



# COMPORTAMENTO DE PRODUTOS CIMENTÍCIOS SUBMETIDOS AO ATAQUE POR SULFATOS

**JOAO GUILHERME GIRONDA DE ALMEIDA ROSSI**

dezembro de 2016

# **COMPORTAMENTO DE PRODUTOS CIMENTÍCIOS SUBMETIDOS AO ATAQUE POR SULFATOS**

JOÃO GUILHERME GIRONDA DE ALMEIDA ROSSI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES**

Orientador: Carlos Filipe Guedes Rodrigues

Co-Orientador: Simão Prizskulnik (Universidade Presbiteriana Mackenzie – Brasil)

**SETEMBRO DE 2016**



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de Texto .....	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xix
Abreviaturas .....	xxiii
1      Introdução .....	1
2      Ação dos sulfatos sobre produtos cimentícios.....	5
3      Estudo experimental – Materiais e métodos .....	17
4      Resultados e discussão .....	39
5      Considerações finais.....	61
Referências Bibliográficas .....	63
Anexo I    Resultados dos ensaios realizados nos CP`s – Primeira campanha experimental .....	67
Anexo II    Resultado das análises no MEV.....	77
Anexo III    Resultado das análises no DRX – Primeira campanha experimental .....	89
Anexo IV    Materiais, resultados e discussão da segunda campanha experimental.....	121
Anexo V    Resultado dos ensaios realizados nos CP`s – Segunda campanha experimental .....	141
Anexo VI    Resultado das análises no DRX – Segunda campanha experimental.....	151



## RESUMO

A deterioração do concreto por agentes químicos ocorre da interação com ambientes agressivos. No caso dos sulfatos, podem ser originários do solo, das águas agrícolas, da indústria química, da decomposição da matéria orgânica, dos poços de mineração, de ambientes marinhos e das tubulações de esgoto. Os íons de sulfato, ao penetrarem no concreto, reagem com compostos hidratados do cimento e formam produtos expansivos como a etringita e gipsita. Estes produtos, ao se expandirem, causam a fissuração do concreto, permitindo a entrada de novos agentes químicos. Outras deteriorações sofridas são a perda de massa do concreto e a perda progressiva de sua resistência. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento de produtos cimentícios submetido ao ataque por sulfatos. Foram moldados corpos de prova de pasta de cimento, argamassa e concreto com três diferentes tipos de cimento (CPII-F-32, CPIII-40-RS e CPV-ARI-RS.). Após moldados os corpos de prova foram divididos em dois grupos: Grupo 1 – exposição somente à água (câmara úmida); Grupo 2 – exposição à solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a 5% à temperatura de 55°C. Para os corpos de prova de pasta de cimento foram medidos, de quatro em quatro dias, sua variação de massa e de comprimento. Os corpos de prova de argamassa foram avaliados quanto à variação de massa, resistência à flexão e à compressão, e os corpos de prova de concreto quanto a sua porosidade, módulo de elasticidade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e homogeneidade. Os ensaios foram realizados após 57 dias expostos à solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%. Em escala microscópica, foram analisados em um Difratorômetro de Raios-X (DRX) e em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para a verificação da formação de etringita e gipsita. Os resultados obtidos para todas as amostras foram muito similares, porém, para a análise no MEV, foi possível evidenciar a formação de cristais de etringita e gipsita. Como suas formações foram bem pontuais e escassas, devido ao período de tratamento no presente estudo, concluiu-se que, em pequenas quantidades, estes compostos não influenciariam as propriedades mecânicas dos corpos de prova.

