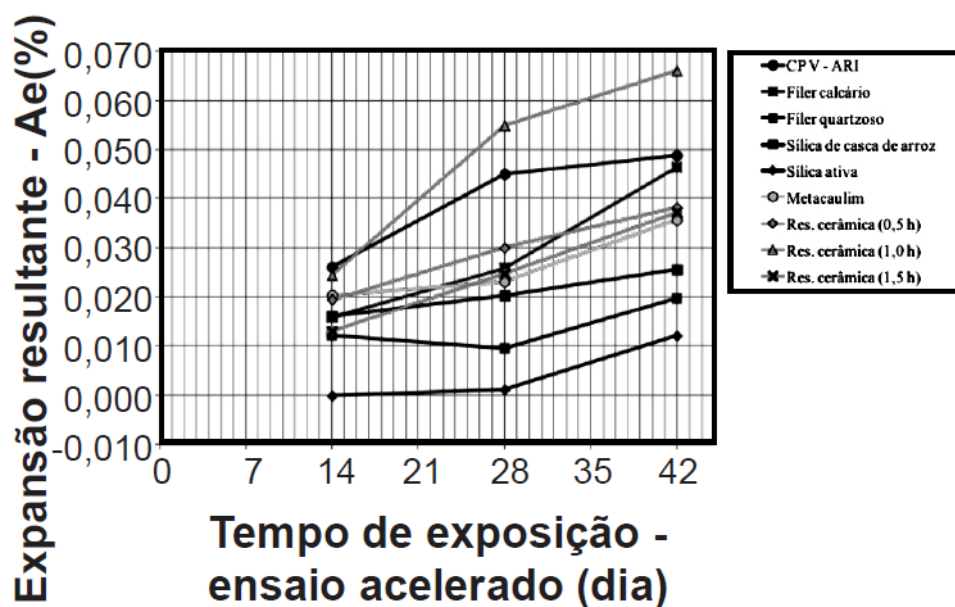


Figura 7. Expansão média resultante das barras de argamassa por idade de cura
Fonte: HOPPE FILHO ET AL. (2015).

3.PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme o panorama apresentado na revisão bibliográfica do capítulo 2, o programa experimental será descrito detalhadamente neste capítulo 3. Resumidamente o programa experimental consiste na moldagem de corpos de prova de argamassa prismáticos de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm, com diferentes tipos de cimento (CP II Z, CP IV-32 RS e CPV-ARI). Os corpos de prova serão expostos a soluções agressivas de sulfato de sódio e ácido sulfúrico e será realizada a medição da expansão ao longo do tempo, durante o período descrito na norma técnica e também excedendo o tempo enquanto for possível obter resultados para os ensaios e apresentação dos mesmos, onde também são feitas análises visuais nas idades de medição. As medições de expansão serão relacionadas com a perda de massa dos corpos de prova ao longo do tempo.

Para que seja possível realizar análise estatística dos resultados uma vez que o ensaio de variação dimensional com ácido sulfúrico não é normatizado, foram moldados dois corpos de prova a mais do que os quatro especificados pela norma. No entanto, após a moldagem houve a quebra de três corpos de prova de CP IV-32 RS, desta maneira, foram utilizados cinco corpos de prova por série para este tipo de cimento. A quantidade de corpos de prova utilizados será descrita na Tabela 9.

Cimento	Água	Ácido sulfúrico	Sulfato de Sódio	Total
CP II Z	6	6	6	18
CP IV-32 RS	5	5	5	15
CP V	6	6	6	18
Total				51

Tabela 9. Quantidade de corpos de prova (Os autores, 2016).

A sistematização do programa será feita conforme descrito no quadro da figura abaixo, incluindo o programa experimental e a conclusão.

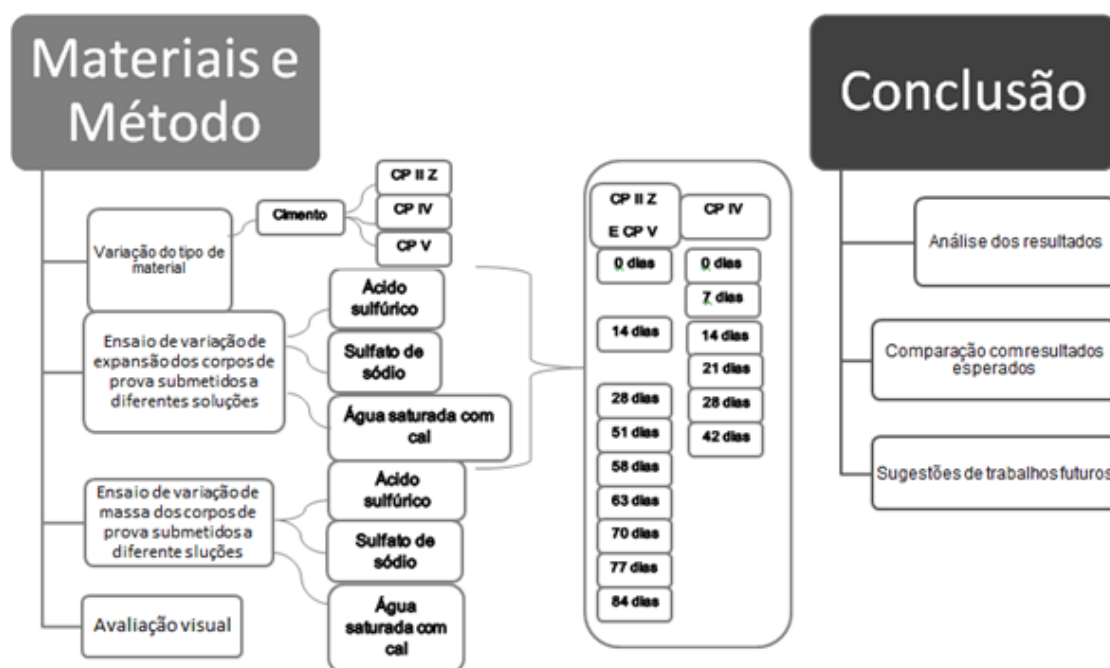


Figura 8. Sistematização do programa, incluindo o programa experimental e sua conclusão (Os autores, 2016).

Baseados nestes estudos expostos no item 2.3, que mostram que a atividade pozolânica se estende nas idades iniciais de concretos e argamassas, decidiu-se estender o tempo de cura deste trabalho em comparação ao tempo previsto em norma, para que as reações pozolânicas fossem mínimas. Se o corpo de prova fosse submetido à solução agressiva após 48 horas conforme previsto em norma, ao mesmo tempo em que as reações estariam acontecendo, este estaria sendo atacado. O período de cura adotado foi de 104 dias para os corpos de prova expostos à solução de sulfato de sódio e de 155 dias para os corpos de prova expostos à solução de ácido sulfúrico. Esta diferença de tempo de cura foi devido à um contratempo com a estufa do laboratório onde foram realizados os ensaios, que impediu que estes fossem colocados em recipientes para imersão agressiva de ácido sulfúrico.

Os ensaios de variação dimensional dos corpos de prova tiveram como base a metodologia proposta pela NBR 13583:1996, apesar de a norma não preconizar o uso de solução de ácido sulfúrico. Como a solução de ácido sulfúrico é muito agressiva e não há norma para este ensaio, o tempo para primeira medição foi adaptado para 7 dias para garantir que os dados sejam

melhor interpretados, já que os corpos de prova apresentam ataque visível desde os primeiros dias de imersão.

Como o ataque em solução de ácido sulfúrico é acelerado, foi feita uma medição intermediária entre as datas previstas para medição na norma de 14 e 28 dias e foi feita uma medição aos 21 dias de idade.

A norma prevê a medição dos corpos de prova com 42 dias de imersão em solução agressiva, porém neste trabalho os corpos de prova expostos à solução de sulfato de sódio foram medidos aos 51 dias, pois não houve possibilidade de realizar as medições na data programada, e os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico precisaram ser medidos aos 44 dias, pois a data de medição seria dia 24/12/2016 e o laboratório não teve expediente devido ao recesso do Natal, voltando às atividades na segunda-feira, dia 26/12/2016.

Passado o prazo previsto em norma, foram feitas medições para os corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio nas idades mostradas no quadro a seguir. As medições nas idades superiores a 44 dias não foram feitas para os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico, já que os mesmos tiveram um tempo de cura maior e não atingiram estas idades no estudo em questão.

Solução	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	44 dias	51 dias	58 dias	63 dias	72 dias	79 dias	95 dias
Sulfato de sódio	-	SIM	-	SIM	-	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ácido sulfúrico	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	-	-	-	-	-	-

Tabela 10. Idades de medição dos corpos de prova.

Foram feitas as medições em todas as idades para a solução de água saturada com cal para que fosse possível calcular a variação resultante.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tendo em vista o objetivo da pesquisa, foram adotados para a realização dos ensaios três tipos de cimento diferentes disponíveis no mercado nacional. Desta forma será possível comparar o desempenho de cada tipo de cimento quando exposto a soluções agressivas. Os tipos de cimento escolhidos foram o CP IV-32 RS, que possui a maior quantidade de material pozolânico dentre os cimentos selecionados (de 15 a 50%), o CP II Z que também possui em sua composição material pozolânico, porém em um percentual mais baixo (de 6 a 14%) e o CP V ARI, que tem uma moagem mais fina e tem a característica de atingir elevada resistência inicial.

A caracterização dos materiais selecionados para a realização dos ensaios será apresentada no decorrer deste capítulo. Serão apresentados os cimentos e posteriormente o agregado miúdo utilizado.

3.1.1. Cimento

Dentre os cimentos utilizados nesta pesquisa estão o CP V ARI, CP IV-32 RS e CP II Z, adquiridos no mercado nacional.

3.1.2. Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia média natural peneirada, da região metropolitana de Curitiba, que foi seca a 105° C até apresentar constância de massa.

A caracterização do agregado miúdo é obtida de acordo com as características preconizadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) com a apresentação dos parâmetros apresentados na Tabela 11, tais como, massa específica (g/cm^3), massa unitária (g/cm^3), módulo de finura, teor de material pulverulento (%).

Areia natural	Norma Brasileira
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária (g/cm ³)	NBR 7251 (ABNT, 2006)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2001)
Teor de material pulverulento (%)	NM 46 (ABNT, 2003)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)

Tabela 11. Caracterização do agregado miúdo (Os autores, 2016).

3.1.2.1. Massa Específica

A massa específica determinada pelos procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2003b). A amostra para o ensaio deve ser constituída de um quilo de agregado miúdo, obtido por quarteamento.

Após ter sido separada, a amostra de 1 kg deve ser colocada em um recipiente coberto com água e deixado em repouso por 24 horas. Após o período deve ser retirada a água e a amostra deve ser colocada em uma superfície plana com a ação de uma suave corrente de ar. Após esse período a mesma deve ser revolvida com frequência para assegurar uma secagem uniforme. Esse procedimento deve ser realizado até que a secagem dos grãos de agregado miúdo não fique fortemente aderido entre si.

Para verificar se o agregado miúdo está suficientemente seco, o mesmo deve ser colocado no molde tronco-cônico metálico de 40 ± 3 mm de diâmetro superior e 90 ± 3 mm de diâmetro inferior e 75 ± 3 mm de altura. O agregado miúdo não deve ser comprimido e sim compactado em sua superfície com 25 golpes com a haste de socamento. Então, o molde deve ser levantado verticalmente, se ainda houver umidade superficial, o agregado conservará a forma do molde. Nesse caso, deve-se continuar a secagem, revolvendo a amostra constantemente e fazendo ensaios a intervalos frequentes de tempo até que o cone de agregado miúdo desmorone ao retirar o molde.

No procedimento de ensaio:

- a) Deve-se pesar uma amostra (m_s) de $500 \text{ g} \pm 0,1\text{g}$
- b) Colocar no frasco e registrar a massa do conjunto (m_1).
- c) Deve-se encher o frasco com água até a marca de 500 ml e move-lo para eliminar as bolhas de ar e depois colocá-lo em banho mantido a temperatura constante de $21 \pm 2^\circ \text{C}$.
- d) Após 1 hora completar com água até a marca de 500 ml e determinar a massa total, com precisão de $0,1 \text{ g}$ (m_2).
- e) Retirar o agregado miúdo do frasco e secá-lo a $105 \pm 5^\circ \text{C}$ até obter massa constante ($\pm 1 \text{ g}$). Esfriar à temperatura ambiente em dessecador e pesar com precisão de $0,1 \text{ g}$ (m).

Com os resultados obtidos no ensaio é possível calcular a massa específica do agregado seco, a massa específica do agregado e a massa específica do agregado saturado superfície seca e podem ser calculados pelas equações apresentadas na Tabela 12.

Equação 1	Equação 2	Equação 3	Equação 4
Massa específica do agregado seco	Massa específica do agregado saturado superfície seca	Massa específica do agregado	Volume de água adicionado no frasco
$d_1 = \frac{m}{V - V_a}$	$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a}$	$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}$	$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}$

Tabela 12. Equações para o cálculo da massa específica do agregado (Os autores, 2016).

Os parâmetros utilizados para calcular cada um desses componentes serão apresentados na Tabela 13.

Item	Descrição	Unidade	Como obter?
d_1	Massa específica aparente do agregado seco	g/cm ³	Equação 1
d_2	Massa específica do agregado superfície seca	g/cm ³	Equação 2
d_3	Massa específica do agregado	g/cm ³	Equação 3
V_a	Volume de água adicionado ao frasco	cm ³	Equação 4
V	Volume do frasco	cm ³	500 cm ³
m	Massa da amostra seca em estufa	g	Item “e”
m_1	Massa do conjunto (frasco e agregado)	g	Item “b”
m_2	Massa total (frasco, agregado e água)	g	Item “d”
ρ_a	Massa específica da água	g/cm ³	1 g/cm ³

Tabela 13. Parâmetros para cálculo da massa específica dos agregados miúdos (Os autores, 2016).

3.1.2.2. Massa unitária

A massa unitária é determinada pelos procedimentos descritos na NBR 7251(ABNT, 1982). Nesse ensaio é utilizado um recipiente paralelepípedo de material metálico não deformável. Esse recipiente deve ter dimensões de acordo com a dimensão máxima do agregado, sendo que as dimensões estão apresentadas na Tabela 13.

Dimensão máxima agregado (mm)	Dimensões mínimas		Volume mínimo (dm ³)
	Base (mm)	Altura (mm)	
$\leq 4,8$	316 x 316	150	15
$> 4,8$ e ≤ 50	316 x 316	200	20
> 50	447 x 447	300	60

Tabela 14. Dimensões do recipiente paralelepípedo do ensaio de massa unitária do agregado miúdo(ABNT, 1982).

3.1.2.3. Determinação da Composição Granulométrica e Módulo de Finura

Esse ensaio é realizado com os procedimentos descritos pela NM 248 (ABNT, 2003a), sendo que os agregados serão separados em duas amostras para realizar o ensaio. A determinação da massa mínima da amostra é definida de acordo com a Tabela 15, sendo que para o caso de agregados miúdos os mesmos estariam enquadrados na categoria de dimensão máxima nominal do agregado de 9,5 mm.

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
<4,75	0,3
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Tabela 15. Massa mínima por amostra de ensaio (ABNT, 2003a).

De acordo com a Tabela 15 apresentada, é possível verificar que a quantidade de amostra que deve ser utilizada para o ensaio será de duas amostras de pelos menos 1 kg cada.

As amostras devem ser secas em estufa à temperatura ambiente e determinar as massas m_1 e m_2 . As peneiras foram encaixadas e previamente limpas, então, foi realizado o peneiramento mecânico da amostra. Após o término do ensaio, foi registrada a massa total de material retido em cada peneira.

Observa-se que ao realizar o ensaio a soma das massas obtidas em cada peneira, não deve diferir em mais de 0,3 % da massa m_1 . Em seguida, deve ser realizado o mesmo procedimento para a m_2 . As amostras devem apresentar a mesma dimensão máxima característica e nas outras peneiras, os valores das porcentagens retidas individuais não devem diferir mais do que 4% entre si.

O cálculo do módulo de finura é obtido com a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de agregado das peneiras da série normal, dividida por 100. Sendo que as peneiras da série normal e intermediária estão apresentadas na Tabela 16.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
	63 mm
	50 mm
37,5 mm	
	31,5 mm
	25 mm
19 mm	
	12,5 mm
9,5 mm	
	6,3 mm
4,75 mm	
2,36 mm	
1,18 mm	
600 μm	
300 μm	
150 μm	

Tabela 16. Peneiras da série normal e intermediária (ABNT, 2003a).



Figura 9. Ensaio de granulometria (Os autores, 2016).

3.1.2.4. Teor de material pulverulento

Esse ensaio é realizado com os procedimentos descritos pela NM 46 (ABNT, 2003c), sendo que a amostra utilizada deve ser resultado de redução e a quantidade de amostra utilizada é determinada a partir do diâmetro máximo nominal do agregado, definido no ensaio de distribuição granulométrica e de acordo com a Tabela 16.

- O ensaio é realizado em duplicata, sendo que o resultado final é a média aritmética de duas determinações e a diferença obtida nas duas determinações em relação à média não deve ser maior do que 0,5% para agregado graúdo e de 1,0% para agregado miúdo. Quando a diferença obtida for maior, deve ser realizada uma terceira determinação e o resultado do ensaio deve ser a média aritmética dos dois resultados mais próximos.

Dimensão máxima nominal (mm)	Massa mínima para o ensaio (g)
2,36	100
4,75	500
9,5	1000
19,00	2500
37,5 ou superior	5000

Tabela 17. Massa mínima da amostra de ensaio(ABNT, 2003c).

A amostra deve ser submetida a processo de secagem até obter massa constante à temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Após a secagem e determinação da massa, a amostra deve ser colocada em um recipiente e adicionado água até cobri-la. O recipiente deve ser agitado para que as partículas mais finas fiquem em suspensão.

A água de lavagem contendo sólidos suspensos e dissolvidos deve ser vertida sobre as peneiras, sendo que estas devem estar dispostas de maneira que a malha de maior abertura esteja na parte de cima. Sendo que a primeira água de lavagem deve ser armazenada para ser comparada com a última água de lavagem, no final do ensaio.

Então, deve ser adicionada uma segunda quantidade de água à amostra do recipiente, a mesma deve ser agitada e vertida sobre as peneiras, como descrito anteriormente. O procedimento deve ser repetido até que a água fique clara, então a última água de lavagem é comparada com a primeira água de lavagem.

O material retido nas peneiras deve ser retornado ao recipiente com um fluxo contínuo de água sobre a amostra lavada. Deve-se atentar que o material retido na peneira 75 μm deve ser devolvido para o recipiente e a água desse recipiente deve ser levada também à estufa para que não ocorra perda de material. O agregado deve ser seco a temperatura constante de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e a massa final deve ser determinada.

O cálculo da quantidade de material passante na peneira 75 μm por lavagem é feito como na Equação (3).

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo que:

m : é a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 μm por lavagem

m_i : é a massa original da amostra seca, em gramas;

m_f : é a massa da amostra seca após a lavagem, em gramas

3.2. ENSAIOS

Serão mostrados nos itens abaixo os ensaios realizados para implementar o objetivo da pesquisa.

3.2.1. Ensaio de determinação da variação dimensional de cimento Portland expostos à solução agressiva

A realização do ensaio de determinação da variação dimensional de corpos de prova de argamassa expostos à solução agressiva de sulfato de sódio e ácido sulfúrico seguiu a metodologia proposta pela NBR 13583:1996, apesar de a norma não preconizar o uso de solução de ácido sulfúrico. Esta norma foi utilizada como base pois não há normas na literatura para este fim.

Foram confeccionados cerca de 18 (dezoito) CPs prismáticos de 25x25x285mm por amostra de diferentes tipos de cimento para imersão em água saturada com cal, sulfato de sódio e ácido sulfúrico, conforme descrito na Tabela 9. Tais CPs são mantidos em câmara úmida a 23°C por 48 horas, para desmoldagem. Após a desmoldagem dos CPs estes são mantidos em água saturada com cal por 12 dias, e após este período é realizada a determinação do comprimento inicial dos CPs com auxílio de extensômetro.

Após o procedimento inicial, os CPs são armazenados em uma solução de sulfato de sódio com concentração de 100000 ppm (de N_2SO_4), e temperatura de 40°C. A norma preconiza que sejam realizadas as medições de comprimento aos 14, 28 e 42 dias, porém conforme descrito no início do item 3 deste trabalho e especificado na tabela 10, as idades de medição variaram, tendo sido feita para os corpos de prova expostos à solução de sulfato de sódio com 14, 28, 51, 58, 63, 72, 79 e 95 dias e para os corpos de prova expostos à solução de ácido sulfúrico com 7, 14, 21, 28 e 44 dias.

Nas idades de leitura, deve ser analisado, além das eventuais variações dimensionais, o aspecto das barras. Com estas leituras e análise espera-se poder calcular a expansão das barras e obter um gráfico com o comportamento e a tendência de cada traço ensaiado. O fluxograma do ensaio pode ser observado na figura abaixo.

O fluxograma abaixo mostra em preto as etapas previstas em norma, e as anotações feitas em vermelho são as mudanças realizadas neste trabalho quanto aos prazos.

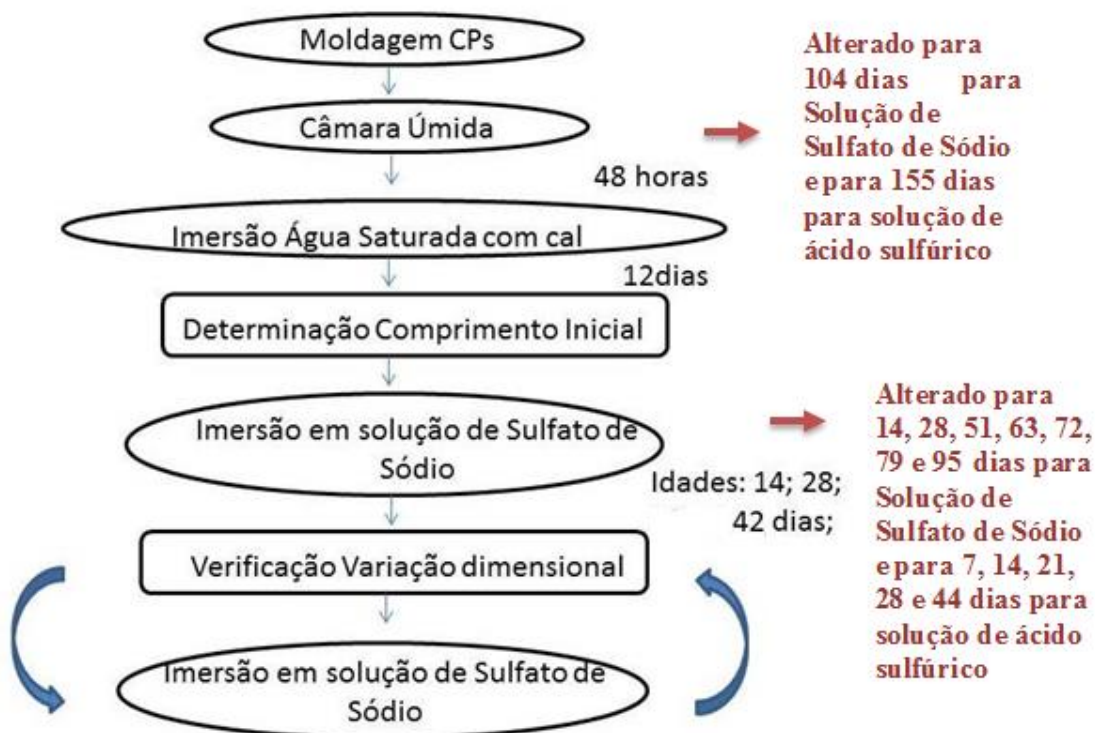


Figura 10. Fluxograma do Ensaio especificado pela NBR 13583:1996 Determinação da variação dimensional de cimentos Portland expostas a solução de sulfato de sódio (Os autores).

3.2.1.1. Aparelhagem

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) *Balança digital com precisão de 0,01g*

b) *Câmara úmida*

Utilizada na cura dos CPs até a desmoldagem

c) *Estufa*

Utilizada para manter a temperatura entre 40° e 42°C durante todo o período do ensaio, conforme figura abaixo.



Figura 10. Estufa utilizada nos ensaios (Os autores, 2016).

a. Comparador de comprimento (extensômetro)



Figura 11. Relógio comparador utilizado para medição dos corpos de prova (Os autores, 2016)

3.2.1.2. Realização do ensaio

A proporção de materiais a ser utilizada nos corpos de prova é a descrita na NBR 13583 (ABNT, 1996). As quantidades de materiais secos para a moldagem de quatro corpos de prova deve ser 500 g de cimento e 1600 g de areia normal. A relação água cimento será de 0,60 e a quantidade de água de mistura, em massa, será de 300 g. Sendo que para cada amostra serão necessários dezoito corpos de prova, para serem imersos em solução de água, sulfato de sódio e ácido sulfúrico. Então, o traço será 1:3,2:0,6.

Os moldes são prismáticos e possuem as medidas efetivas de 25x25x285mm, conforme previsto na NBR 13583:1996. Foram moldados ao todo 51 CPs, conforme descrito na Tabela 9, apesar de a norma prever uma quantidade mínima de 4 unidades por imersão, foram moldados entre 5 e 6 unidades. Os pinos foram ajustados antes do preenchimento dos moldes e são compostos de aço inoxidável.

Para a análise de variação dimensional a NBR 13853 preconiza que sejam moldados quatro corpos de prova por amostra, no entanto, para este experimento foi realizada a moldagem de seis corpos de prova de argamassa por tipo de cimento e para cada solução.

Como foram utilizados três tipos de cimento e três tipos de solução no total foram moldados 54 corpos de prova para o ensaio. No entanto, ocorreu a quebra de três corpos de prova de cimento CP IV-32 RS quando ambos foram manuseados para serem colocados em imersão, desta maneira para o cimento CP IV-32 RS foram utilizados cinco corpos de prova por solução para realizar o ensaio.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram deixados em cura por 104 dias antes de serem colocados em imersão. Após a imersão os corpos de prova foram colocados em recipientes montados com tubos de PVC de 150 mm, como CAP também de PVC para que fossem deixados imersos na solução e aquecidos em banho-maria para que a temperatura fosse mantida, como é possível observar na figura abaixo.



Figura 12. Corpos de prova imerso em água (Os autores, 2016).

No entanto, houve dificuldade em manter todos os corpos de prova imersos e em aquecimento e no recipiente nos quais os corpos de prova estavam não houve espaço para três amostras, logo, as amostras imersas em ácido sulfúrico não foram colocadas em imersão. Por isso, foi necessário utilizar outro sistema de imersão dos mesmos.

Após a moldagem dos corpos de prova e cura inicial, os mesmos foram identificados com uma numeração para que fosse padronizado quais corpos de prova seriam colocados em quais soluções. Cada corpo de prova teve suas 4 faces marcadas com A, B, C e D, de maneira que fosse possível verificar qual face estava sendo medida no relógio comparador. A face D era a face que ficava exposta ao ambiente no molde durante o período de cura ainda na forma, pois a mesma era mais irregular do que as outras faces e foi realizada a padronização para que essa fosse sempre a mesma face. Além disso, foi desenhada uma flecha apontando para um dos lados para que todas as leituras fossem realizadas com o corpos de prova na mesma direção.



Figura 13. Detalhe da identificação dos corpos de prova, contendo o tipo do cimento, face, número do corpo de prova e direção do ensaio de variação dimensional (Os autores, 2016).

Então, os corpos de prova foram colocados em caixas de plástico, separados por amostra de tipo de cimento e tipo de solução e colocados na estufa a temperatura constante de 40°C. Como apoio para os corpos de prova, para que os mesmos não tocassem o fundo, foram utilizadas canaletas do tipo sistema X, que são comumente utilizadas para realizar instalação elétrica, para apoiar as duas extremidades do corpo de prova.

Antes da colocação da tampa do recipiente, o mesmo era coberto com papel filme de plástico para evitar que a solução evaporasse com o calor.

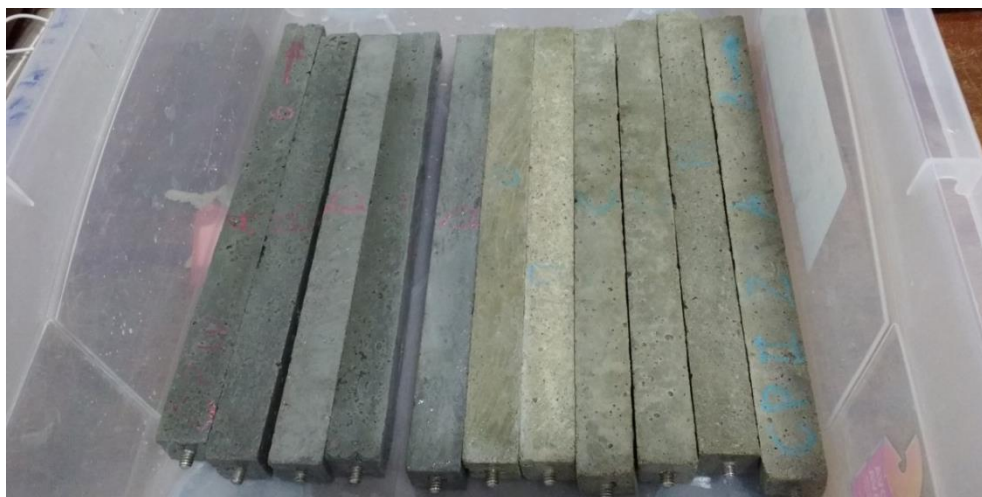


Figura 14. Corpos de prova dentro do recipiente de imersão já identificados (Os autores, 2016).



Figura 15. Recipientes para imersão dos corpos de prova (Os autores, 2016).

A NBR 13583 (ABNT, 1996) preconiza que as barras sejam medidas em um extensômetro nas idades de 14, 28 e 42 dias. Neste trabalho foi feita a medição aos 7 dias já que o ácido sulfúrico é mais agressivo e começaria a danificar a peça mais rápido que o sulfato de sódio e ultrapassados os 42 dias para melhorar os dados estatísticos.



Figura 16. Barra sendo medida em um comparador de medidas (Os autores, 2016).

3.2.2. Análise visual

Conforme descrito na NBR 13583 (ABNT, 1996), deve-se analisar nas idades de medição o aspecto visual das barras, registrando toda e qualquer anomalia apresentada, tais como:

- Fissuração das barras;
- O tamanho e intensidade das fissuras;
- Desagregação parcial, total ou empenamento das barras;
- Alterações na temperatura de cura ao longo do ensaio;
- Evaporação da água de imersão, com necessidade de complementação;
- Impossibilidade de leitura com o extensômetro e, portanto, emprego de paquímetro ou outro instrumento de medida.

Desta forma, é possível analisar manifestações patológicas resultantes do ataque do sulfato de sódio e do ácido sulfúrico, assim como analisar a diferença de comportamento de cada tipo de cimento quando exposto a estes elementos. Todas as barras foram fotografadas em todas as idades e as imagens estão dispostas no item 7 deste trabalho.

3.2.3. Ensaio de determinação de perda de massa

Os ensaios de alteração de massa são comuns experimentos que utilizam ataque ácido, mas os mesmos dependem do tipo de cimento e do tamanho da amostra, que pode ser influenciada pelas reações de expansão que ocorrem quando a estrutura começa a ser degradada. As ações combinadas de dissolução e expansão causada gradualmente a camada superficial de argamassa de cimento falhar, o que provoca a redução da massa significativa dos cilindros (CHANG et al., 2005).

Girardi, Vaona e Di Maggio (2010) realizaram um ensaio no qual verificaram a perda de massa e expansão de corpos de prova de concreto, submetidos ao ataque cíclico de sulfato de sódio e ácido sulfúrico, com variações

no tipo de cimento e nas adições. Com os resultados, verificou-se que nas amostras que apresentaram menor expansão, a taxa de perda de massa foi maior, logo, ambos os fatores devem ser considerados no projeto e no estudo de estruturas.

Apesar do procedimento descrito por Girardi, Vaona e Di Maggio (2010), no qual os corpos de prova serão pesados antes da imersão e ao final do ensaio, quando os corpos de prova forem retirados da imersão, seguindo o procedimento realizado por Girardi, Vaona e Di Maggio, os corpos de prova seriam secos ao ar e até possuírem massa constante e teriam a sua massa medida, dessa maneira seria possível verificar se houve perda significativa de material ao longo do ensaio. No entanto, como estão sendo utilizados diferentes tipos de cimento para a produção dos corpos de prova e cada tipo de cimento possui um tempo de secagem, os corpos de prova serão pesados úmidos para evitar que a variabilidade do cimento interfira nos resultados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Dentre os resultados apresentados estão os resultados quanto à caracterização dos agregados utilizados para o ensaio, assim como, os resultados dos ensaios de avaliação da variação dimensional dos corpos de prova de argamassa, os resultados da variação da massa dos corpos de prova e os resultados do pH das soluções de imersão.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

Os agregados miúdos apresentaram adequados ao ensaio, uma vez que a zona granulométrica da areia utilizada foi zona ótima e na norma especifica que a areia utilizada deve ser areia média. De acordo com os resultados obtidos foi verificado que o módulo de finura da areia utilizada é 2,62 e está de acordo com a especificação para areia do tipo médio. Os resultados da caracterização estão apresentados na Tabela 18.

Parâmetros	Resultado	Norma Referência
Agregado miúdo (Areia natural)		
Massa específica (g/cm ³)	E1 = 2,595 E2 = 2,595	NBR NM 52 (ABNT, 2003b)
Massa unitária (g/cm ³)	E1 = 1,612; E2 = 1,605	NBR NM 45 (ABNT, 2003c)
Módulo de finura	2,63	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)
Teor de material pulverulento (%)	E1 = 2,53; E2 = 2,62	NBR NM 46 (ABNT, 2003c)
Composição granulométrica	Zona ótima	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)

Tabela 18. Caracterização do agregado miúdo e graúdo (Os autores, 2016).

A curva granulométrica do ensaio está apresentada na figura abaixo.

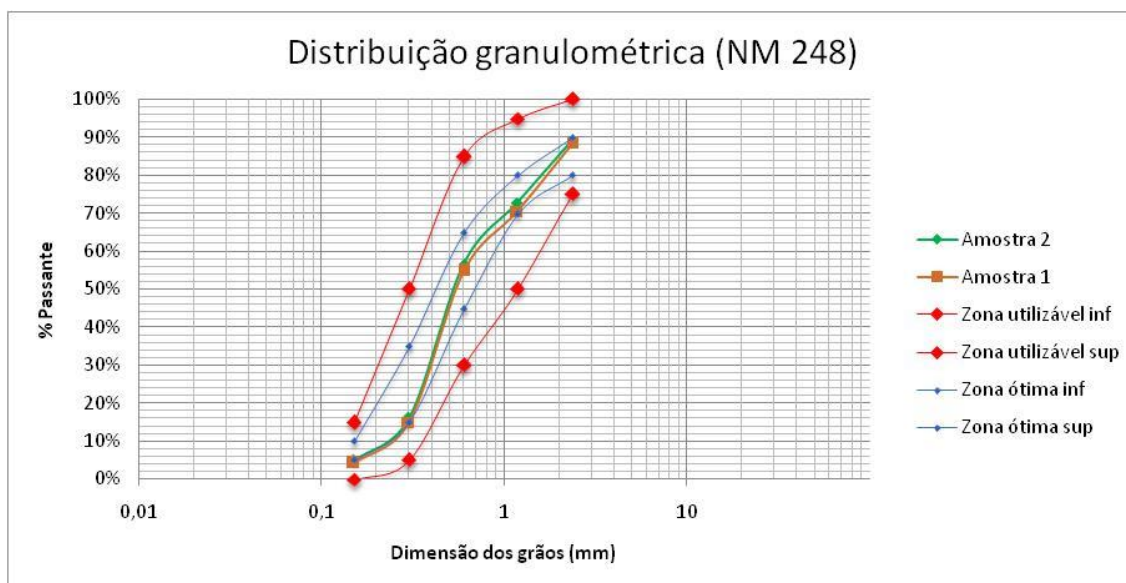


Figura 17. Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado (Os autores, 2016).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

A partir da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível nunciar que os cimentos utilizados foram o Cimento Portland (CP) II Z 32, CP IV RS e CP V ARI, cujas composições químicas, físicas e mecânicas são informadas na tabela 19.

COMPONENTE	TIPO DE CIMENTO		
	CP II Z	CP IV RS	CP V
Al_2O_3 (%)	-	9,76	4,41
SiO_2 (%)	-	29,07	18,9
Fe_2O_3 (%)	-	3,85	2,70
CaO (%)	54,67	45,12	60,55
MgO (%)	5,53	2,92	4,49
SO_3 (%)	2,98	2,25	2,59
Perda ao fogo (%)	-	-	3,1
Resíduo insolúvel (%)	12,52	25,44	0,83
Equivalente alcalino (%)	0,86	1,14	0,65
Expansibilidade a quente (%)	0,58	0,30	0,17
Tempo de Pega (Início)	4:47	04:29	3:16
Tempo de Pega (Fim)	5:59	5:15	3:53
Consistência normal (%)	27,7	29,9	28,9
Blaine (cm^2/g)	3553	4171	3978
#200 (%)	1,62	0,46	0,14
#325 (%)	11,04	2,71	01,78
Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias	37,23	45,3	51,9
Massa específica (g/cm^3)	2,98	2,82	3,09

Tabela 19. Caracterização do cimento CP II Z, CP IV e CP V ARI. (Fonte: Relatórios dos fabricantes, 2016).

4.3 ANÁLISE VISUAL

Foi realizada a análise visual dos corpos de prova imersos nas três soluções propostas, em solução de ácido sulfúrico com concentração de 1%, em solução de sulfato de sódio com a concentração especificada pela NBR 13853 e em solução padrão de água saturada com cal.

Para a solução de ácido sulfúrico, pode-se perceber maior alteração do aspecto visual dos corpos de prova moldados com os cimentos CP V e CP II Z, enquanto os CPs moldados com CP IV-32 RS tiveram menor alteração.

Após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico alguns corpos de prova de cimento CP V já apresentavam coloração marrom avermelhada, como é possível observar na Figura 18. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B. As manchas podem indicar que o pino utilizado para o ensaio de variação dimensional entrou em processo de corrosão com a presença do ácido sulfúrico. Neste caso foi possível observar também o aumento da porosidade da peça após 7 dias de imersão, pois os corpos de prova que anteriormente possuíam a face com argamassa uniforme, passaram a apresentar falhas na pasta de argamassa.



Figura 18. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

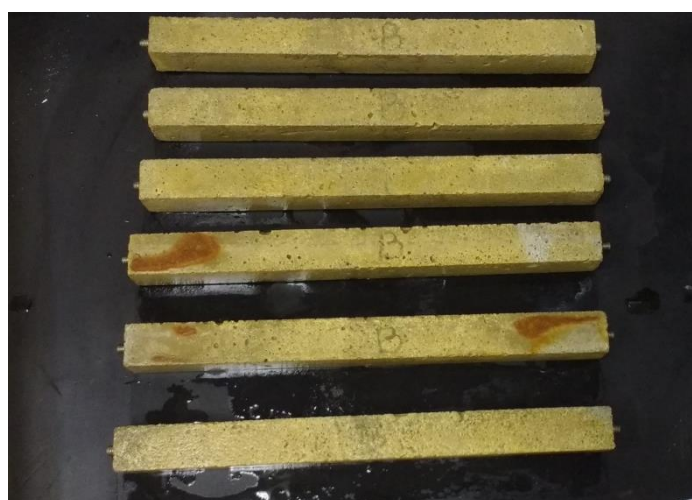


Figura 19. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).



Figura 20. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

Os corpos de prova de cimento CP II Z também apresentaram coloração alterada para o marrom após 7 dias em imersão em ácido sulfúrico, porém quando comparada à variação de coloração dos corpos de prova de CP V foi menor. As manchas próximo às extremidades também foram identificadas.



Figura 21. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, antes de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

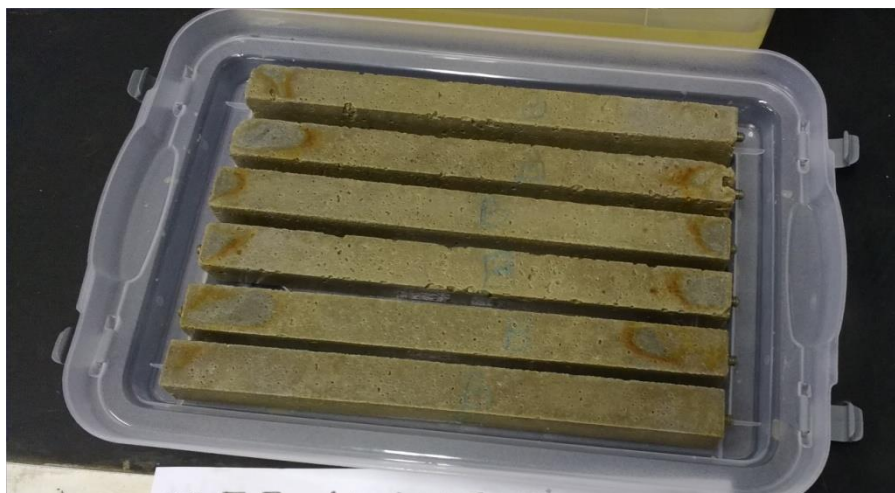


Figura 22. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

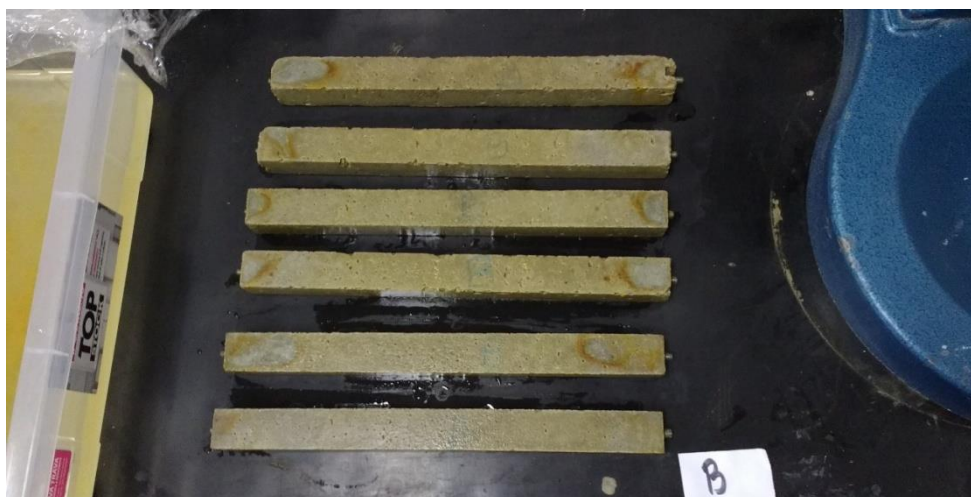


Figura 23. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

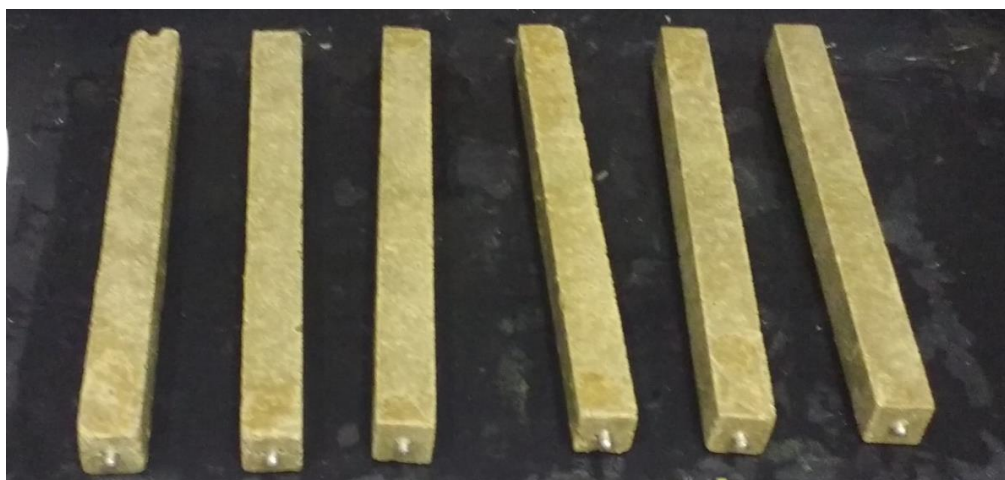


Figura 24. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico, face B (Os autores, 2016).

Os corpos de prova com cimento CP IV-32 RS não apresentaram alteração de coloração com a imersão em ácido sulfúrico aos 7 dias, o que poderia indicar uma resistência um pouco maior ao ataque do que os outros tipos de cimento. No entanto, após 14 dias os corpos de prova começaram a ter coloração alterada, dessa maneira pode-se verificar que houve alteração nos corpos de prova submetidos ao ataque por ácido sulfúrico, porém muito menor quando comparada aos demais tipos de cimento estudados.



Figura 25. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, antes da imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).



Figura 26. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 7 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016)



Figura 27. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 14 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).

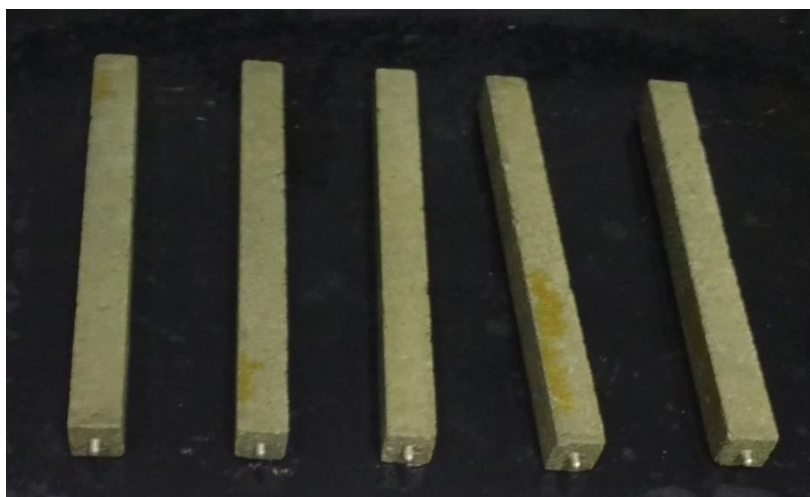


Figura 28. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 44 dias de imersão em ácido sulfúrico (Os autores, 2016).

No caso da imersão em sulfato de sódio, os corpos de prova tiveram comportamentos diferentes dos observados acima. Praticamente não houve diferença de coloração, e foi possível identificar aos 44 dias manchas brancas na peça, indicando agressão.

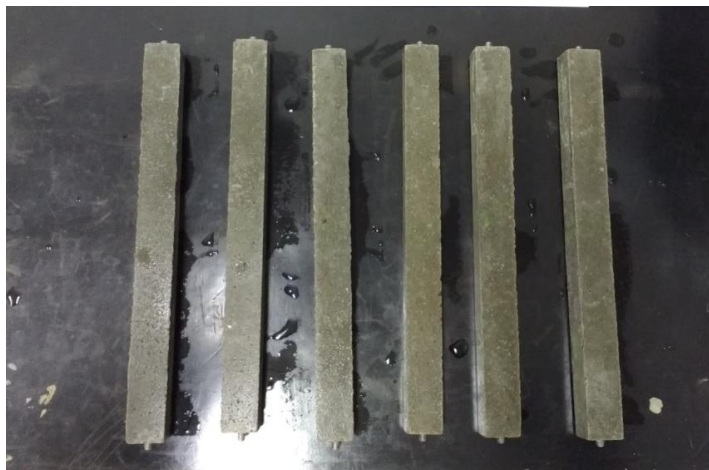


Figura 29. Corpos de prova moldados com cimento CP V, antes da imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).

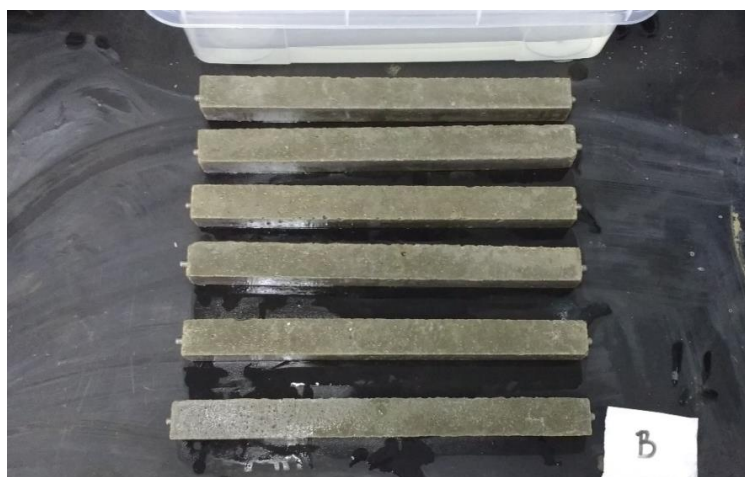


Figura 30. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).

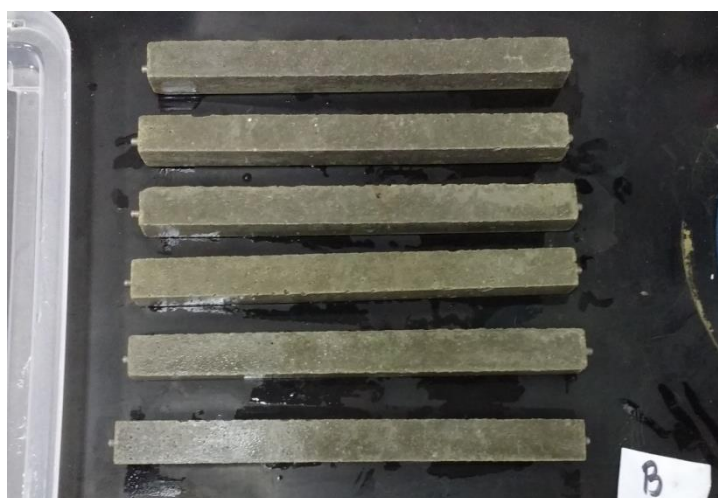


Figura 31. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).



Figura 32. Corpos de prova moldados com cimento CP V, após 44 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016)

No caso do CP II Z imerso em sulfato de sódio, aos 14 dias de imersão houve uma mudança leve na coloração das barras, tendendo ao marrom claro.