**Palavras-chave:** Concreto; Ataque por Sulfatos; Etringita; Gipsita.



## ABSTRACT

The deterioration of concrete by chemical agents occurs with the interactions with an aggressive environments. In the case of sulfates, it may originate in the soil, agricultural water, chemical industry, the decomposition of organic matter, mining pits, marine environments and sewer pipes. When the sulphate ions penetrate the concrete, reacts with hydrated cement and forms expansive compounds like ettringite and gypsum. These products, as they expand, cause the concrete crack, that allows the entry of new chemical agents. Other deteriorations suffered by the concrete are the weight loss and the progressive loss of its resistance. The purpose of this study is to evaluate the behavior of cementitious products submitted to sulfate attack. Cement paste, mortar and concrete specimens were molded with three different types of cements. After molded, the specimens were divided into two groups: Group 1 – humid chamber curing; Groups 2 – exposure to sodium sulfate solution ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 5% at 55°C. The cement paste specimens were measured every four days to evaluate weight and length variation. Mortar specimens were evaluated for weight variation, bending strength and compression, and the concrete samples were measured as its porosity, elasticity modulus, compressive strength, splitting tensile strength and homogeneity. They were tested after 57 days exposed to the sulfate solution. On a microscopic scale, they were analyzed in a X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM) to verify the formation of ettringite and gypsum. The results for all the samples were very similar, but for SEM analysis it was possible to demonstrate the formation of ettringite and gypsum. As their formations were well off and scarce, due to the period treatment of this study, it was concluded that in small amounts these compound do not influence the mechanical proprieties of the specimens.

**Key-words:** Concrete; Sulfate attack; Ettringite; Gypsum.





## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, gratidão pelo acolhimento no Mestrado em Engenharia Civil, pelo conhecimento técnico-científico proporcionado; e aos professores, alunos e funcionários, pela atenção e integração ao longo da estadia acadêmica.

À Universidade Presbiteriana Mackenzie, que me proporcionou a oportunidade do conhecimento e crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao Professor Carlos Rodrigues do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela dedicação, paciência, apoio e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Simão Prizskulnik pela orientação em todas as fases deste trabalho. Muito obrigado pela disponibilidade, paciência e incentivo. Com a sua contribuição pude elaborar, desenvolver e concluir meu trabalho.

Aos técnicos José Carlos Sobrinho, José Maria da Silva e Lázaro de Castro, do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie, minha gratidão por todo auxílio e disponibilidade na realização dos experimentos.

Aos técnicos Abner Cabral Neto e Mauro Cardoso Alves, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, meu obrigado pelo tempo e ajuda disponibilizados na análise das amostras no Difrátômetro de Raios-X e no Microscópio Eletrônico de Varredura.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando.



# ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Motivação .....	1
1.3	Objetivos .....	2
1.3.1	Objetivo geral .....	2
1.3.2	Objetivos específicos .....	2
1.4	Estrutura do trabalho.....	2
2	Ação dos sulfatos sobre produtos cimentícios.....	5
2.1	Análise experimental do efeito do sulfato – Revisão Bibliográfica .....	5
2.2	Cimento.....	7
2.3	Água .....	7
2.4	Agregados .....	7
2.5	Origem dos íons sulfatos.....	8
2.6	Ataque por sulfatos.....	8
2.6.1	Hidróxido de Cálcio.....	8
2.6.2	Aluminato tricálcico.....	9
2.6.3	Etringita tardia .....	9
2.6.4	Taumasita .....	10
2.7	Tecnologia do concreto .....	10
2.7.1	Porosidade e permeabilidade.....	11
2.7.2	Concentração de sulfatos .....	12
2.7.3	Tipo de cimento.....	13

## ÍNDICE DE TEXTO

2.7.4	Influência do pH.....	15
2.7.5	Influência da temperatura .....	15
2.7.6	Sílica ativa .....	15
3	Estudo experimental – Materiais e métodos .....	17
3.1	Caracterização dos materiais .....	17
3.1.1	Cimento.....	17
3.1.2	Agregado miúdo .....	18
3.1.3	Agregado graúdo .....	20
3.1.4	Aditivos .....	21
3.2	Preparação dos corpos de prova .....	22
3.2.1	Dosagens da pasta de cimento, da argamassa e do concreto.....	22
3.2.2	Moldagem dos corpos de prova .....	24
3.2.3	Cura dos corpos de prova .....	26
3.3	Ataque pela solução de sulfatos .....	27
3.4	Ensaio .....	31
3.4.1	Abatimento (“slump test”) .....	31
3.4.2	Ultrassom.....	32
3.4.3	Absorção .....	33
3.4.4	Módulo de elasticidade .....	33
3.4.5	Resistência à flexão.....	34
3.4.6	Resistência à compressão axial.....	35
3.4.7	Resistência à tração por compressão diametral.....	36
3.4.8	Microscopia eletrônica de varredura .....	37
3.4.9	Difratometria de Raios-X .....	37
4	Resultados e discussão .....	39
4.1	Ensaio em Pasta de cimento.....	39
4.2	Ensaio em Argamassa .....	43