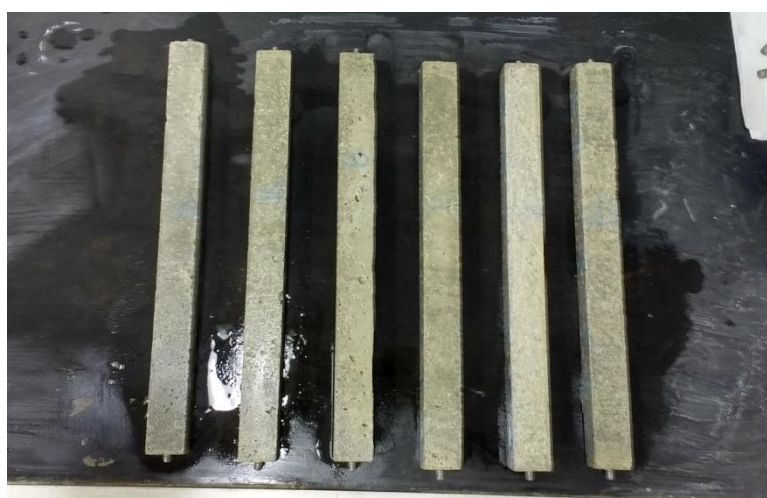


Figura 33. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z, antes da imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016)

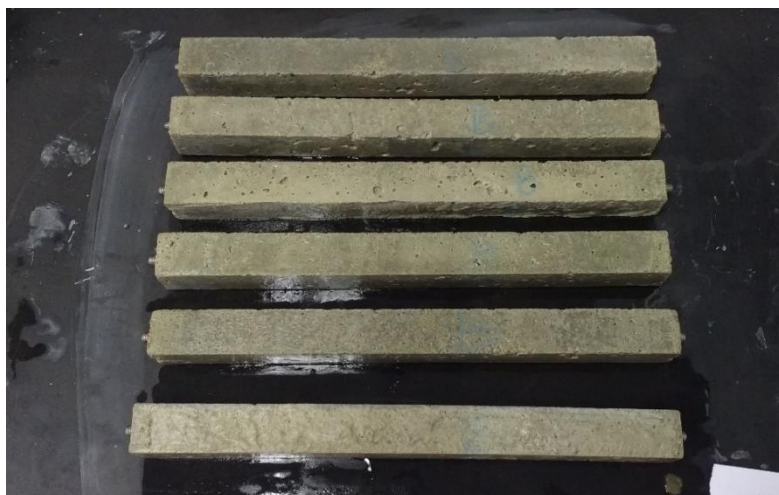


Figura 34. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016).



Figura 35. Corpos de prova moldados com cimento CP II Z após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face B (Os autores, 2016)

Não foi identificada nenhuma alteração nos corpos de prova de CP IV-32 RS imersos em sulfato de sódio.



Figura 36. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).



Figura 37. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 14 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).

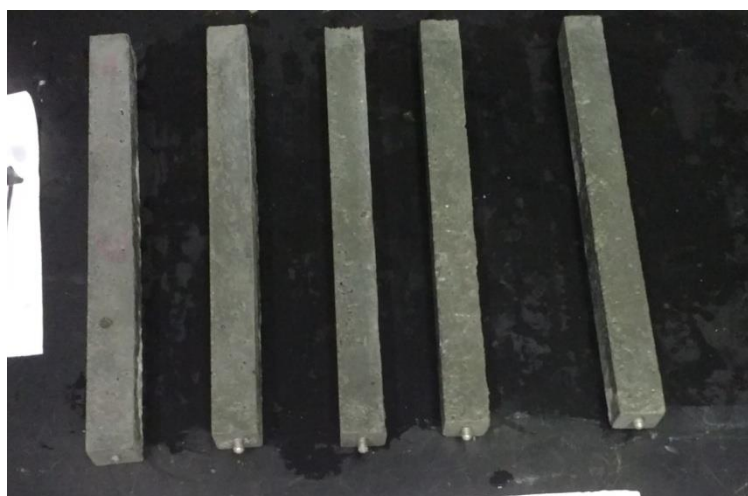


Figura 38. Corpos de prova moldados com cimento CP IV-32 RS, após 44 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, face C (Os autores, 2016).

Ao comparar a análise visual dos corpos de prova que sofreram agressão pelo ácido sulfúrico e por sulfato de sódio percebe-se que o ataque do ácido sulfúrico se mostrou mais forte, principalmente nos corpos de prova moldados com CP v e CP II Z. A variação de coloração e porosidade nos corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio era praticamente imperceptível, enquanto ambas eram nítidas nas barras expostas a ácido sulfúrico.

Sendo assim, quanto à análise visual, o único tipo de cimento indicado para casos de exposição ao ácido sulfúrico seria o CP IV-32 RS, ainda que também tenha sofrido com o ataque, porém em uma proporção muito menor. Neste caso é indicada a composição do uso do CP IV-32 RS com um sistema de proteção para garantir o desempenho.

O desempenho do CP IV-32 RS ao ataque de sulfato de sódio também foi o melhor na análise visual dentre os tipos de cimento analisados, não tendo havido nenhuma mudança notável.

No próximo item serão apresentados os resultados da análise dimensional, então será possível comparar se as mudanças visuais condizem as a reação das barras quanto à sua expansão.

4.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Após a cura dos corpos de prova, foi realizada a medida inicial dos mesmos em um relógio comparador. A NBR 13853 (ABNT, 2014b) especifica que seja realizada as medições nas datas de 14, 28 e 42 dias, porém, não foi possível realizar as medidas aos 42 dias e foi necessário realiza-las aos 51 dias e além disso, para as soluções de sulfato de sódio e de água saturada com cal foram realizados ensaios análise do comportamento dos corpos de prova também aos 58 dias, 63 dias, 72 dias, 79 dias e 93 dias. Até a conclusão desse trabalho pretende-se obter essas medidas também para os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico.

Os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico foram colocados em solução após os corpos de prova imersos em água saturada com cal e sulfato de sódio, neste trabalho, serão apresentados apenas os resultados até os 14 dias.

Com as medidas realizadas é obtida a expansão média dos corpos de prova. Para os corpos de prova de cimento CP V e cimento CP II Z a média foi realizada com os valores de seis corpos de prova. E para os corpos de prova de cimento CP IV-32 RS a média será realizada com os valores de cinco corpos de prova.

De acordo com a NBR 13583 (ABNT, 2014b), para expansões menores do que 0,02% o valor da expansão é desconsiderado no cálculo da média quando difere em até 0,03%. No entanto, para expansões maiores do que 0,02% se o valor diferir em até 15% da média o mesmo deve ser desconsiderado para o cálculo da média e deverá ser realizado o cálculo de uma nova média sem esse valor.

Expansão média (%)											
Solução	Cimento CP V										
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	44 dias	51 dias	58 dias	65 dias	72 dias	79 dias	95 dias
Sulfato de sódio	-	0,343	-	0,343	-	0,043	0,080	0,416	0,312	0,333	0,394
Ácido sulfúrico	-0,067	0,328	0,337	0,282	0,930	-	-	-	-	-	-
Água saturada com cal	-	0,340	-	0,360	-	-0,030	0,026	0,319	0,380	0,330	0,246
Solução	CP IV-32 RS										
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	44 dias	51 dias	58 dias	63 dias	72 dias	79 dias	95 dias
Sulfato de sódio	-	0,012	-	0,035	-	0,030	-0,313	0,043	0,063	-0,001	0,029
Ácido sulfúrico	0,142	0,334	0,349	0,269	0,301	-	-	-	-	-	-
Água saturada com cal	-	-0,001	-	-0,014	-	-0,007	-0,368	0,024	0,021	-0,030	-0,017
Solução	Cimento CP II Z										
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	44 dias	51 dias	58 dias	63 dias	72 dias	79 dias	95 dias
Sulfato de sódio	-	0,007	-	0,728	-	-0,145	-0,99	0,277	0,370	0,329	-0,438
Ácido sulfúrico	0,134	0,330	1,003	0,821	0,905	-	-	-	-	-	-
Água saturada com cal	-	0,006	-	0,722	-	-0,354	-0,121	0,013	0,008	-0,008	0,005

Tabela 20. Expansão média para os corpos de prova de argamassa (Os autores, 2016).

Para obter a expansão resultante é feito um cálculo do valor de expansão da solução agressiva (E_s), seja ela de sulfato de sódio ou de ácido sulfúrico em relação à expansão de água saturada com cal (E_a). Com esses valores foi possível verificar a expansão resultante (A_e) (4) dos corpos de prova.

$$A_e = E_s - E_a \quad (5)$$

Sendo que o resultado de A_e apresentado é um valor em porcentagem. Os valores de expansão resultante para este ensaio estão apresentados na Tabela 21.

Expansão Resultante (%)											
Solução	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	44 dias	51 dias	58 dias	63 dias	72 dias	79 dias	95 dias
	Cimento CP V										
Sulfato de sódio	-	0,003	-	-0,018	-	0,050	0,043	0,097	-0,069	0,003	0,148
Ácido sulfúrico	-0,407	-0,012	-0,023	-0,078	0,922	-	-	-	-	-	-
Solução	CP IV-32 RS										
	Cimento CP II Z										
Sulfato de sódio	-	0,013	-	0,049	-	0,037	0,055	0,019	0,041	0,028	0,045
Ácido sulfúrico	0,125	0,352		-		-	-	-	-	-	-
Sulfato de sódio	-	0,001	-	0,006	-	0,209	0,022	0,264	0,362	0,338	-0,444
Ácido sulfúrico	0,127	-0,392	0,280	1,175	1,259	-	-	-	-	-	-

Tabela 21. Expansão resultante dos corpos de prova de argamassa com diferentes tipos de cimento (Os autores, 2016).

Nos três gráficos apresentados para a expansão resultante foi verificado que os corpos de prova de argamassa imersos na solução de ácido sulfúrico tiveram maior variação dimensional do que os corpos de prova de argamassa expostos à solução de sulfato de sódio.

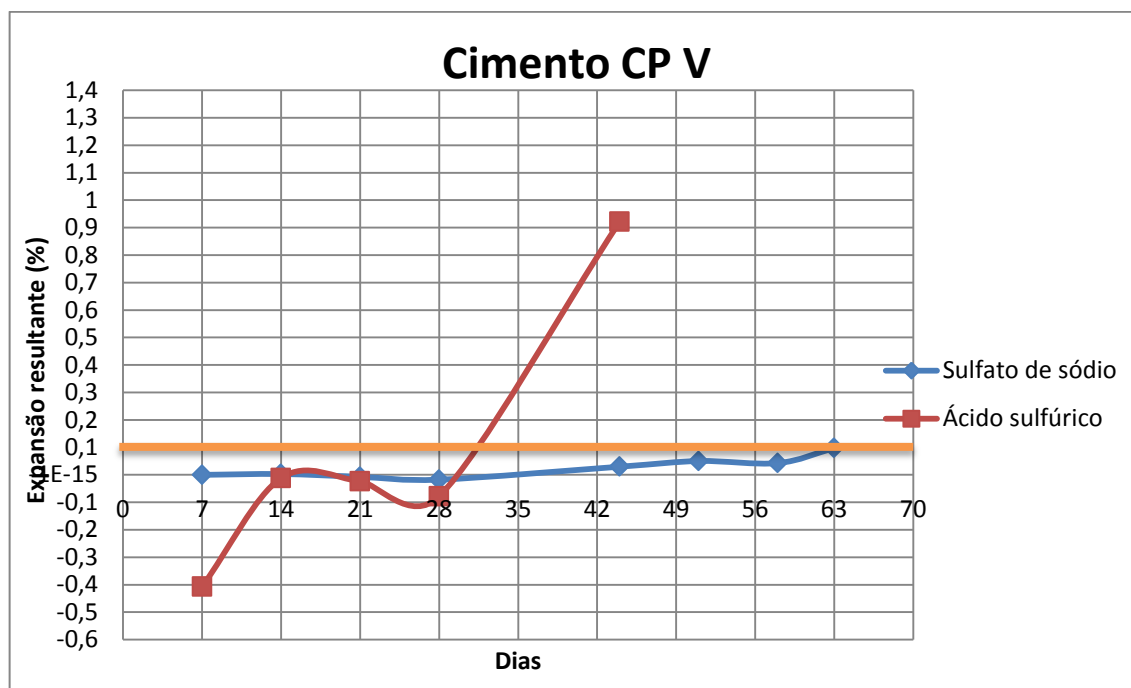


Gráfico 1. Expansão resultante para os corpos de prova do CP V (Os autores, 2016).

Além disso, a variação retração/expansão para o cimento CP IV-32 RS foi menor do que para os demais cimentos, quando expostos a solução de ácido sulfúrico, uma vez que o valor de expansão aos 7 dias foi 0,141 e o de expansão aos 44 dias foi de 0,308, logo, a variação dimensional entre um período e outro foi de aproximadamente 0,167.

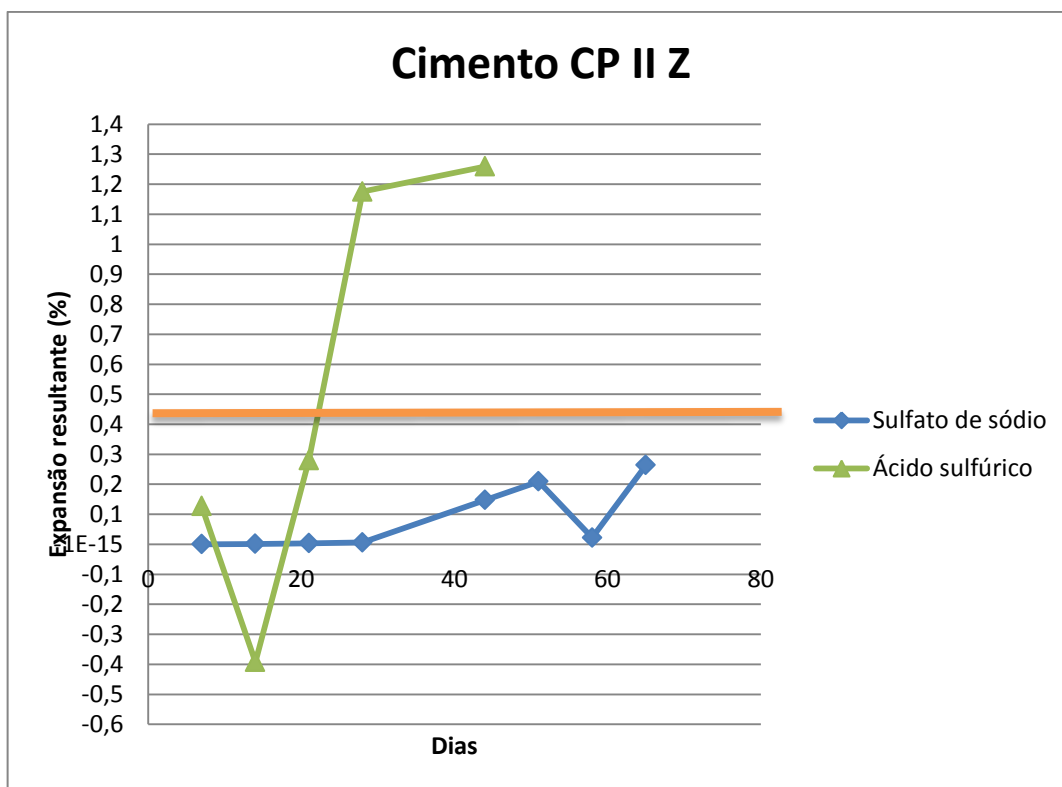


Gráfico 2. Expansão resultante para os corpos de prova de CP II Z (Os autores, 2016).

Para os corpos de prova de argamassa de cimento CP V, a variação dimensional resultante obtida foi -0,407 e a variação dimensional aos 51 dias foi de 0,922. Logo a variação no período foi de 1,32.

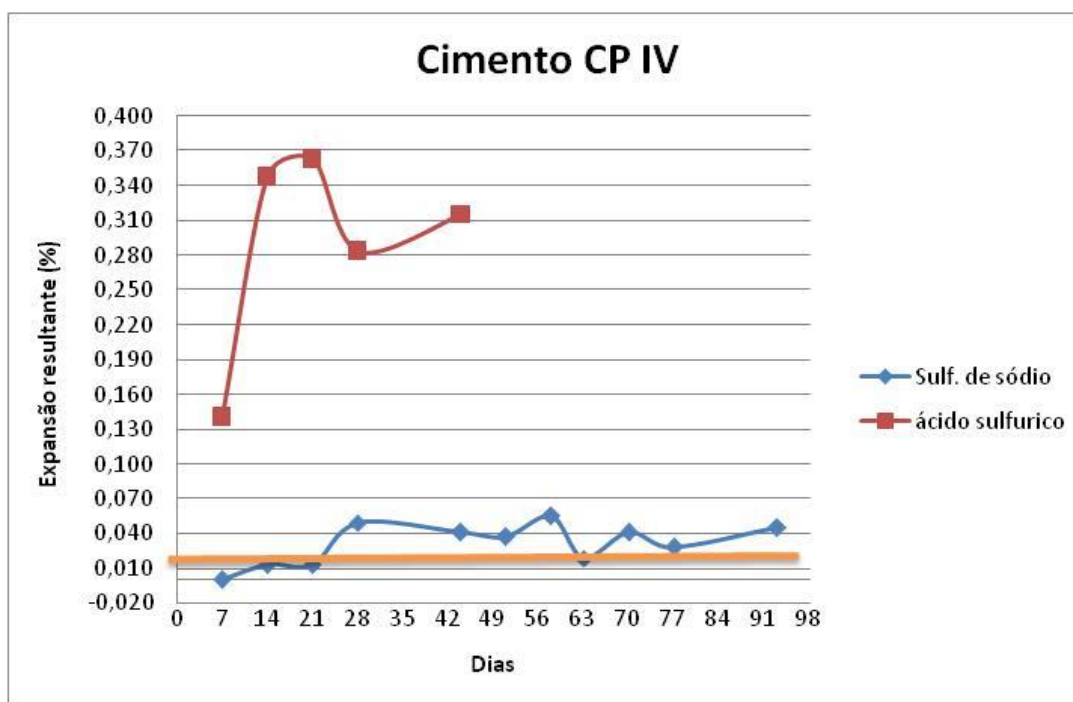


Gráfico 3. Expansão resultante para os corpos de prova de CP IV-32 RS (Os autores, 2016).

Os corpos de prova expostos à solução de ácido sulfúrico que tiveram maior variação dimensional foram os corpos de prova de cimento CP II Z, que apresentaram expansão resultante de 0,141 aos 7 dias, expansão resultante de 0,308 aos 44 dias, sendo que a variação no período foi de 0,167.

Foi verificado que a variação dimensional para o cimento CP V foi sete vezes maior do que a variação dimensional do CP IV-32 RS. E a variação dimensional para o CP II Z em relação do CP IV-32 RS foi seis vezes maior.

4.5 VARIAÇÃO DE MASSA

A variação de massa foi realizada para verificar se os corpos de prova que tiveram maior ou menor perda de massa com o ataque por ácido sulfúrico. Como será apresentado no ensaio que avalia o pH da solução, verificou-se que as amostras de concreto atacadas por ácido sulfúrico apresentaram pH da solução com uma maior variação, o que indicaria que os compósitos do cimento estariam sendo dissolvidos pela solução, logo, as amostras estariam sofrendo perda de massa ao longo do ensaio. No entanto, as amostras foram pesadas saturadas de solução, para que as atividades de secagem não interferissem nos resultados do ataque. Com isso, foi verificado que com o passar do tempo de imersão, as amostras apresentaram ganho de massa ao invés de perda. Possivelmente, devido ao preenchimento com solução dos vazios formados pela dissolução dos compósitos de cimento.

Até o presente momento, foi verificado em sua maioria aumento da massa dos corpos de prova, como é possível observar no Gráfico 4.

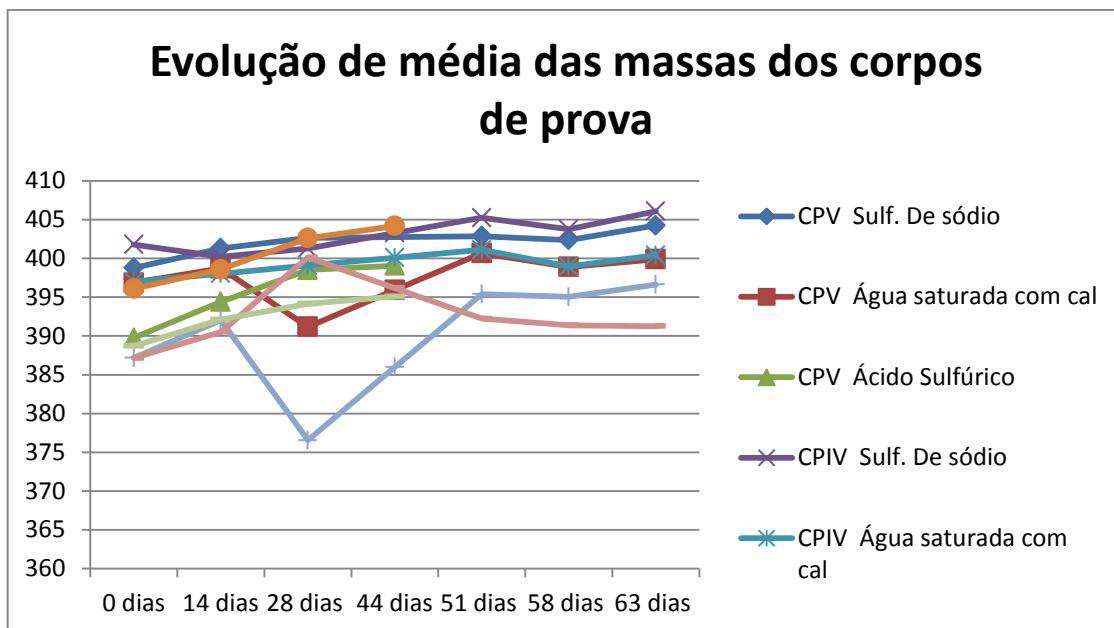


Gráfico 4. Variação da massa dos corpos de prova expostos a soluções agressivas de sulfatos (Os autores, 2016).

No entanto, não é possível concluir se esse aumento de massa ocorreu devido ao preenchimento dos poros pela solução ou pela formação de produtos expansivos.

Para verificar se com o ataque ácido houve perda efetiva de massa, os corpos de prova foram submetidos a outro ensaio. No mesmo, os corpos de prova foram escovados vinte vezes em cada face, com uma escova com cerdas de nylon. Após isso, foram lavados para retirar os excessos de massa e pesados para verificar se houve perda de massa notável após a escovação.

Verificou-se que os corpos de prova de CP IV imersos em solução de ácido sulfúrico tiveram maior perda de massa após a escovação e que a perda de massa para as soluções imersas em ácido sulfúrico foram as menores dentre as soluções analisadas, como é possível observar no Gráfico 5.

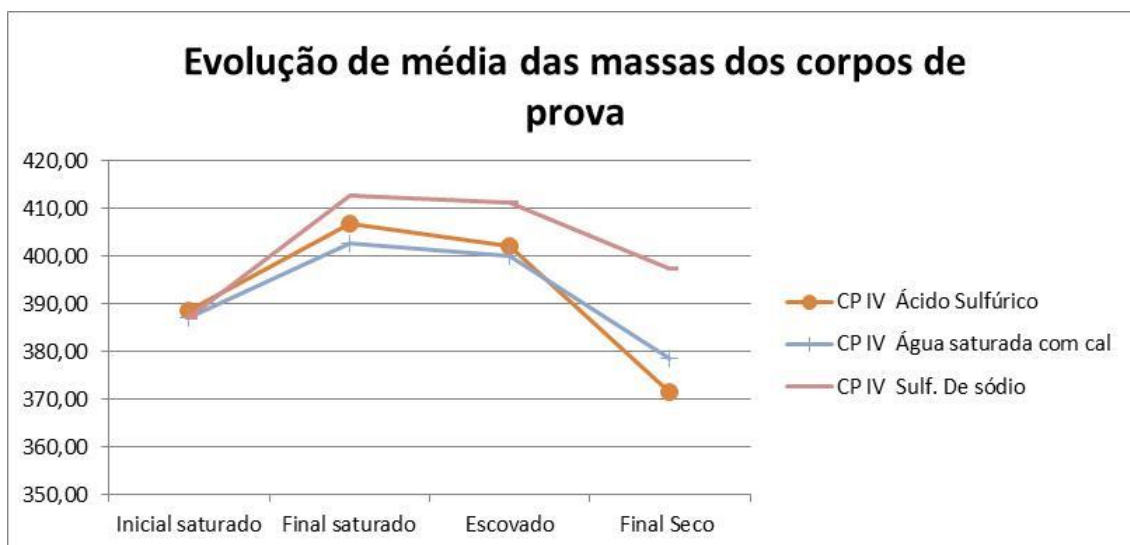


Gráfico 5: Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP IV. (Os autores, 2016)

Nos corpos de prova com CP V, observou-se que as amostras expostas nas soluções de ácido sulfúrico tiveram redução da massa menor do que as soluções expostas na água saturada com cal, como é possível observar no Gráfico 6, no entanto isso pode ter ocorrido pelo tempo de exposição à solução ter sido maior.