4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura e Difratomia de Raios-X .....	46
4.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	46
4.3.2	Difratomia de Raios-X .....	54
4.4	Ensaio em Concreto .....	56
4.5	Conclusões da campanha experimental .....	60
5	Considerações finais .....	61
5.1	Conclusões .....	61
5.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	62
	Referências Bibliográficas .....	63
Anexo I	Resultados dos ensaios realizados nos CP's – Primeira campanha experimental .....	67
Anexo II	Resultado das análises no MEV .....	77
Anexo III	Resultado das análises no DRX – Primeira campanha experimental .....	89
Anexo IV	Materiais, resultados e discussão da segunda campanha experimental .....	121
1	Materiais .....	121
2	Resultados e discussão .....	122
2.1	Ensaio em Pasta de cimento .....	123
2.2	Ensaio em Argamassa .....	134
2.3	Difratomia de Raios-X .....	140
Anexo V	Resultado dos ensaios realizados nos CP's – Segunda campanha experimental .....	141
Anexo VI	Resultado das análises no DRX – Segunda campanha experimental .....	151



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia. ....	10
Figura 2.2 Representação esquemática de materiais de porosidade similar. ....	12
Figura 2.3 Efeito do tipo e consumo de cimento sobre o ataque por sulfato ao concreto. ....	14
Figura 3.1 Curva granulométrica da areia média fina quartzosa. ....	19
Figura 3.2 Curva granulométrica da areia quartzosa rosa. ....	20
Figura 3.3 Curva granulométrica do agregado graúdo. ....	21
Figura 3.4 Argamassadeira utilizada para o preparo da pasta de cimento e da argamassa.....	22
Figura 3.5 Mistura dos materiais na betoneira estacionária de eixo inclinado. ....	25
Figura 3.6 Corpos de prova de concreto sendo moldados e vibrados.....	25
Figura 3.7 Corpos de prova cobertos para evitar a evaporação da água de hidratação. ....	26
Figura 3.8 Corpos de prova embrulhados em papel filme.....	27
Figura 3.9 Corpos de prova sendo pesados na balança da Gehaka, modelo BK5002 classe II. ....	27
Figura 3.10 Corpos de prova em câmara úmida. ....	27
Figura 3.11 Caixa de água onde os corpos de prova foram submetidos à cura térmica. ....	30
Figura 3.12 Corpos de prova submetidos à cura térmica em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	30
Figura 3.13 Moldagem do tronco de cone para a realização do ensaio de consistência.....	32
Figura 3.14 Medição do índice de consistência. ....	32
Figura 3.15 Retificadora utilizada no presente estudo. ....	32
Figura 3.16 Ensaio de ultrassom nos corpos de prova de concreto.....	33
Figura 3.17 Ensaio para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto. ....	34
Figura 3.18 Detalhe dos extensômetros fixados juntos ao CP.....	34
Figura 3.19 Detalhe do corpo de prova de argamassa na prensa para o ensaio. ....	35