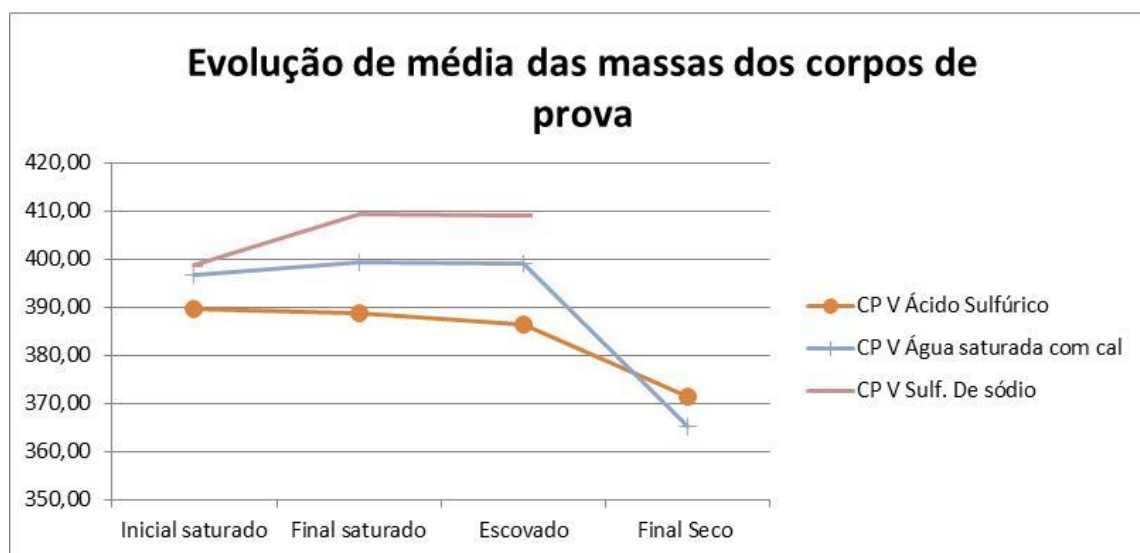


Gráfico 6: Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP V. (Os autores, 2016).

Nos corpos de prova com cimento CP II Z, verificou-se o mesmo comportamento do que o CP V, como é possível observar no Gráfico 7, os corpos de prova expostos em solução de água saturada com cal tiveram maior perda de massa do

que os corpos de prova expostos em solução com ácido sulfúrico, mas isso pode ter ocorrido devido ao tempo de exposição ter sido maior.

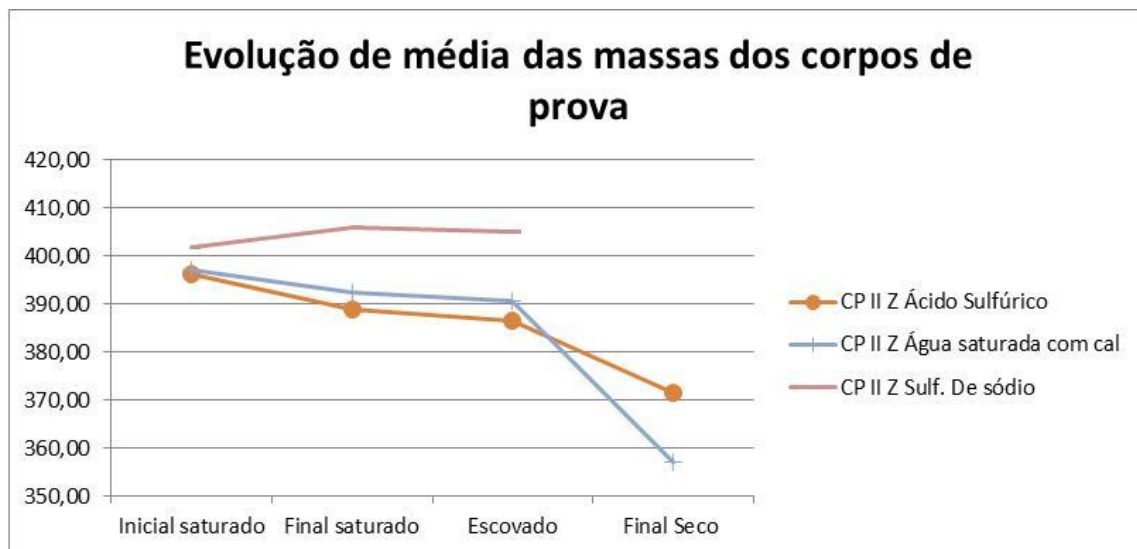


Gráfico 7 Evolução das médias das massas dos corpos de prova de CP II Z. (Os autores, 2016).

Alguns dados não estão representados no gráfico pois o ensaio ainda estava sendo realizado.

4.6 PH DA SOLUÇÃO

Com a imersão dos corpos de prova nas soluções, alguns compósitos de cimento são dissolvidos e ocorre a dissolução dos mesmos na solução. A dissolução dos compostos do cimento, ocorre ainda a alteração do valor de pH da solução.

Este fenômeno pode ser observado no Gráfico 8, no qual mostra o aumento da alcalinidade da solução de ácido sulfúrico devido a possível dissolução de compostos básicos de cimento. O fenômeno do aumento do pH em um curto tempo foi também observado por Belie (et al, 2004), no referido experimento, cilindros de concreto foram imersos em solução de 0,5% por cinco dias e tiveram um aumento do pH da solução de 0.9 para 1.4.

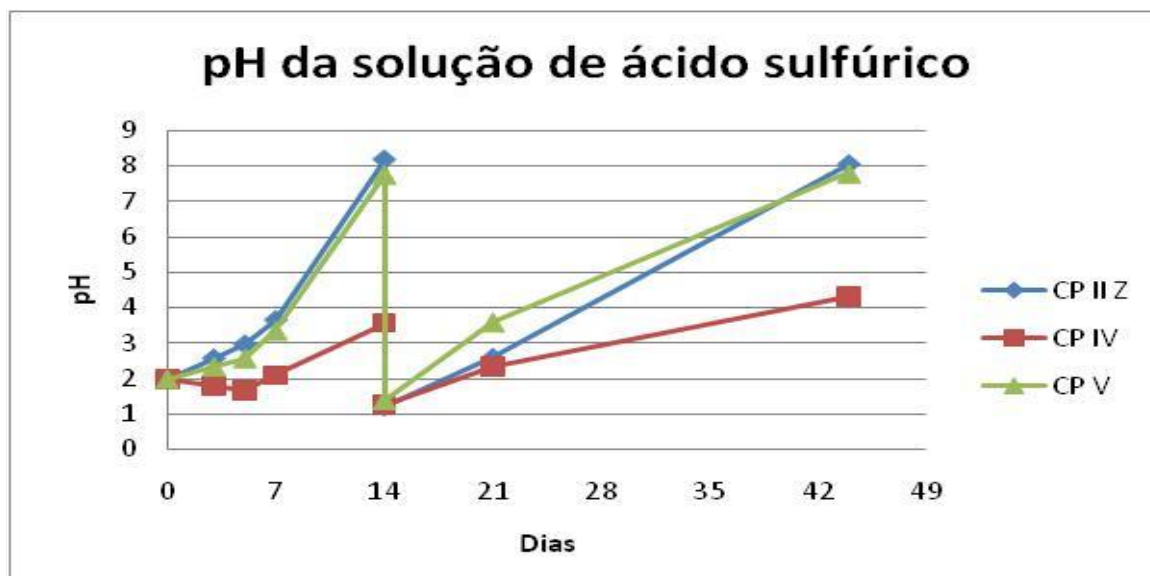


Gráfico 8. pH da solução de ácido sulfúrico (Os autores, 2016).

Como as soluções de ácido sulfúrico foram as que tiveram maior alteração, mesmo que os corpos de prova tenham sido expostos a pouco tempo de exposição, foi realizada a correção do pH das mesmas. Na Figura 39, é possível observar a solução de ácido sulfúrico após 14 dias de imersão dos corpos de prova de cimento CP IV-32 RS, há a precipitação de sólidos, possivelmente da decomposição dos compósitos de cimento.



Figura 39. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de cimento CP IV-32 RS (Os autores, 2016).

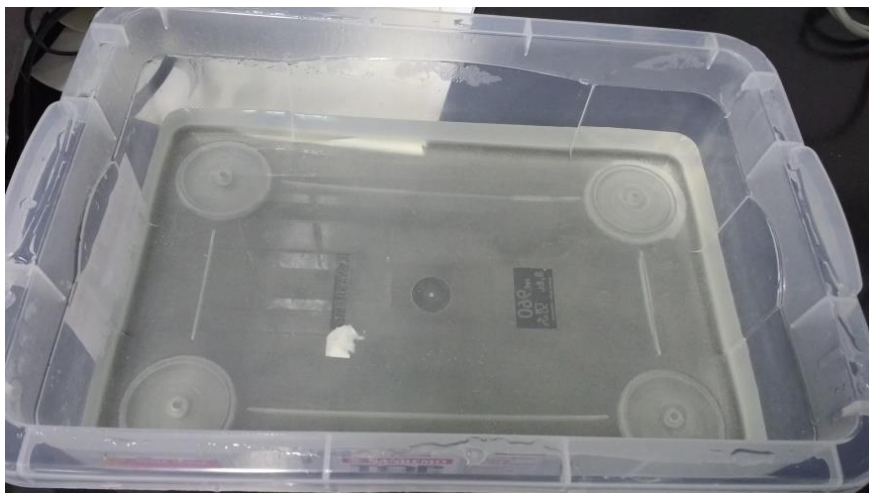


Figura 40. Solução de ácido sulfúrico dos corpos de prova de CP IV-32 RS após 7 dias de imersão (Os autores, 2016).



Figura 41. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de CP V após 7 dias (Os autores, 2016).



Figura 42. Solução de ácido sulfúrico com corpos de prova de CP II V, após 7 dias de imersão (Os autores, 2016).

Para que ficasse visível a alteração da cor da solução de ácido sulfúrico dos corpos de prova de cimento CP V e cimento CP II Z em relação a cor da solução de CP IV-32 RS, foi realizada uma imagem para que essa diferença ficasse visível, como é possível observar na Figura 43.

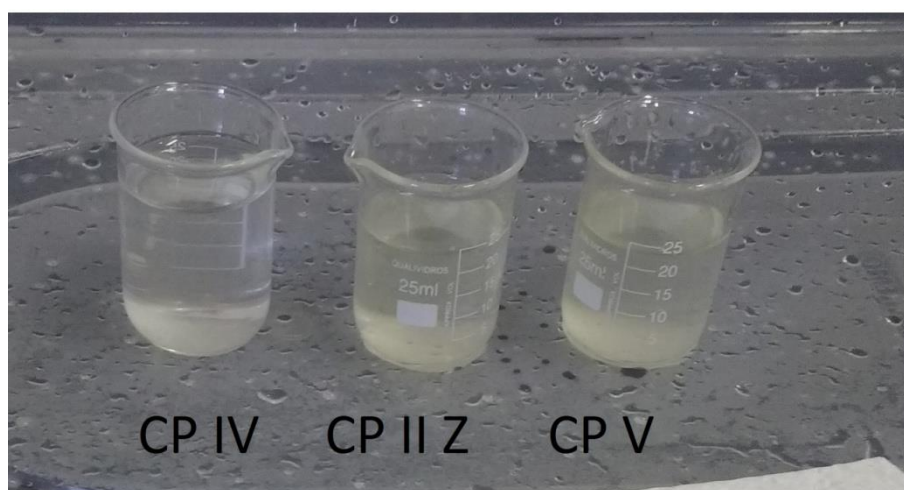


Figura 43. Solução de imersão de ácido sulfúrico dos três recipientes, após 7 dias (Os autores, 2016).

Nas soluções sulfato de sódio e de água saturada com cal houve pouca variação no pH da solução apesar do período de imersão dos corpos de prova ser maior do que o período de imersão dos corpos de prova na solução de ácido sulfúrico, como é possível observar nos Gráfico 9 e Gráfico 10.

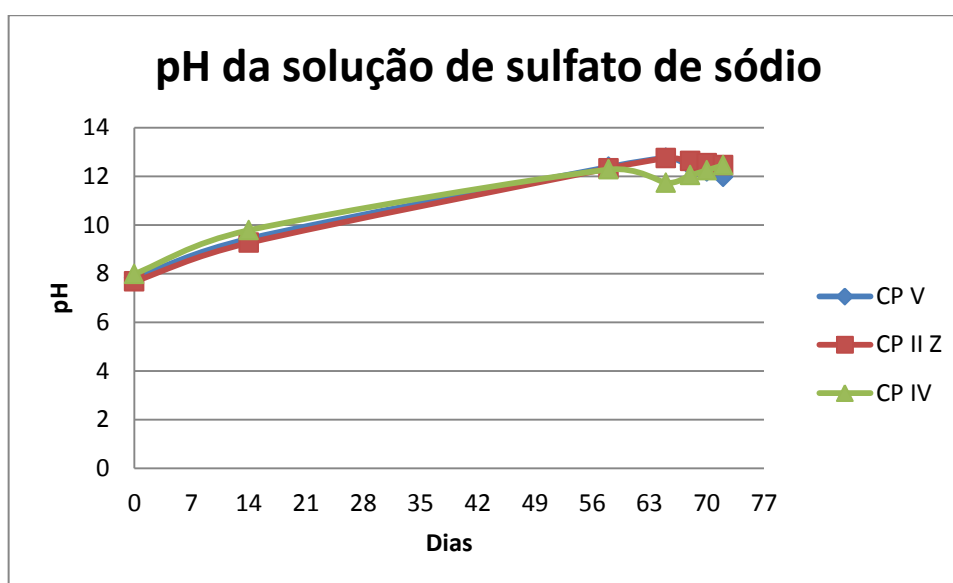


Gráfico 9.pH da solução de sulfato de sódio (Os autores, 2016).

Além disso, não houve variação visível na cor da solução de água saturada com cal e de sulfato de sódio como ocorreu com a solução de ácido sulfúrico.

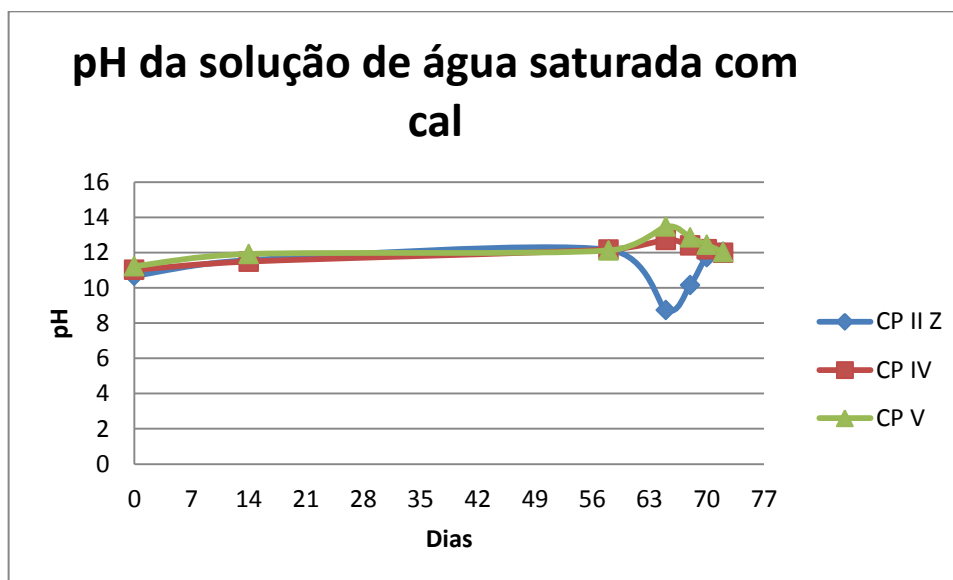


Gráfico 10. pH da solução de água saturada com cal (Os autores, 2016).

Dessa maneira, é possível verificar que a solução de ácido sulfúrico 1% está reduzindo a alcalinidade dos corpos de prova de argamassa, enquanto as soluções de sulfato de sódio e de água saturada com cal tiveram uma redução da alcalinidade dos corpos de prova de argamassa menor do que a amostra imersa em ácido sulfúrico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão descritas as considerações finais do presente trabalho e sugestões de aprofundamento do tema para trabalhos futuros.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese inicial foi confirmada. Os corpos de prova moldados com cimento de maior teor de adição, o CP IV-32 RS, tiveram a menor variação dimensional frente aos ataques submetidos, sulfato de sódio e ácido sulfúrico. Também foi observado comportamento divergente entre os corpos de prova atacados por ácido sulfúrico, frente aos por sulfato de sódio, sendo o primeiro, na concentração utilizada, o de ataque mais intenso.

Conforme objetivo principal deste trabalho, os diferentes tipos de cimento utilizados resultaram em valores diferentes de variação dimensional frente ao ataque de ácido sulfúrico. Relativamente a corpos de prova imersos em solução de hidróxido de sódio os valores máximos de variação dimensional observados no período da realização dos ensaios foram de: CP V - 0,93%, CP IV-32 RS- 0,349% e CP II-Z - 1,003%, ficando os valores do CP IV-32 RS cerca de um terço dos demais.

Quanto ao ensaio de perda de massa, foi verificado que os corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico tiveram um ganho de massa de 2% em relação ao início do ensaio, enquanto os corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio e água saturada com cal tiveram ganho de massa inicial de 1%. Verifica-se ainda que não ocorreu perda de massa significativa no ensaio para os corpos de prova imersos em ácido sulfúrico.

Nos corpos de prova imersos em solução de ácido sulfúrico é possível observação a alteração na porosidade e coloração dos corpos de prova de argamassa com apenas 7 dias em imersão. As faces dos corpos de prova que estavam anteriormente lisas, após o ataque por ácido sulfúrico se apresentam ásperas.

Os corpos de prova imersos em soluções de sulfato de sódio e água saturada com cal não apresentaram degradação tão avançada quanto os corpos de prova imersos no ácido sulfúrico, mesmo após terem ficado mais tempo expostos às soluções agressivas.

Contudo, a utilização da NBR 13583 para avaliar o cimento a ser utilizado em ambientes com a presença de ácido sulfúrico como indústrias, estações de tratamento de esgoto e outros não é o mais adequado, pois a norma especifica que os referidos cimentos que seriam resistentes ao sulfato de sódio não é resistente ao ácido sulfúrico por exemplo, pois o sulfato de sódio não é tão agressivo quanto o ácido sulfúrico, dessa maneira o cimento que não irá sofrer variação dimensional com sulfato de sódio, pode ter uma variação acentuada com o ácido sulfúrico.

Deste modo, é necessário especificar materiais mais resistentes para locais que estejam sujeitos ao ataque por ácido sulfúrico, sejam eles para o concreto ou para materiais utilizados para a impermeabilização das estruturas. Além disso, a utilização de impermeabilização com materiais cimentícios para este ambiente não seria adequada, uma vez que o cimento perde as propriedades que garantem a durabilidade da estrutura nestes ambientes.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos é possível avaliar como o concreto se comporta sob o ataque por soluções agressivas, uma vez que os corpos de prova de argamassa se comportam de maneira diferente dos corpos de prova de concreto.

Outro parâmetro que pode ser analisado é a utilização de diferentes fatores água cimento, pois a relação água cimento utilizada foi aquela preconizada pela NBR 13853, no entanto, ao utilizar um fator água/cimento maior, a porosidade do concreto estaria aumentada e dessa maneira mais suscetível ao ataque.

Para que seja posteriormente padronizado e normatizado, também é de grande valia o desenvolvimento de outros trabalhos nos quais sejam variadas as

concentrações das soluções de ácido sulfúrico para corpos de prova com cimentos com e sem resistência a sulfatos.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem** Abnt Nbr Nm 46:2003. [s.l: s.n.].

_____. **NBR NM 52 Agregado graúdo - Determinação de massa específica , massa específica aparente e absorção de água.** [s.l: s.n.].

_____. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica.** [s.l: s.n.].

_____. **NBR 5737 Cimentos Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro: ABNT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento** Abnt. Rio de Janeiro: ABNT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 7211 - Agregados para concreto - especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 7218 - Agregado - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** PDF. Rio de Janeiro: ABNT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 7251 - Agregado em estado solto - determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro: ANBT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** ABNT, [s.l: s.n.].

_____. **NBR 12655 - Controle de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, [s.n.].

_____. **NBR 13281 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, [s.n.].

_____. **NBR 13583 - Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à soluções de sulfato de sódio.** Rio de Janeiro: ABNT, [s.n.].

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. - **Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato.** Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, PB, 2003.

CHANG, Z. T. et al. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. **Cement and Concrete Research,**

2005.

COSTA, R. M. **Análise De Propriedades Mecânicas Do Concreto Deteriorado Pela Ação De Sulfato Mediante Utilização Do Upv.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, 2004.

FATTUHI, N. I. ; HUGHES, B. P. The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack. **Cement and Concrete Research**, v. 18, p. 545–553, 1988.

GIRARDI, F.; VAONA, W.; DI MAGGIO, R. Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 595–602, 2010.

GIRARDI, R. **Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2003.

HELENE, P.; FIGUEIREDO, E. P. Introdução. In: **Manual de Reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Red Rehabilitar, 2003. p. 718.

HO, D. W. S. Durability of concrete. In: **The civil engineering handbook.** 2^a ed. Nova York: CRC Press, 2003.

HOPPE FILHO, J. et al. **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores.** Cerâmica, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 168-177, jun. 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000200168&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 22 jan. 2017.

HOPPE, J. F. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto.** 298p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2008.

HUSNI, R. et al. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: [s.n.].

KULISCH, D. **Ataque por sulfatos em estruturas de concreto.** [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2011.

LINHARES, B. T. **Avaliação do desempenho de cimentos CP II E e CP II F com**

diferente teores de pozolanas frente ao ataque de íons sulfato. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

LOURENÇO, R. **Desempenho de argamassas para reabilitação de revestimentos de fachadas desagregadas sob ações gelo/degelo.** Universidade da Beira Interior, 2010.

MASSAZZA, F. **Structure of Pozolana and Fly Ash and the Hydration of Pozzolanic and Fly-Ash Cements.** In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT 7th, 1980. Paris, France. Proceedings, V. IV, Theme IV, pp 85-96

MEDINA, E. **Pozolanicidade do Metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** 151p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição ed. São Paulo: [s.n.].

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1275–1296, 2004.

REAL, R.; QUEIROZ, P.; SILVA PINTO, J. D.; AGUIAR, R. C.; SOARES, T. C.; COELHO, M. **Avaliação das propriedades do Concreto de Alto Desempenho submetido ao ataque químico com ácido sulfúrico.** Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, MG, 2016.

SILVA, N. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Universidade Federal do Paraná, 2006.

SKALNY, J. P.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfat Attack on Concrete.** [s.l.: s.n.].

YOUSEFI, A.; ALLAHVERDI, A.; HEJAZI, P. Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 86, p. 317–326, 2014.

YUAN, H. et al. Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 267–277, 2013.

7. ANEXOS

Neste capítulo serão dispostas todas as fotos das barras capturadas ao longo dos ensaios de variação dimensional, com a finalidade de realizar a análise visual.

7.1. FOTOS DO TRABALHO

As fotos da análise visual dos corpos de prova em todas as idades serão dispostas a seguir.

7.1.1. Análise Visual das barras imersas em água saturada com cal

A seguir serão postas as fotos das barras moldados com os três tipos de cimento em imersão de água saturada com sal.

7.1.1.1. Barras moldadas com cimento CP V imersa em água saturada com cal

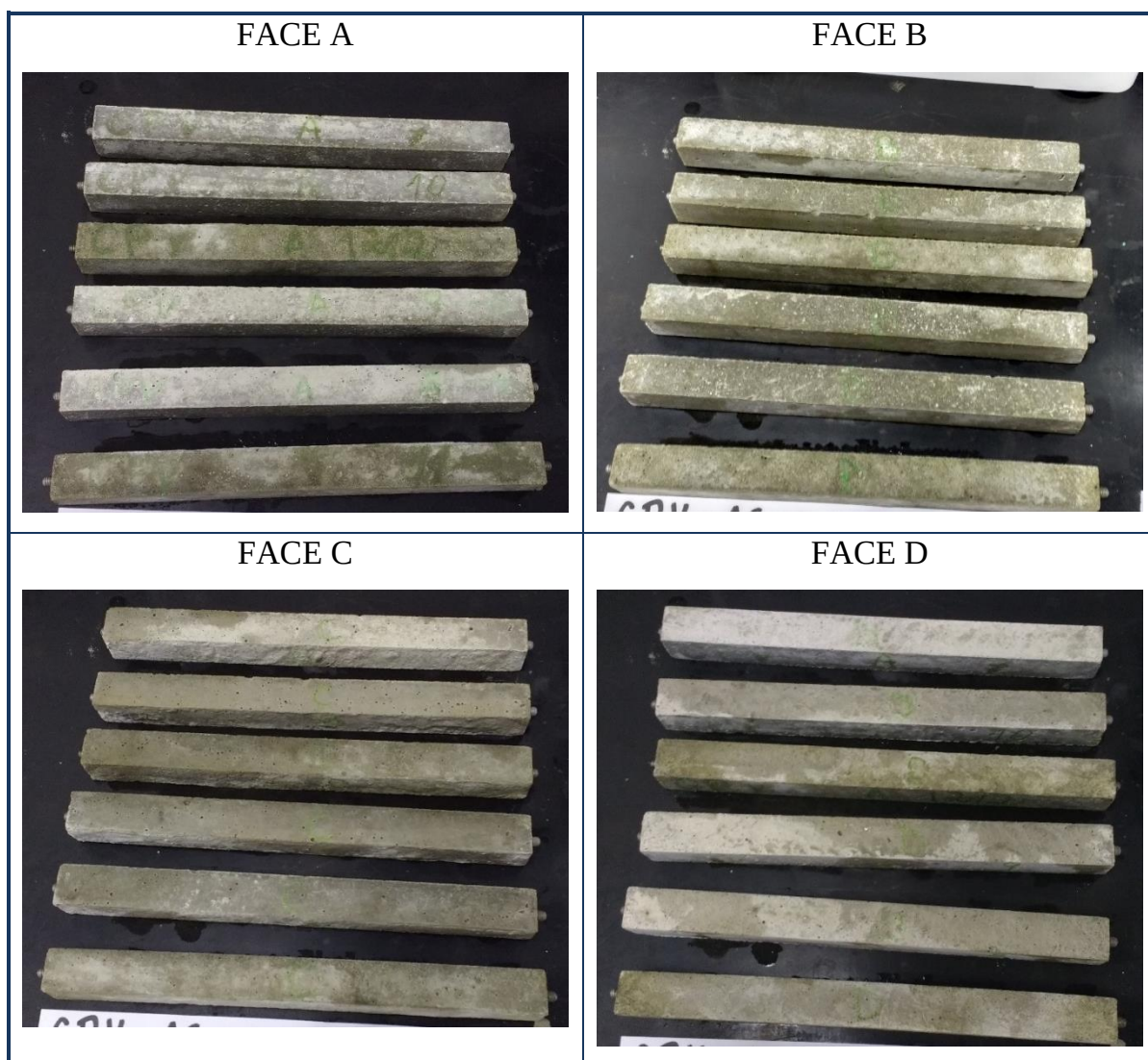


Figura 44. Barras moldadas com cimento CP V imersa em água saturada com cal aos 7 dias de idade
(Os autores, 2016)

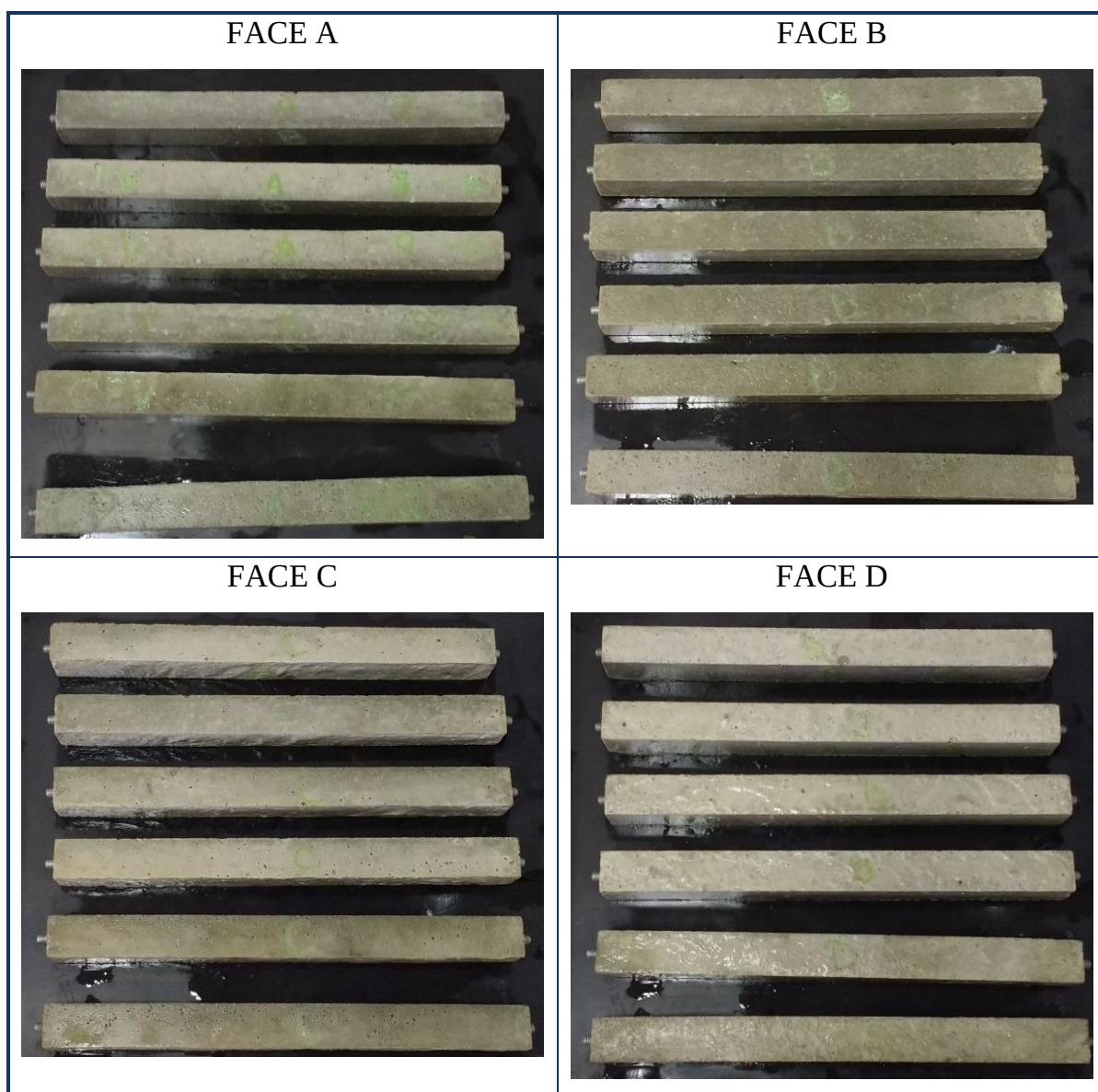


Figura 45. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

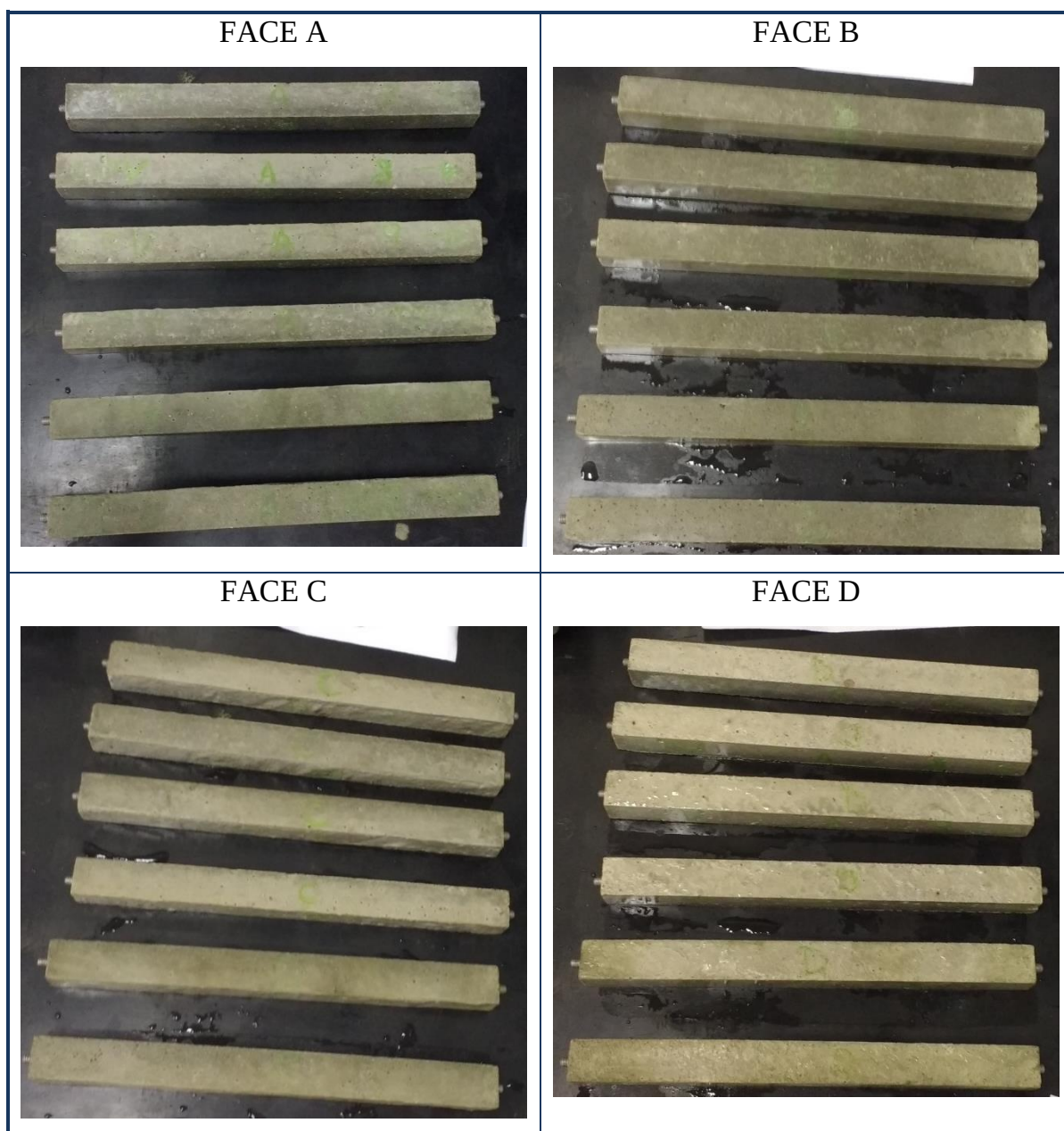


Figura 46. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 28 dias de idade (Os autores, 2016).

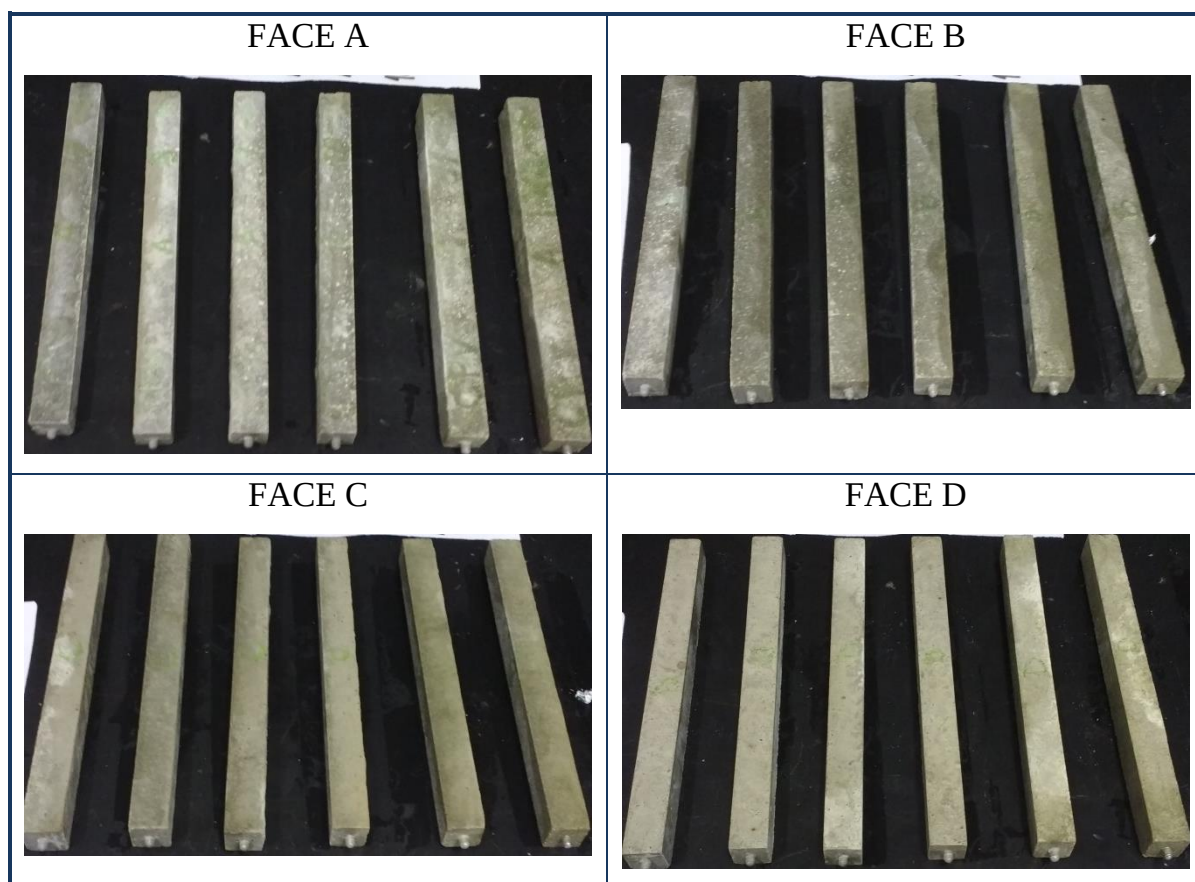


Figura 47. Barras moldadas com cimento CP V imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.1.2. Barras moldadas com cimento CP II Z imersa em água saturada com cal aos 7 dias de idade

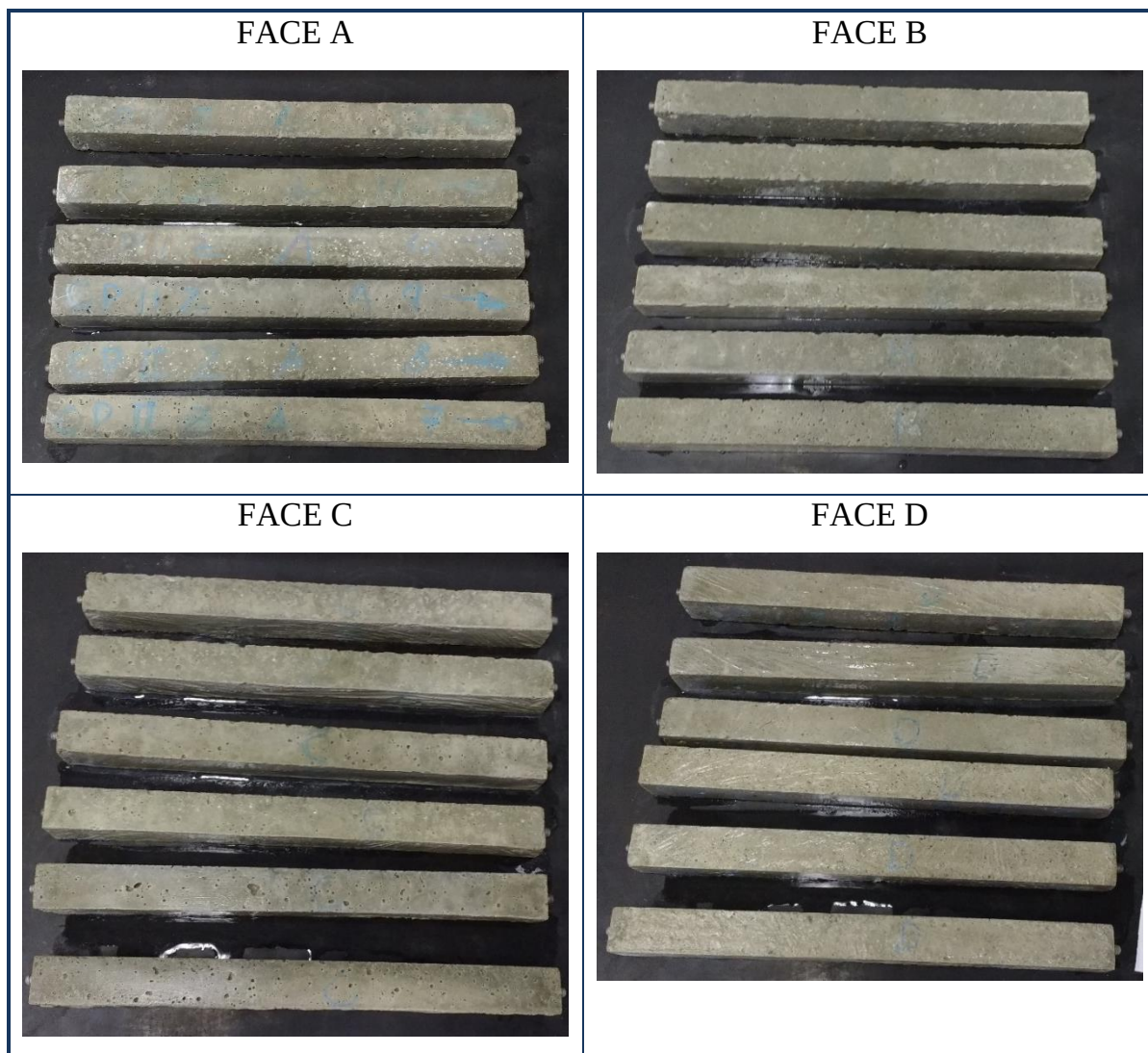


Figura 48. Barras moldadas com cimento CP II Z imersa em água saturada com cal aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

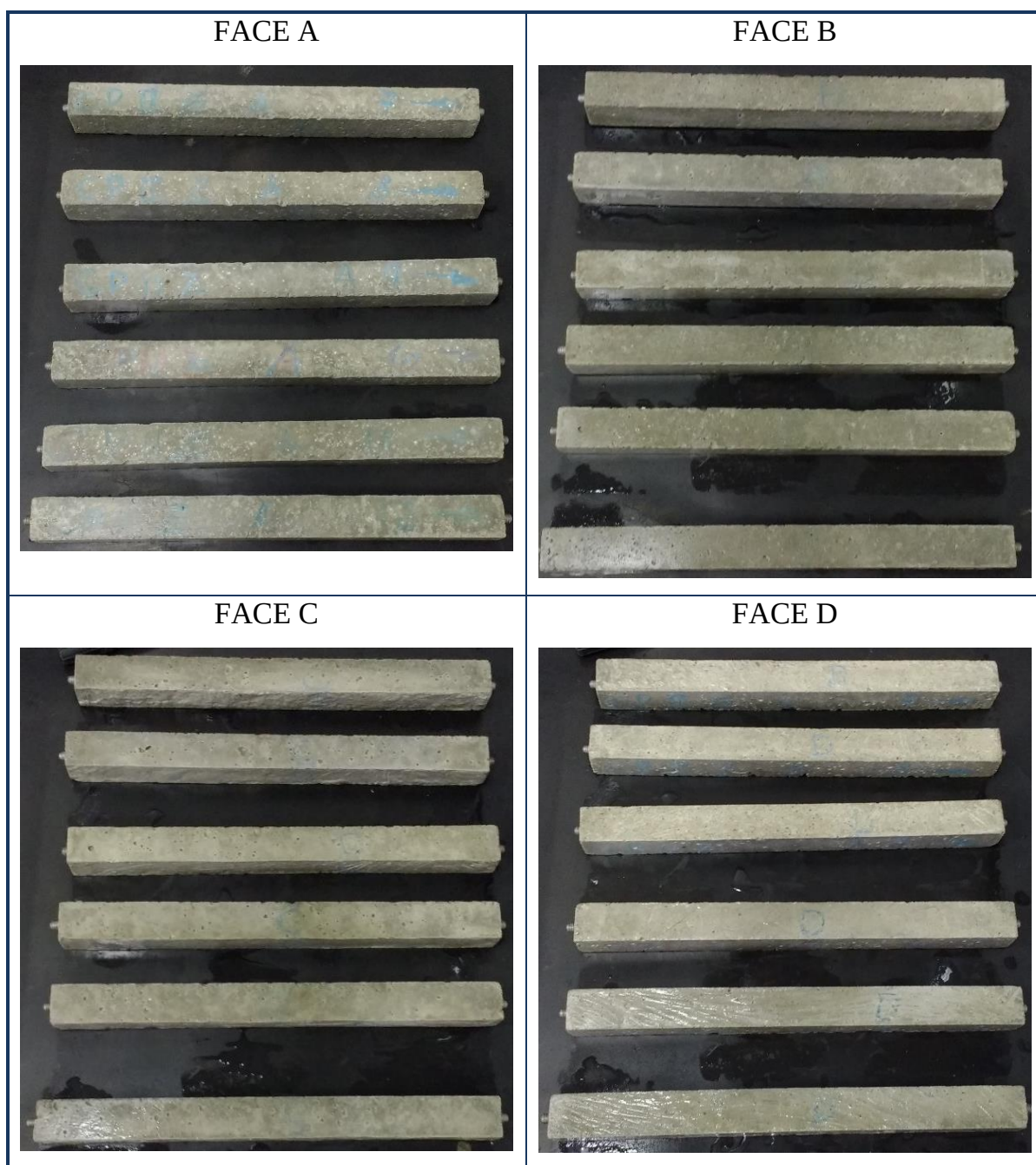


Figura 49. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

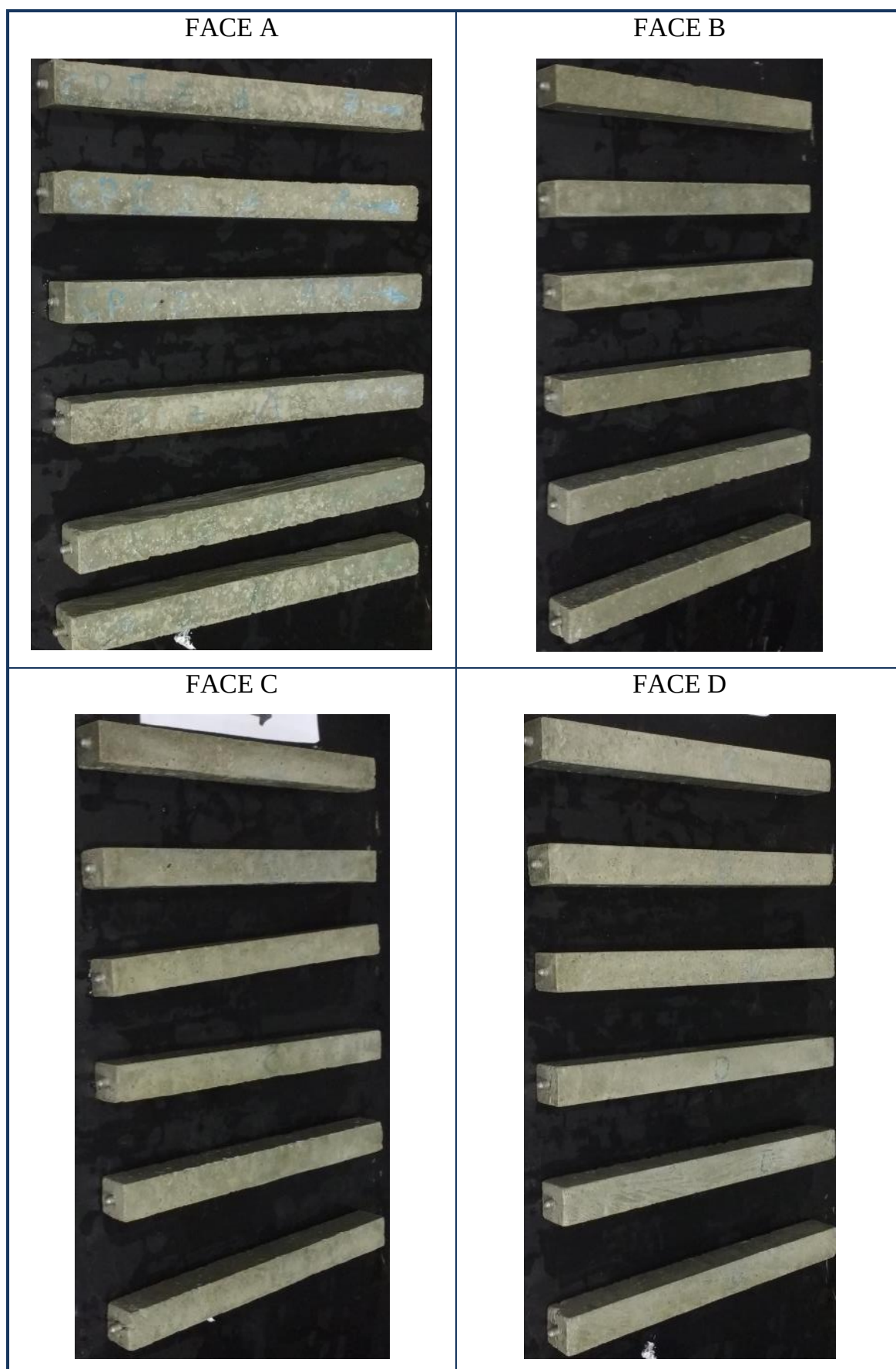


Figura 50. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.1.3. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com cal