Figura 3.20 Detalhe da montagem para o ensaio. ....	36
Figura 3.21 Corpos de prova de concreto sendo ensaiados à tração por compressão diametral. ....	36
Figura 3.22 Microscópio Eletrônico de Varredura da Jeol, modelo JSM-6510. ....	37
Figura 3.23 Aparelho Sputter Coater SCD 050 da Baltec. ....	37
Figura 3.24 Aparelho de DRX da Rigaku, modelo MiniFlex II. ....	38
Figura 3.25 Detalhe da amostra preparada para o ensaio no DRX. ....	38
Figura 4.1 Variação de massa nos CP`s de pasta de cimento. ....	41
Figura 4.2 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento. ....	42
Figura 4.3 Variação de comprimento nos CP`s 1, 12 e 14 de pasta de cimento. ....	42
Figura 4.4 Variação de massa nos CP`s de argamassa. ....	44
Figura 4.5 (a) Micrografia da amostra de argamassa CII-F-32, cura: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , aumento 1000x; (b) análise EDS; (c) detalhe dos cristais de formato acícula, aumento 5000x. ....	47
Figura 4.6 Micrografia da amostra de argamassa CII-F-32, cura: câmara úmida, aumento 50x. ....	48
Figura 4.7 (a) Micrografia da amostra de argamassa CII-F-32, cura: câmara úmida, aumento 250x; (b) análise EDS; (c) correspondência das cores com o elemento químico, da análise EDS. ....	49
Figura 4.8 (a) Micrografia da amostra de argamassa CIII-40-RS, cura: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , aumento 250x; (b) análise EDS; (c) correspondência das cores com o elemento químico, da análise EDS. ....	50
Figura 4.9 Detalhe da Figura 4.8 (a), aumento 500x. ....	51
Figura 4.10 Micrografia da amostra de argamassa CIII-40-RS, cura: câmara úmida, aumento 50x. ....	51
Figura 4.11 Micrografia da amostra de argamassa CIII-40-RS, cura: câmara úmida, aumento 1000x. ...	52
Figura 4.12 Micrografia da amostra de argamassa CPV-ARI-RS, cura: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , aumento 1000x. ....	52
Figura 4.13 Detalhe da Figura 4.12, aumento 2500x. ....	53
Figura 4.14 Micrografia da amostra de pasta de cimento CII-F-32. ....	54
Figura II.1 Micrografia dos CP`s de argamassa moldados com CII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	78
Figura II.2 Micrografia dos CP`s de argamassa moldados com CII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O. ....	79
Figura II.3 Micrografia dos CP`s de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	81
Figura II.4 Micrografia dos CP`s de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	82
Figura II.5 Micrografia dos CP`s de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	84

Figura II.6 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H <sub>2</sub> O.....	85
Figura II.7 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	86
Figura II.8 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O.....	87
Figura II.9 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ..	88
Figura II.10 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	88
Figura III.1 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%..	90
Figura III.2 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O. ....	92
Figura III.3 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. .....	94
Figura III.4 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	96
Figura III.5 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. .....	98
Figura III.6 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	100
Figura III.7 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	102
Figura III.8 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O. ....	105
Figura III.9 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	108
Figura III.10 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em H <sub>2</sub> O.....	111
Figura III.11 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	114
Figura III.12 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	117
Figura IV.1 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..	125
Figura IV.2 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em H <sub>2</sub> O. ....	125
Figura IV.3 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CIII-40-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..	126
Figura IV.4 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CIII-40-RS em H <sub>2</sub> O. ....	126
Figura IV.5 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	127
Figura IV.6 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em H <sub>2</sub> O. ....	127
Figura IV.7 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CIV-32-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..	128
Figura IV.8 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CIV-32-RS em H <sub>2</sub> O. ....	128