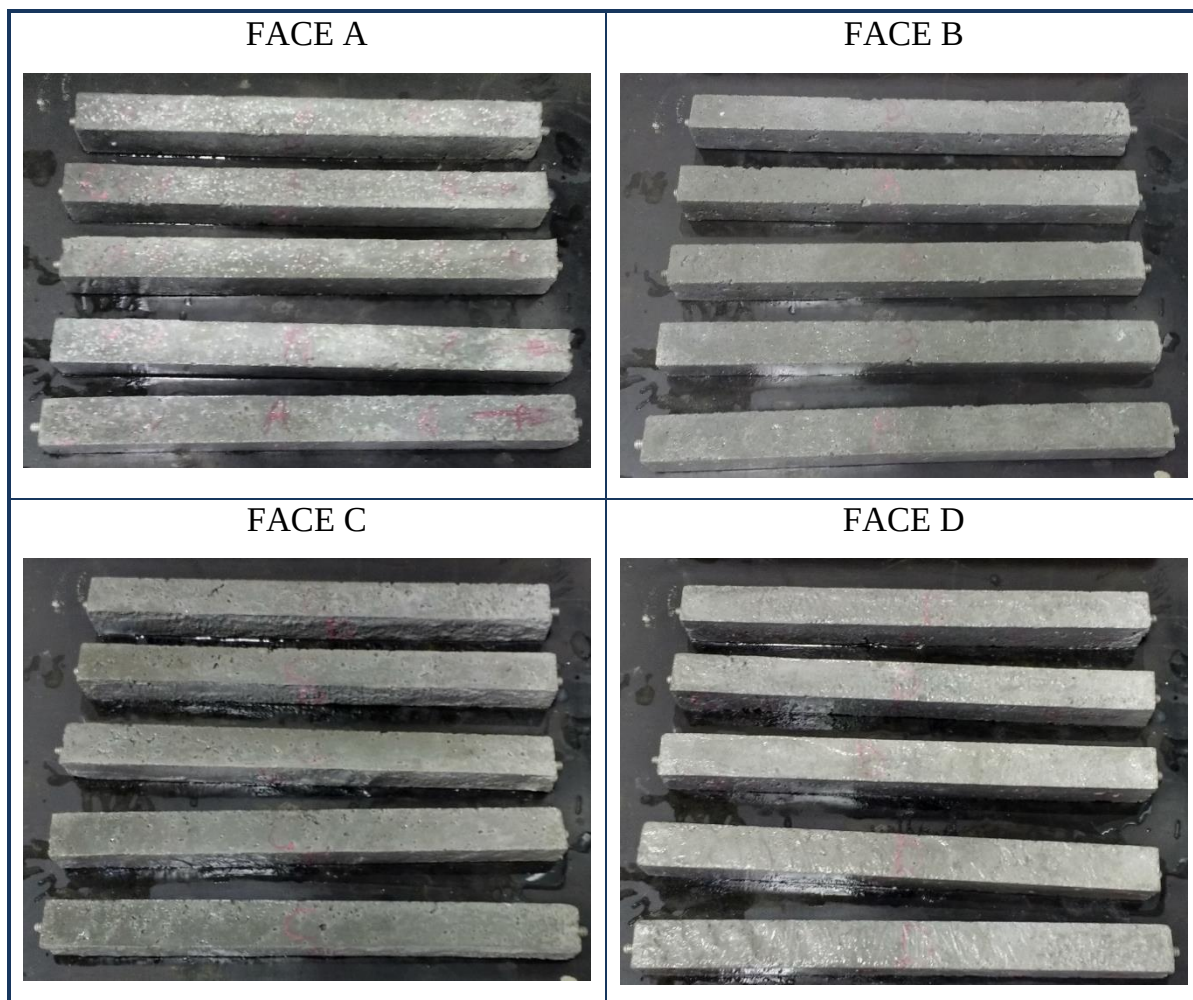


Figura 51. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com cal aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

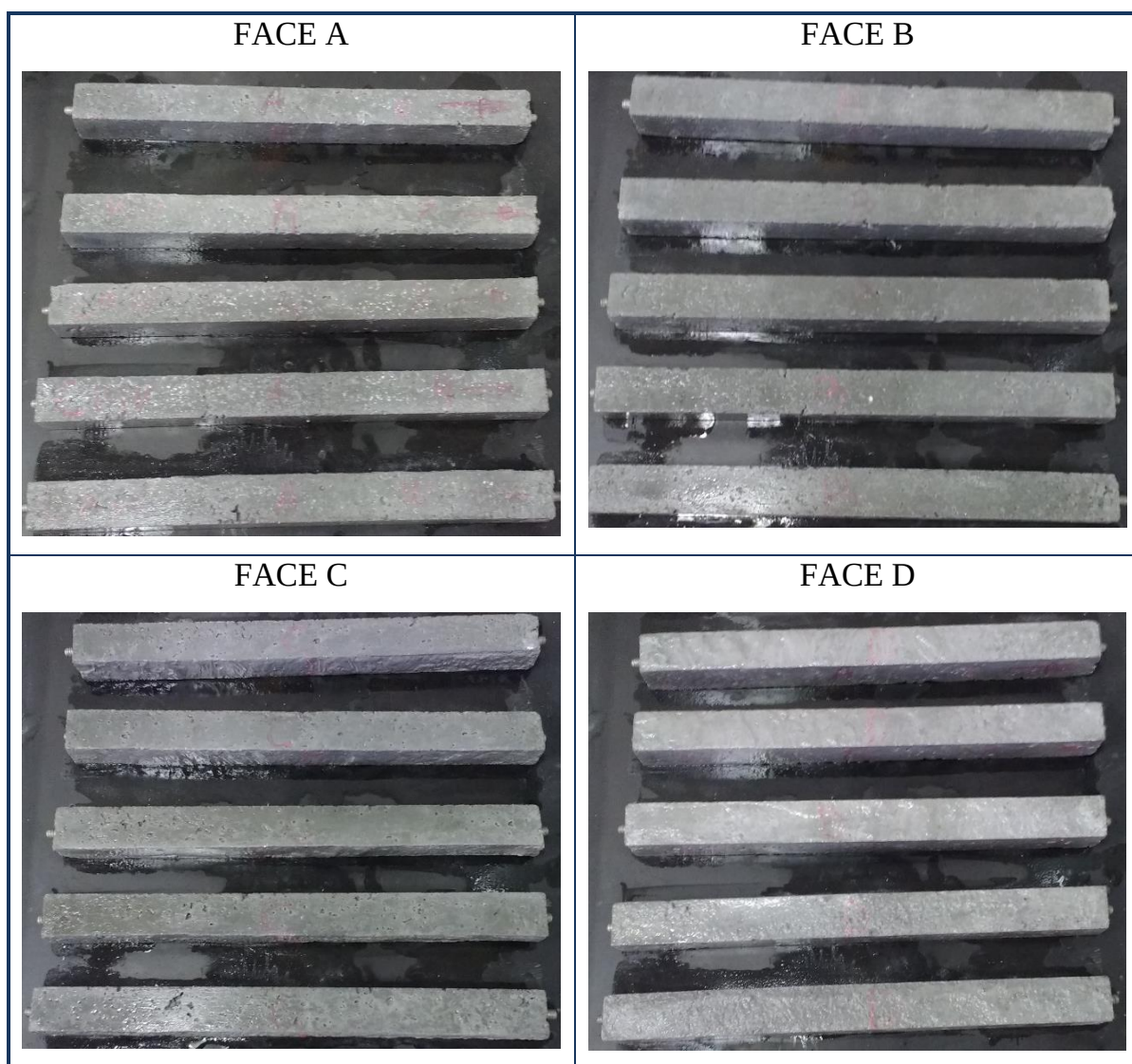


Figura 52. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com sal aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

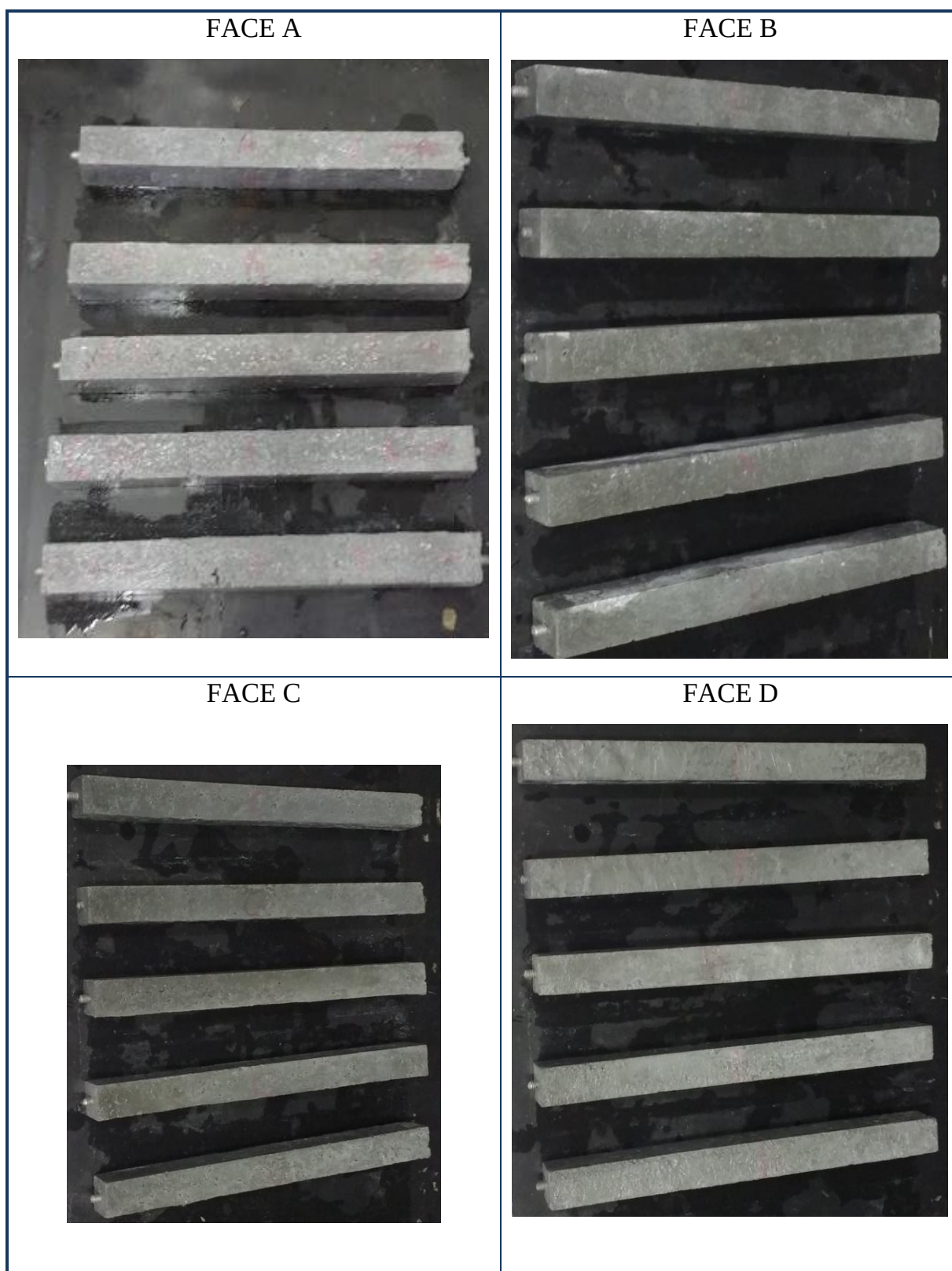


Figura 53. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em água saturada com sal aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.2. Análise Visual das barras imersas em solução de sulfato de sódio

7.1.2.1. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de sulfato de sódio

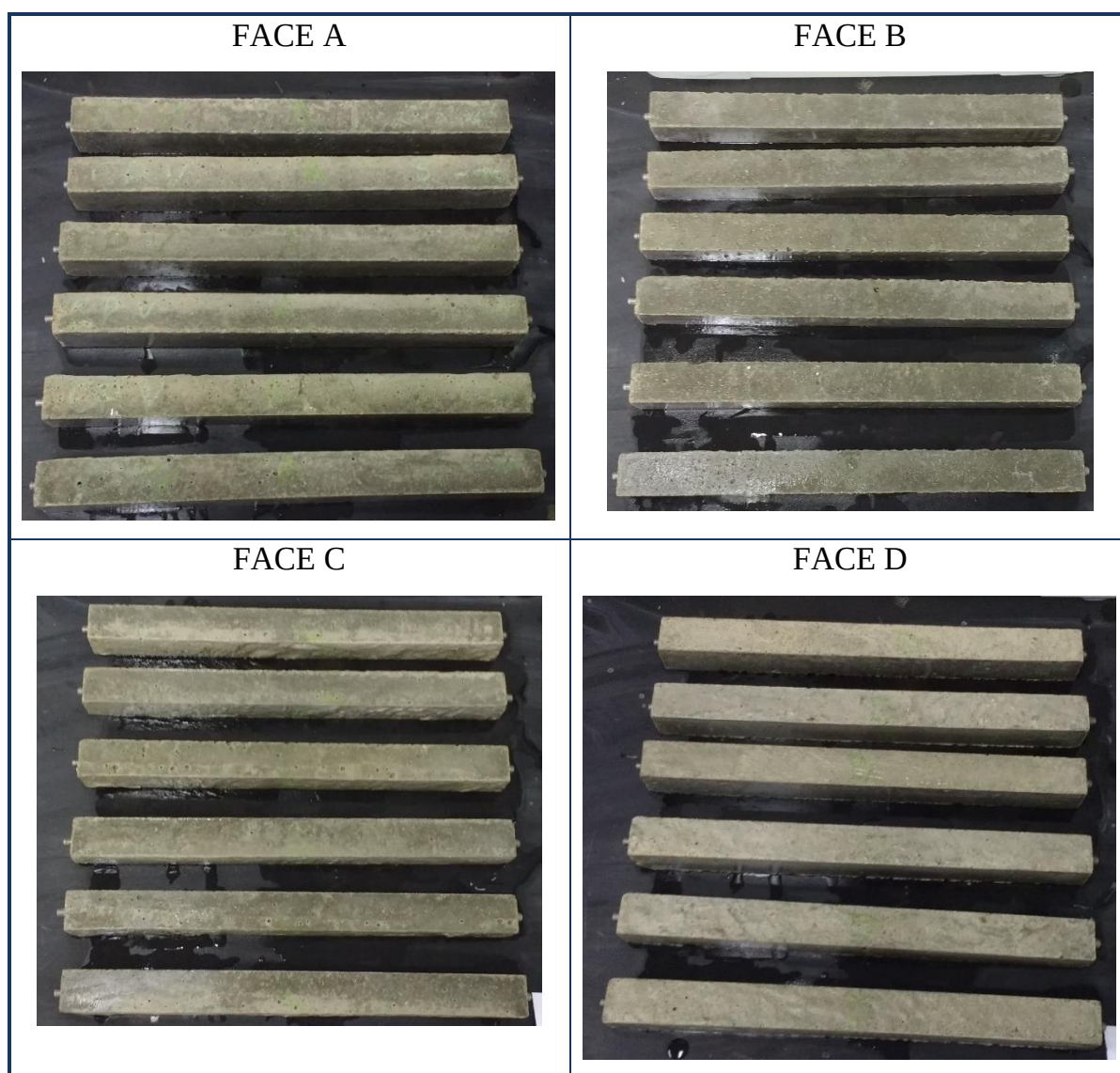


Figura 54. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

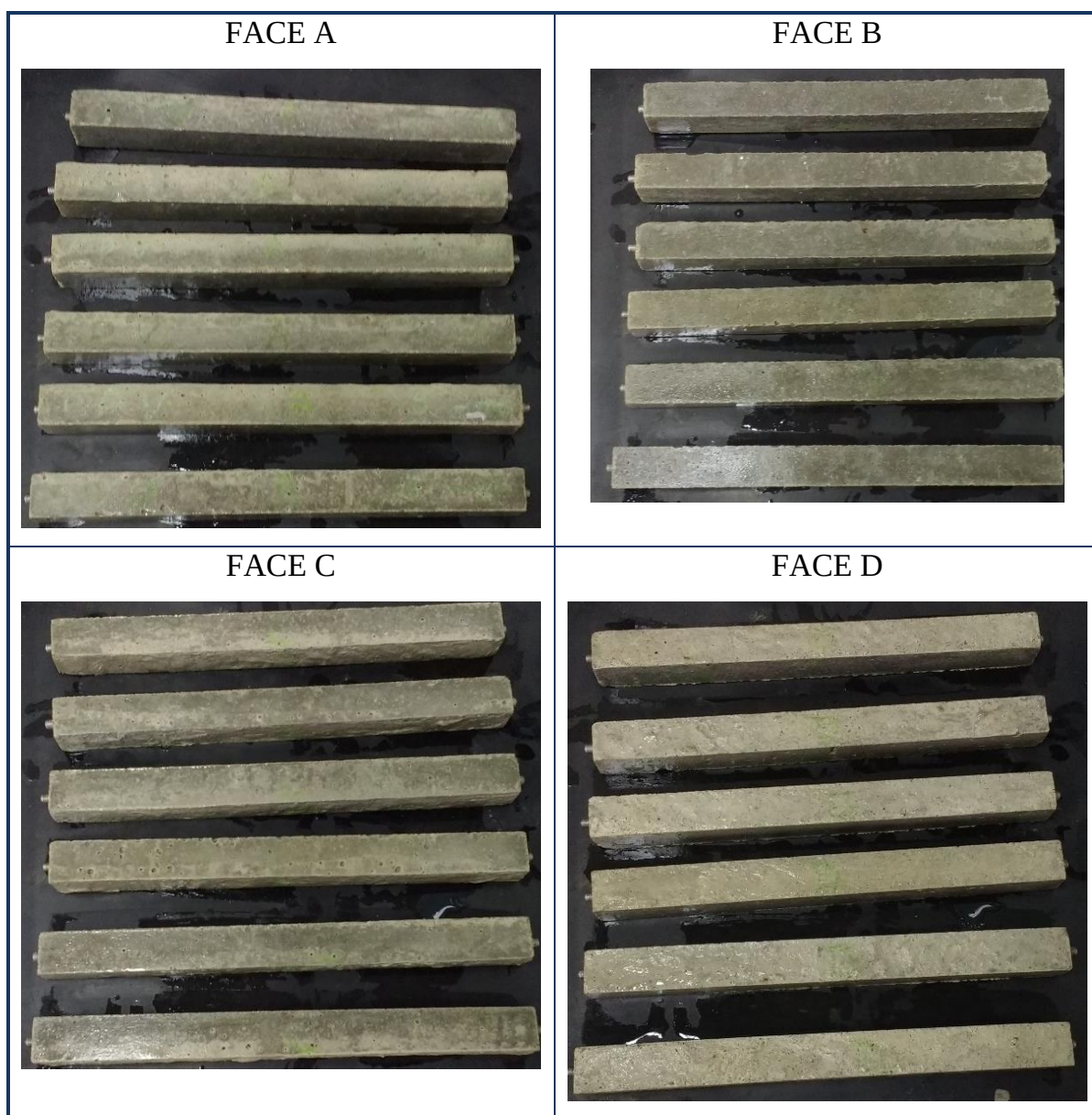


Figura 55. Barras moldadas com cimento CP V imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).



Figura 56. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de sulfato de sódio aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.2.2. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade

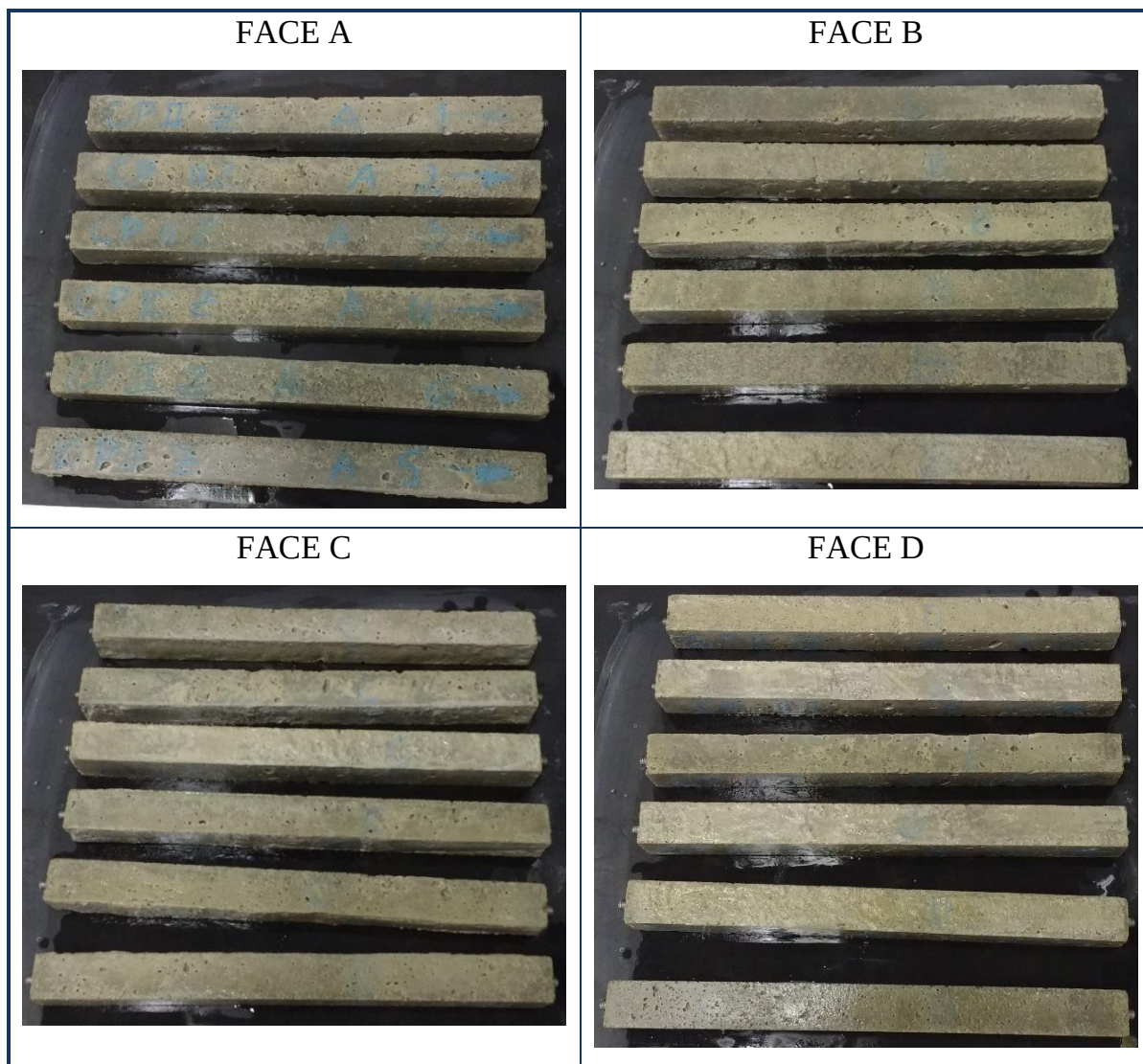


Figura 57. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

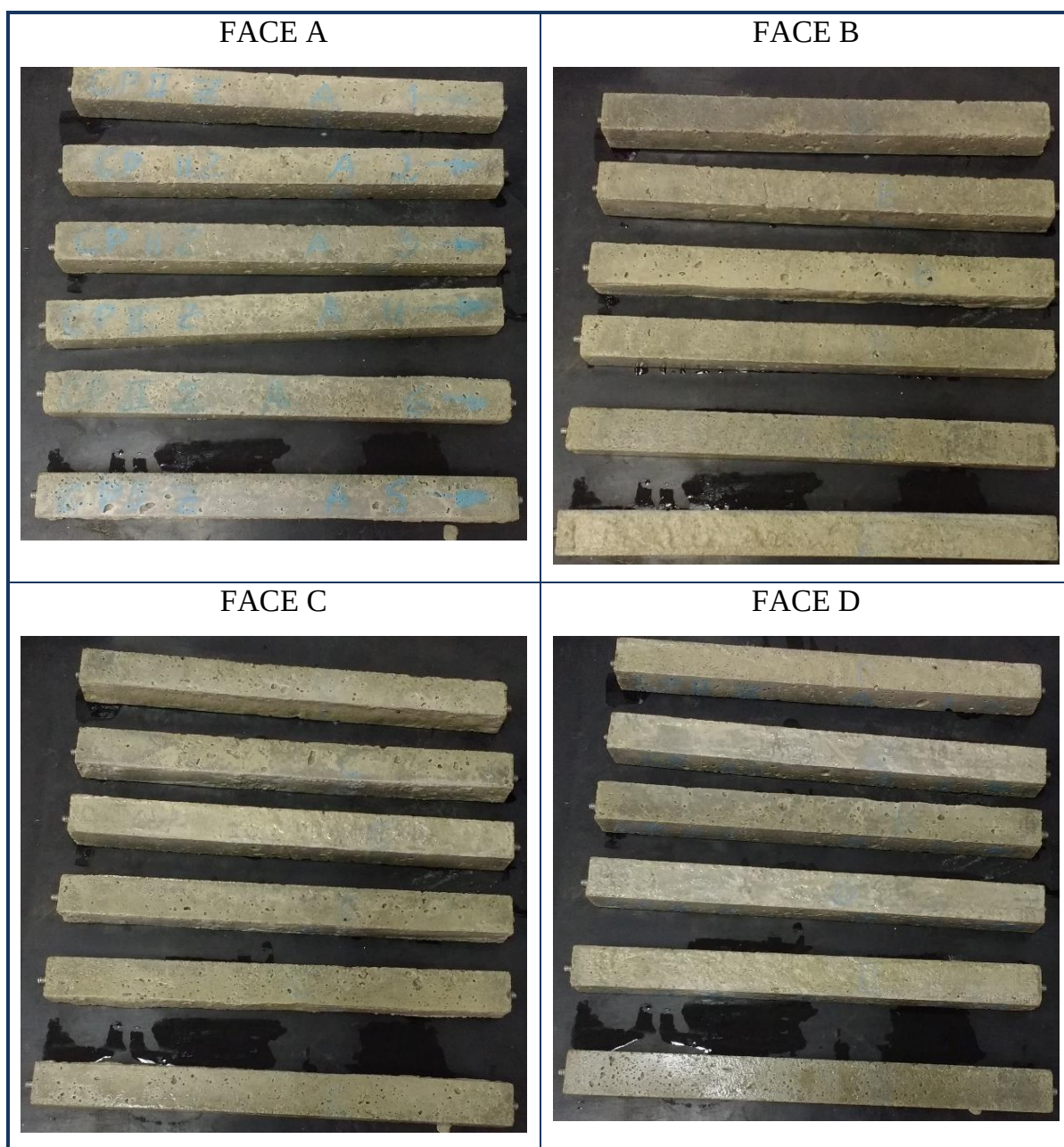


Figura 58. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.2.3. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio

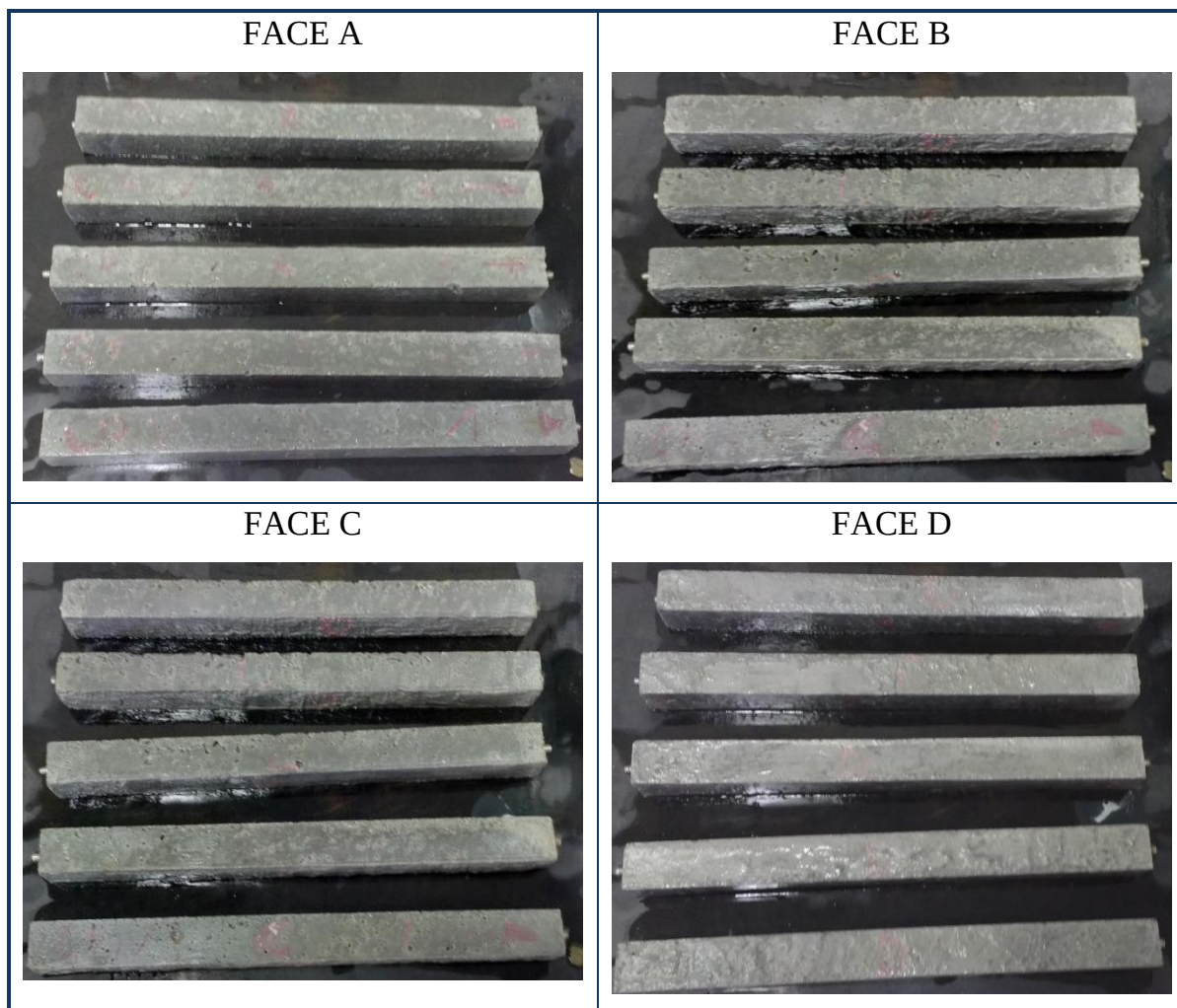


Figura 59. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

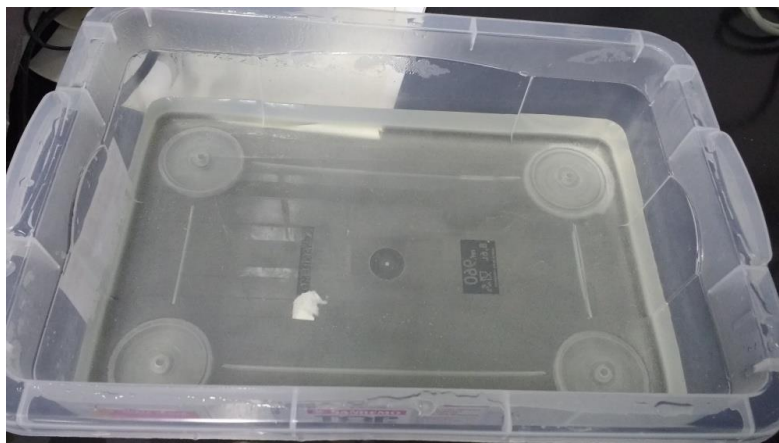


Figura 60. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

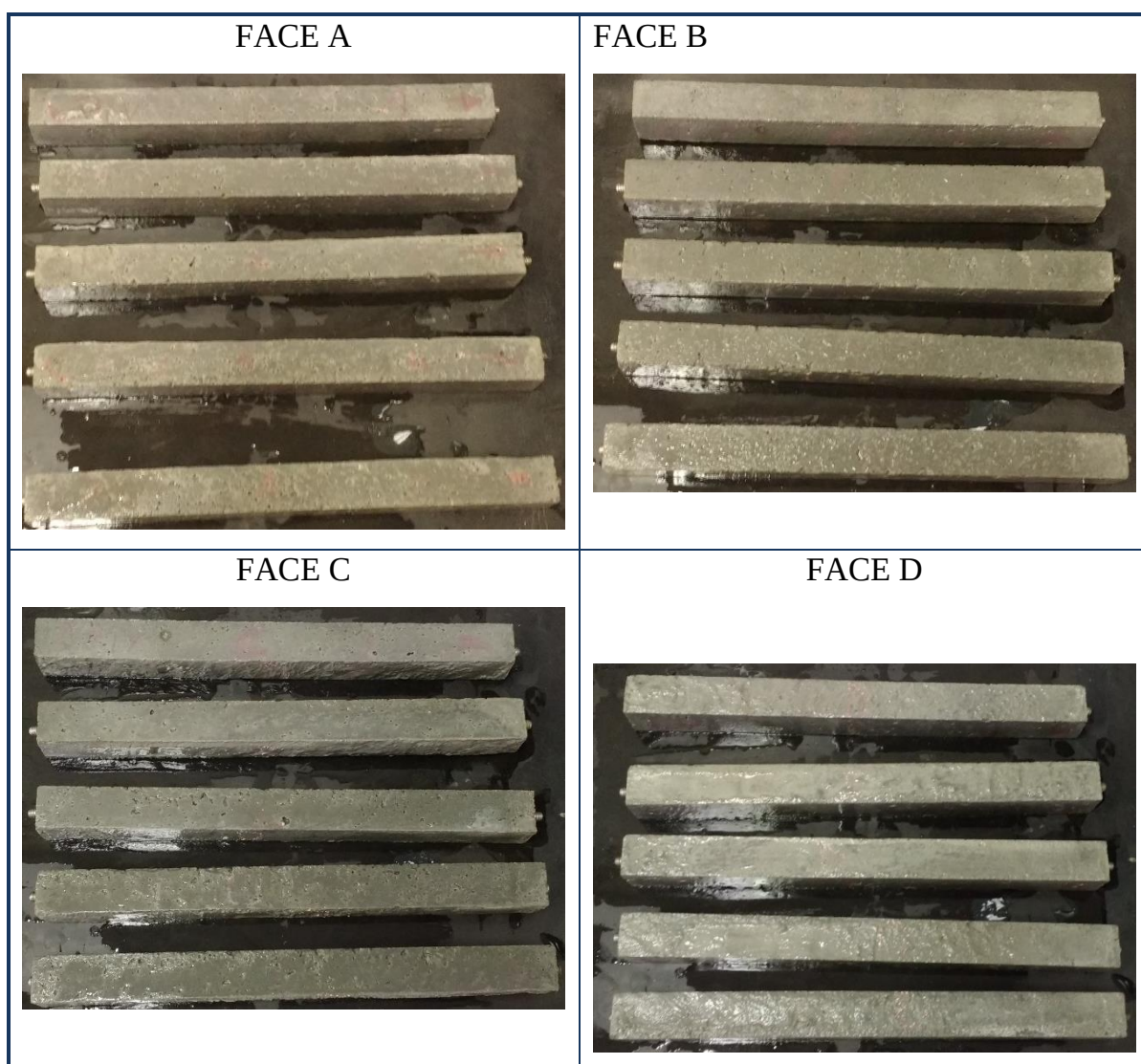


Figura 61. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas solução de sulfato de sódio aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

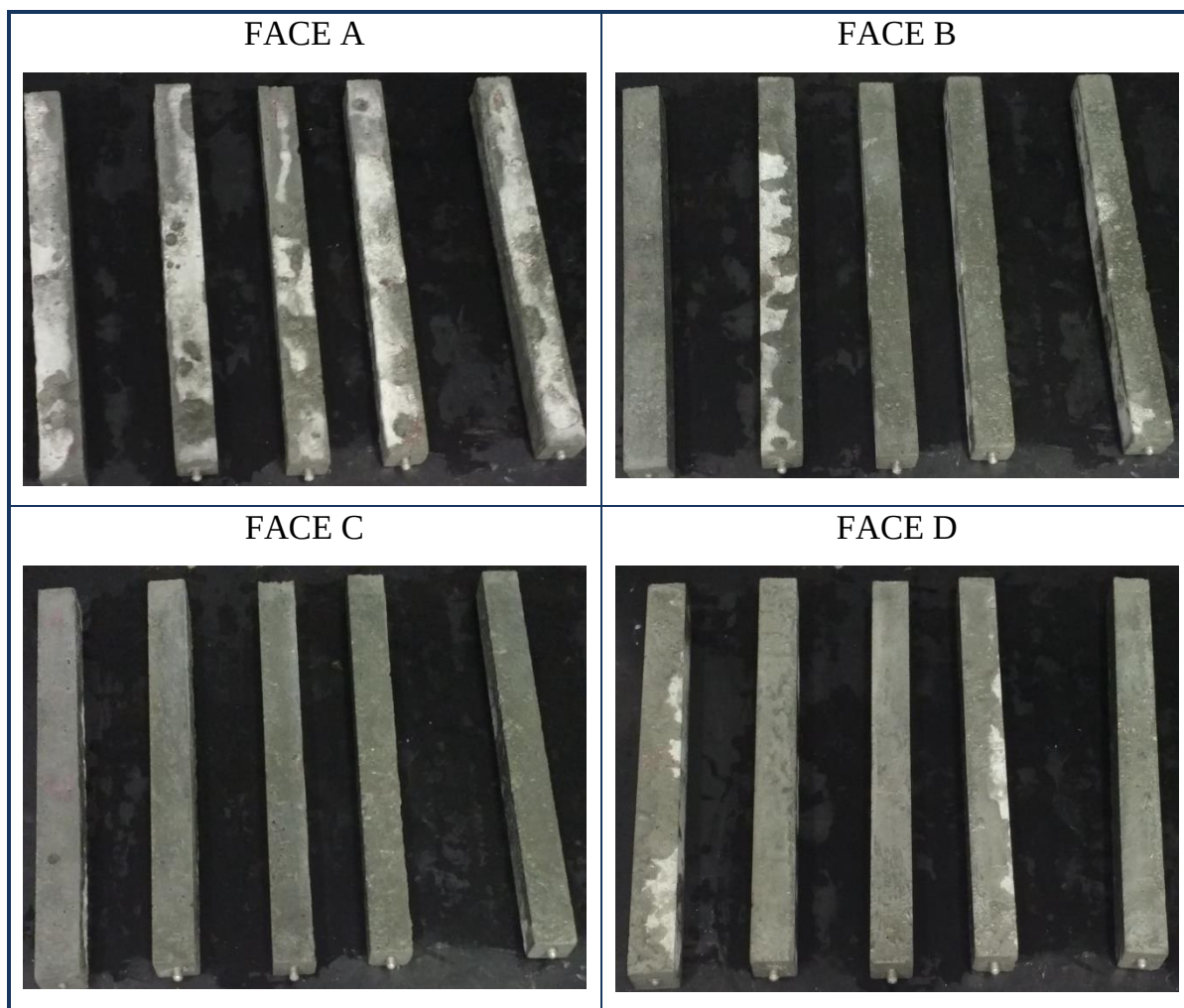


Figura 62. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de sulfato de sódio aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.3. Análise Visual das barras imersas em solução de ácido sulfúrico

7.1.3.1. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico

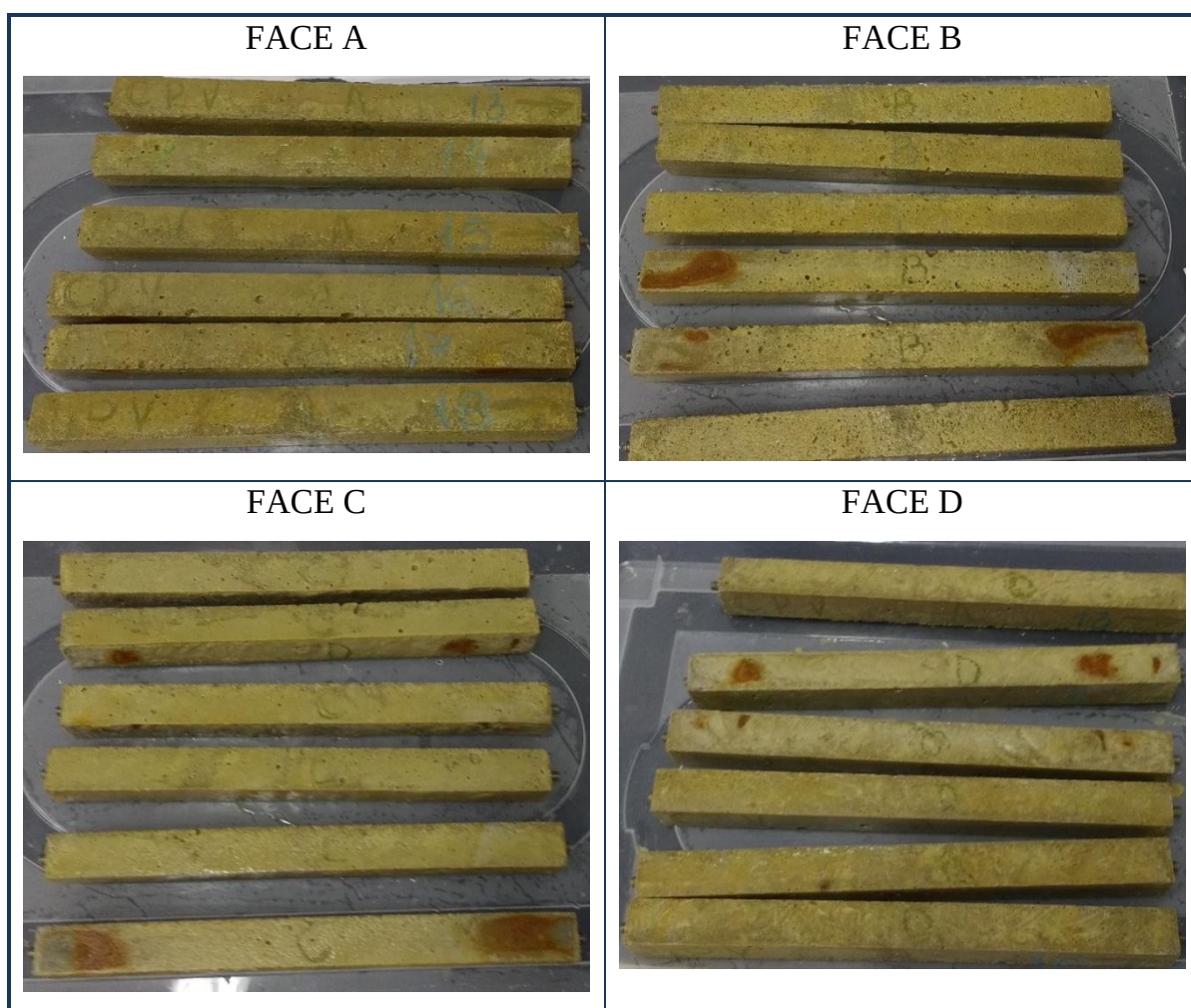


Figura 63. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).



Figura 64. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade com coloração alterada.

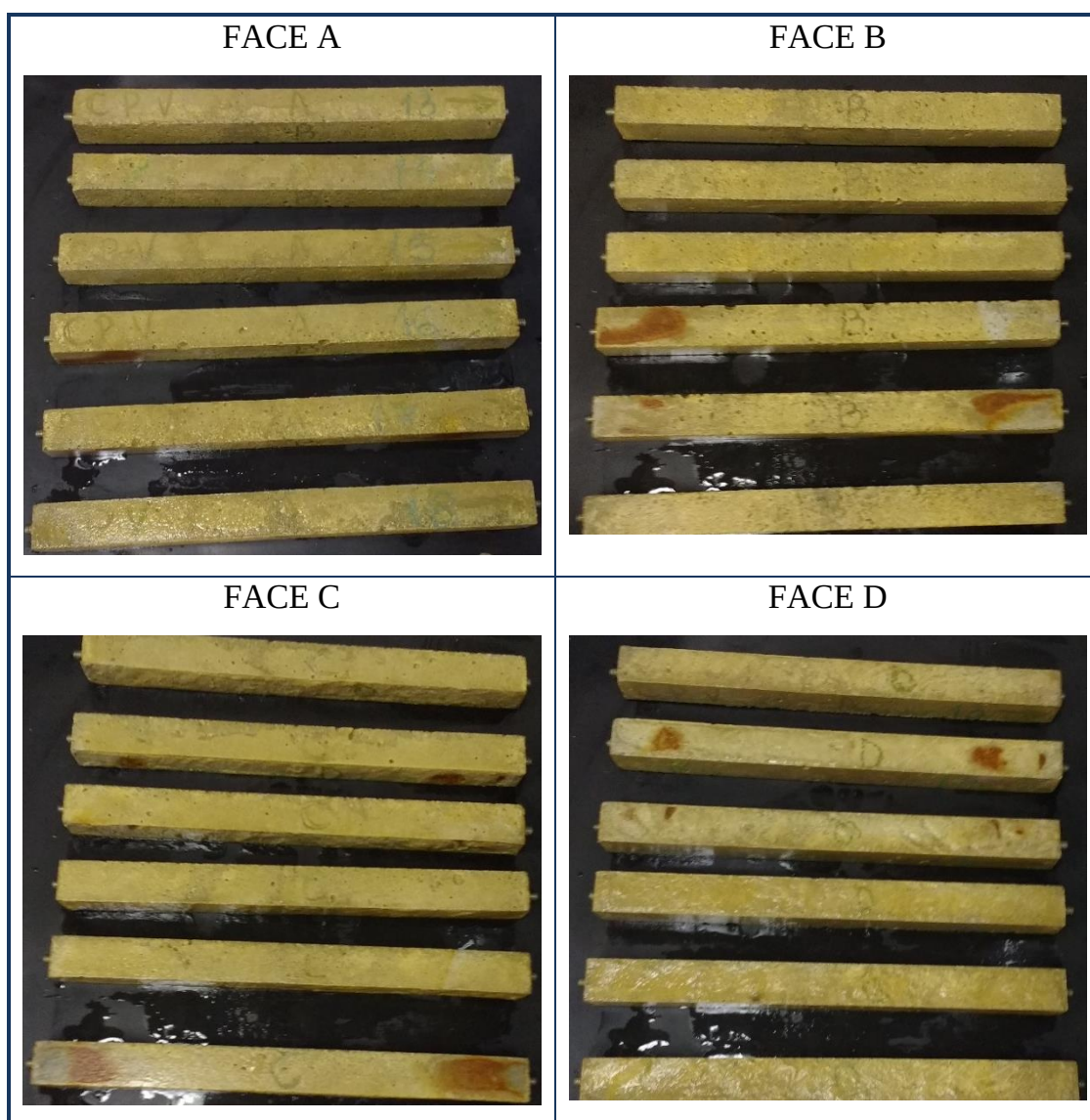


Figura 65. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

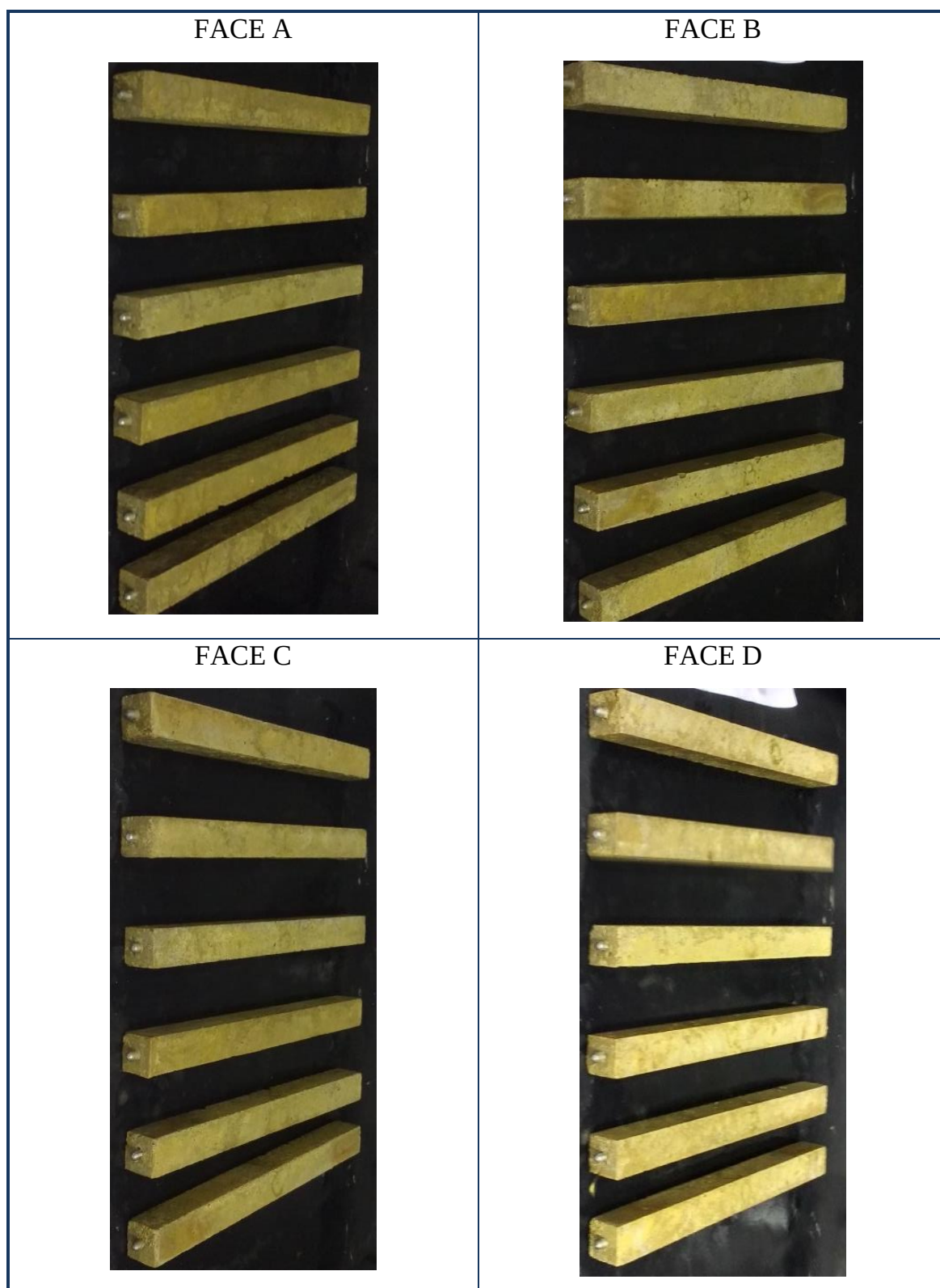


Figura 66. Barras moldadas com cimento CP V imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.3.2. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico

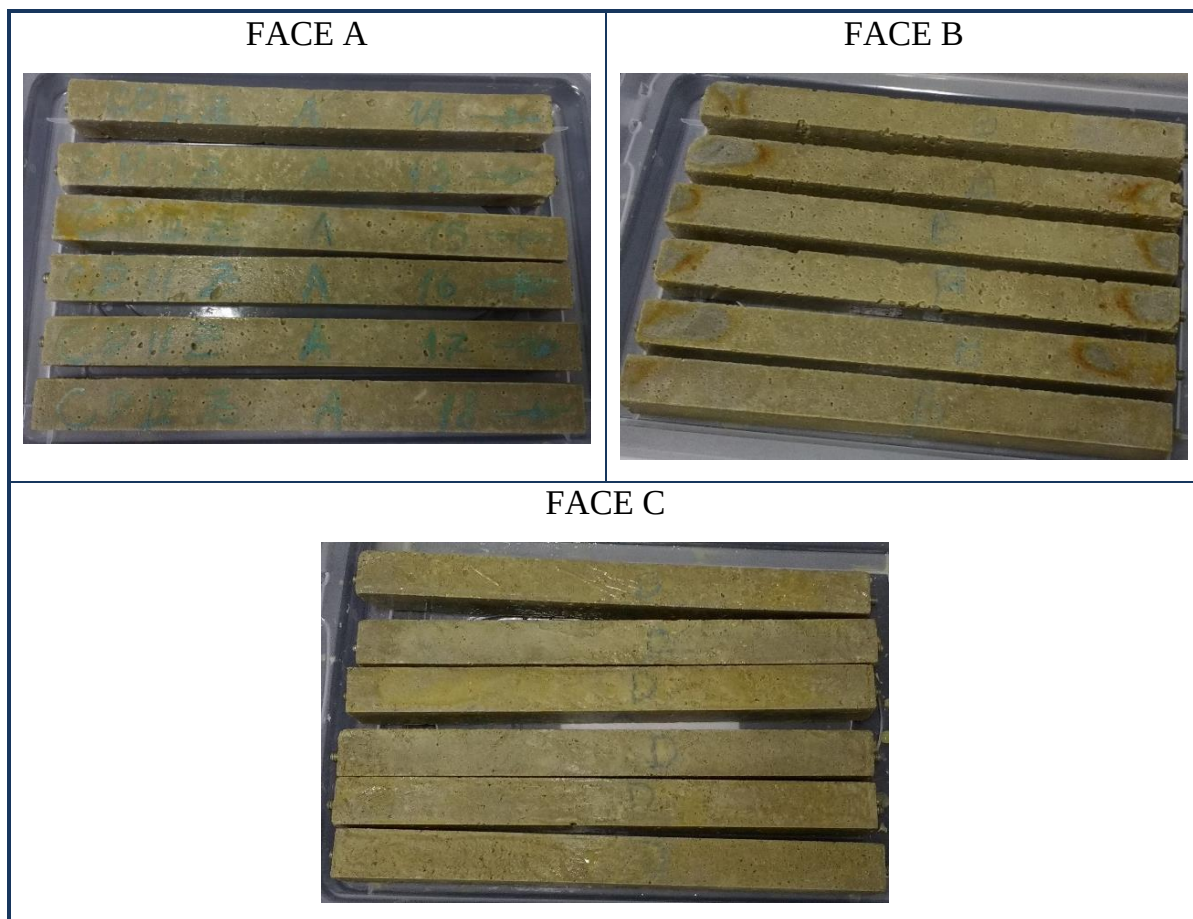


Figura 67. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).