Figura IV.9 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CPE-32 R em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . .....	129
Figura IV.10 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CPE-32 R em H <sub>2</sub> O. ....	129
Figura IV.11 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CP-40-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . .....	130
Figura IV.12 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CP-40-RS em H <sub>2</sub> O. ....	130
Figura IV.13 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . .....	131
Figura IV.14 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em H <sub>2</sub> O. ....	131
Figura IV.15 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CP-32-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . .....	132
Figura IV.16 Variação de comprimento nos CP`s de pasta de cimento para CP-32-RS em H <sub>2</sub> O. ....	132
Figura IV.17 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CPE-32 em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	135
Figura IV.18 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CPE-32 em H <sub>2</sub> O. ....	135
Figura IV.19 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CP-40-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	136
Figura IV.20 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CP-40-RS em H <sub>2</sub> O. ....	136
Figura IV.21 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CPV-ARI-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	137
Figura IV.22 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CPV-ARI-RS em H <sub>2</sub> O. ....	137
Figura IV.23 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CP-32-RS em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	138
Figura IV.24 Variação de massa nos CP`s de argamassa para CP-32-RS em H <sub>2</sub> O. ....	138
Figura VI.1 Espectro dos CP`s de argamassa moldados com CPE-32 R, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	152
Figura VI.2 Espectro dos CP`s de argamassa moldados com CP-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	154
Figura VI.3 Espectro dos CP`s de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	156
Figura VI.4 Espectro dos CP`s de argamassa moldados com CP-32-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	158

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Fatores que influenciam no ataque químico do concreto.....	11
Tabela 2.2 Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos. ....	13
Tabela 2.3 Requisitos para concreto submetidos a ataque por sulfatos. ....	13
Tabela 3.1 Composição química dos cimentos utilizados no estudo.....	18
Tabela 3.2 Granulometria dos agregados miúdos. ....	18
Tabela 3.3 Características dos agregados miúdos. ....	19
Tabela 3.4 Granulometria do agregado graúdo. ....	20
Tabela 3.5 Características do agregado graúdo. ....	21
Tabela 3.6 Quantificação do traço da pasta de cimento.....	23
Tabela 3.7 Quantificação do traço de argamassa. ....	23
Tabela 3.8 Quantificação do traço de concreto. ....	24
Tabela 3.9 Dimensões dos CP`s. ....	26
Tabela 3.10 Concentração de sulfatos utilizadas por diferentes autores. ....	29
Tabela 3.11 Ensaio realizados nos CP`s. ....	31
Tabela 4.1 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de massa dos CP`s de pasta de cimento. ....	40
Tabela 4.2 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de comprimento dos CP`s de pasta de cimento.....	41
Tabela 4.3 Expansão dos CP`s de pasta de cimento expostos a solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5% aos 43 dias. ....	43
Tabela 4.4 Resultados obtidos para a variação de massa dos CP`s de argamassa. ....	44
Tabela 4.5 Resistência à flexão (em MPa) dos CP`s de argamassa. ....	45
Tabela 4.6 Resistência à compressão (em MPa) dos CP`s de argamassa. ....	45

Tabela 4.7 Principais picos obtidos na literatura para etringita e gipsita. ....	54
Tabela 4.8 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de pasta de cimento. ....	55
Tabela 4.9 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de argamassa. ....	55
Tabela 4.10 Contagem por segundo dos picos de gipsita nas amostras de argamassa. ....	56
Tabela 4.11 Média dos resultados para o módulo de elasticidade dinâmico do concreto obtidos do ensaio de ultrassom. ....	57
Tabela 4.12 Média dos resultados para o módulo de elasticidade do concreto obtidos do ensaio de carga e descarga. ....	58
Tabela 4.13 Média dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão axial (em MPa). ....	58
Tabela 4.14 Média dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão por tração diametral (em MPa). ....	59
Tabela 4.15 Média dos resultados para o ensaio de absorção do CP's de concreto (em %). ....	60
Tabela I.1 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa. ....	67
Tabela I.2 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão... ..	68
Tabela I.3 Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto. ....	69
Tabela I.4 Resultado do ensaio de absorção dos corpos de prova de concreto. ....	70
Tabela I.5 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPII-F-32). ....	71
Tabela I.6 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPIII-40-RS). ....	72
Tabela I.7 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPV-ARI-RS). ....	73
Tabela I.8 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPII-F-32). ....	74
Tabela I.9 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPIII-40-RS). ....	75
Tabela I.10 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPV-ARI-RS). ....	76
Tabela III.1 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	91
Tabela III.2 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O. ....	93
Tabela III.3 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	95