Figura 68. Imagem ampliada das barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

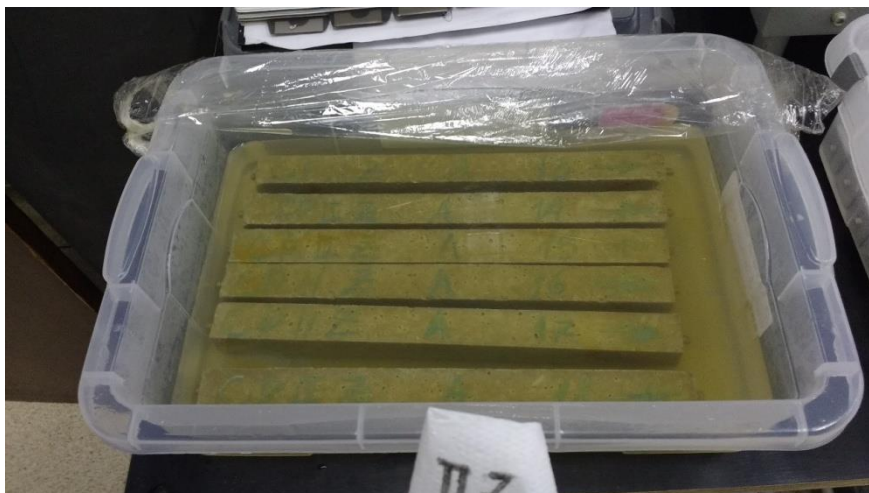


Figura 69. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade com coloração alterada (Os autores, 2016).

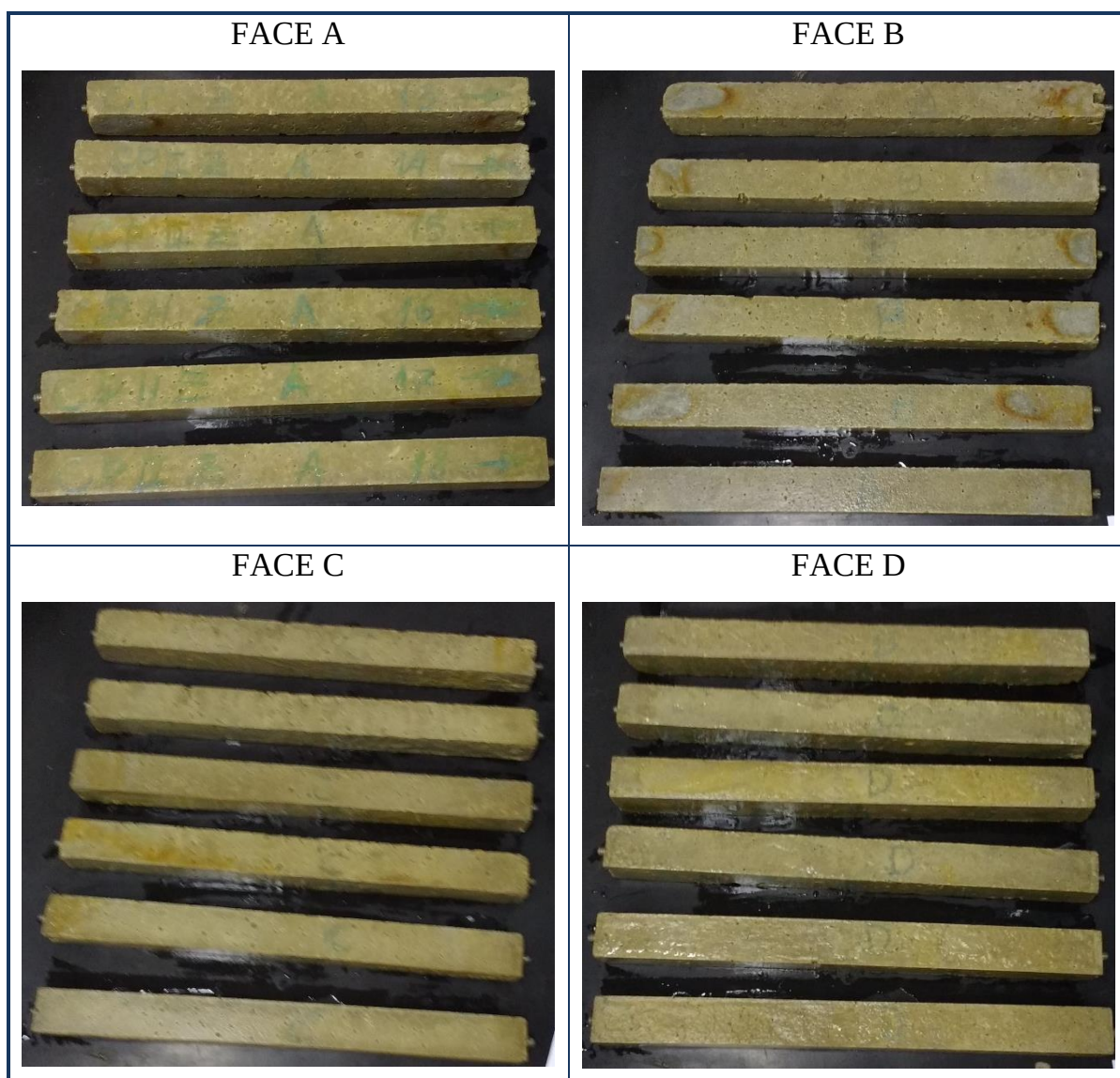


Figura 70. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).



Figura 71. Solução em que estavam imersas as barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

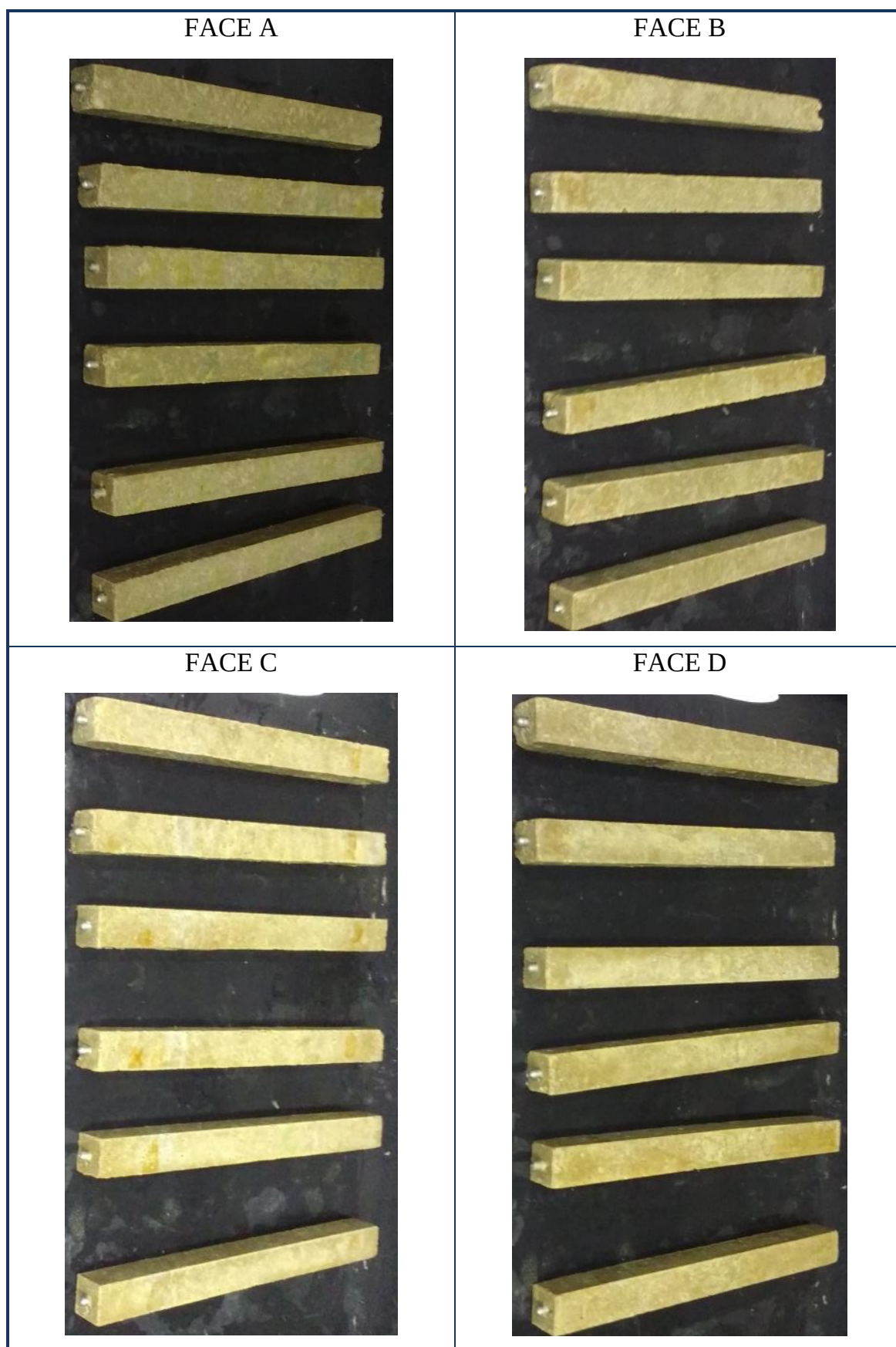


Figura 72. Barras moldadas com cimento CP II Z imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).

7.1.3.3. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico

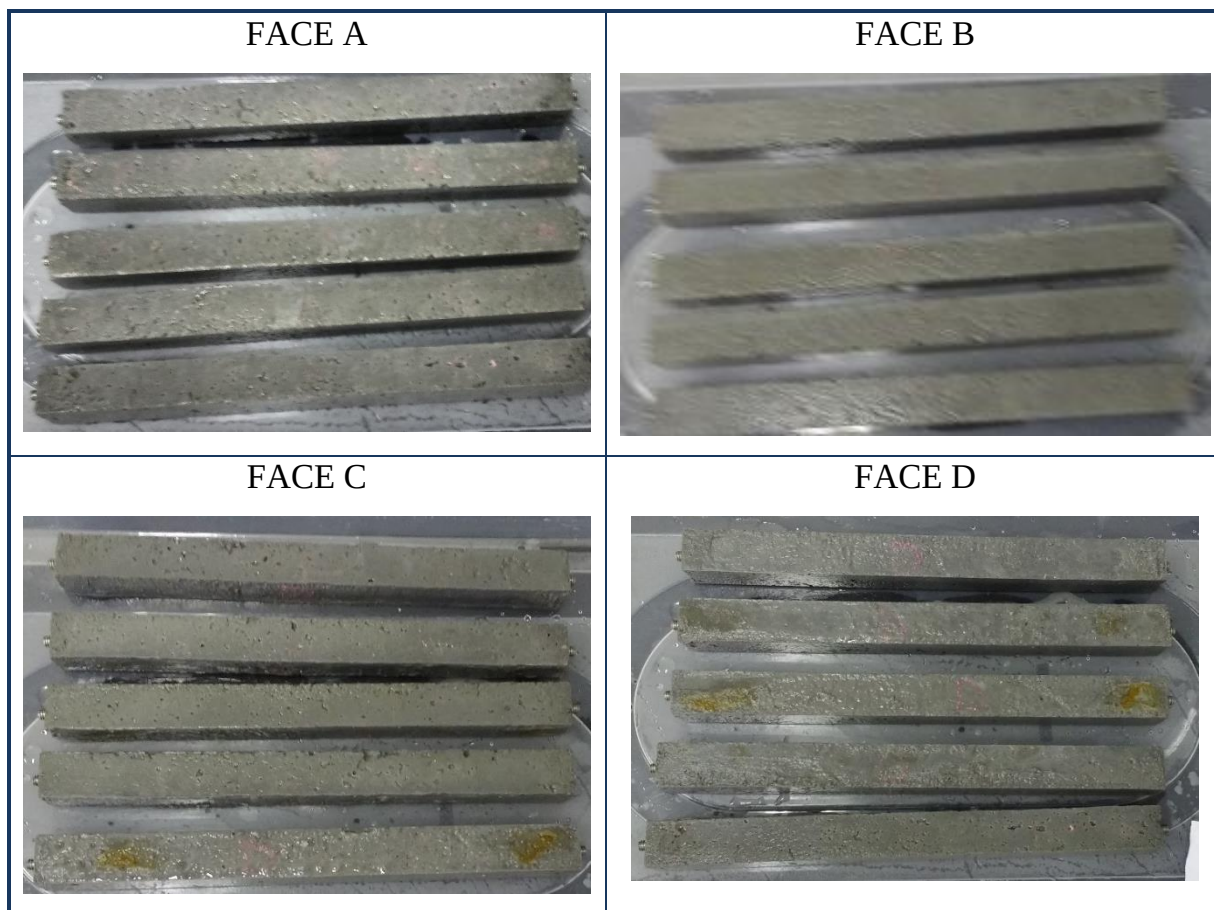


Figura 73. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).



Figura 74. Solução onde estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 7 dias de idade (Os autores, 2016).

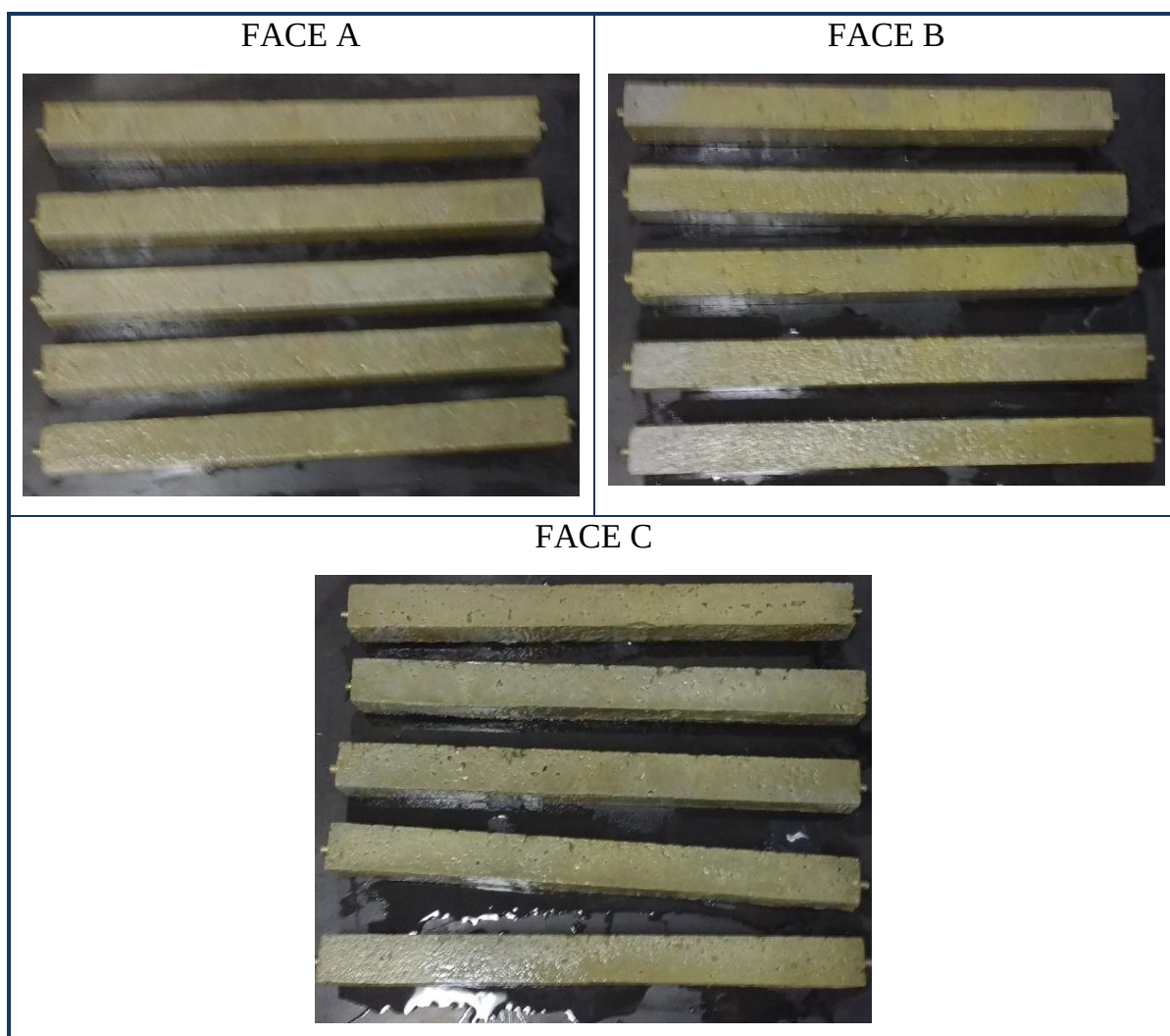


Figura 75. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

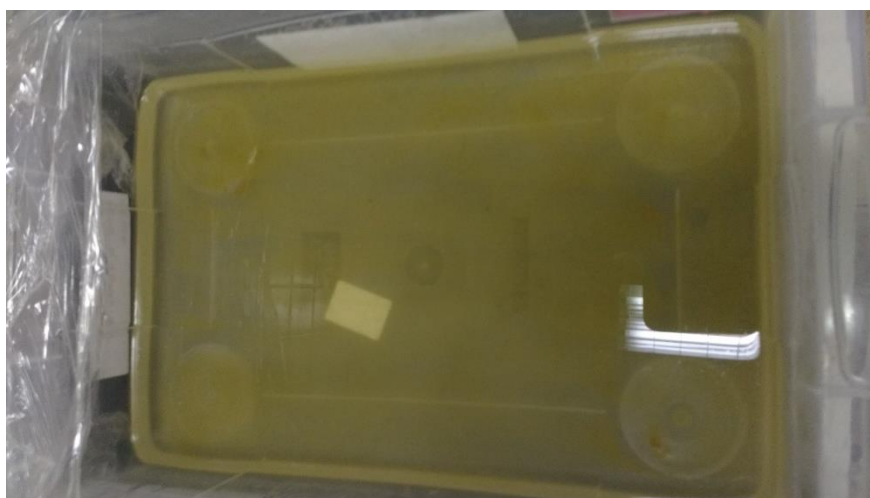


Figura 76. Solução em que estavam imersas as barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 14 dias de idade (Os autores, 2016).

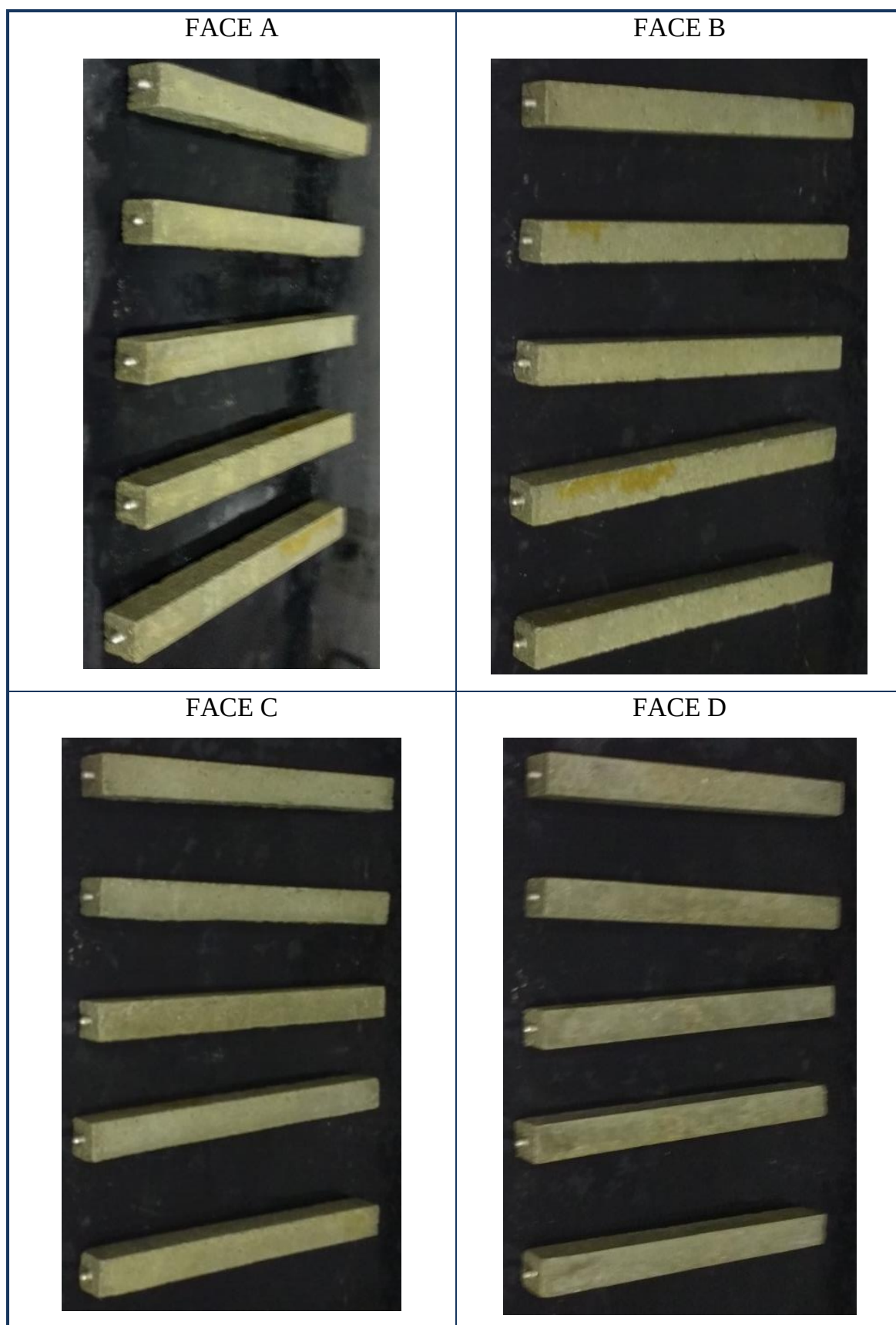


Figura 77. Barras moldadas com cimento CP IV-32 RS imersas em solução de ácido sulfúrico aos 44 dias de idade (Os autores, 2016).