Tabela III.4 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	97
Tabela III.5 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	99
Tabela III.6 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	101
Tabela III.7 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	103
Tabela III.8 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em H <sub>2</sub> O. ....	106
Tabela III.9 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%. ....	109
Tabela III.10 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	112
Tabela III.11 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	115
Tabela III.12 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H <sub>2</sub> O. ....	118
Tabela IV.1 Composição química dos cimentos utilizados no segundo estudo. ....	121
Tabela IV.2 Quantificação do traço de argamassa do segundo estudo. ....	122
Tabela IV.3 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de massa dos CP's de pasta de cimento. ....	123
Tabela IV.4 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de comprimento dos CP's de pasta de cimento.....	124
Tabela IV.5 Expansão dos CP's de pasta de cimento expostos a solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5% aos 42 dias. ....	133
Tabela IV.6 Resultados obtidos para a variação de massa dos CP's de argamassa. ....	134
Tabela IV.7 Resistência à flexão (em MPa) dos CP's de argamassa. ....	139
Tabela IV.8 Resistência à compressão (em MPa) dos CP's de argamassa. ....	139
Tabela IV.9 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de pasta de cimento.....	140
Tabela IV.10 Contagem por segundo dos picos de gipsita nas amostras de pasta de cimento.....	140

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela V.1 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CPE-32 R.....	142
Tabela V.2 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CP-40-RS.....	143
Tabela V.3 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CPV-ARI-RS.....	144
Tabela V.4 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CP-32-RS.....	145
Tabela V.5 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CPE-32 R.....	146
Tabela V.6 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CP-40-RS.....	147
Tabela V.7 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CPV-ARI-RS.....	148
Tabela V.8 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CP-32-RS.....	149
Tabela VI.1 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPE-32 R, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	153
Tabela VI.2 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CP-40-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	155
Tabela VI.3 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	157
Tabela VI.4 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CP-32-RS, curados em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 5%.....	159

## ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a/c	Relação água/cimento
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> A·3CaSO <sub>4</sub>	Sulfoaluminato de cálcio – Etringita
Ca	Cálcio
Ca <sup>2+</sup>	Íon cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CaSiO <sub>3</sub> ·CaCO <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub> ·15H <sub>2</sub> O	Taumasita
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Sulfato de cálcio di-hidratado - Gipsita
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono – Gás carbônico
CP`s	Corpos de prova
CPII-E-32 R	Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno
CPII-F-32	Cimento Portland composto com filer
CPIII-40-RS	Cimento Portland de Alto-Forno
CPIV-32-RS	Cimento Portland pozolânico
CPV-ARI-RS	Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial Resistente a Sulfatos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado



## ABREVIATURAS

d	Dias
DRX	Difratometria de Raios-X
EDS	<i>Energy dispersive x-ray detector</i> (Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X)
fck	Resistência característica do concreto à compressão
h	Horas
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
kg	Quilograma
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
min	Minuto
mg	Miligrama
Mg(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de magnésio
MPa	Mega Pascal
MgSO <sub>4</sub>	Sulfato de magnésio
NaCl	Cloreto de sódio
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Parte por milhão
S	Enxofre
Si	Silício
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
SO <sub>4</sub>	Sulfato
UR	Umidade relativa
°C	Graus Celsius

%

Porcentagem



# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 ENQUADRAMENTO**

O concreto é composto pela mistura de cimento Portland com areia, brita e água. Nos últimos 50 anos, seu uso cresceu significativamente, sendo atualmente o material mais consumido pela construção civil (Neville e Brooks, 2013).

Este crescimento no uso do concreto pode ser associado a três principais vantagens do material: primeira, pela excelente resistência à água; segunda, pela facilidade de obter peças de diferentes formatos e tamanhos e por fim pelo seu baixo custo e facilidade de obtenção dos materiais que o compõem (Mehta e Monteiro, 2014).

Mas com esse exacerbado uso, os cuidados para com a qualidade do concreto nem sempre foram devidamente cuidados e assim, existem diversos fatores que estão afetando a durabilidade de uma estrutura de concreto, como: dimensionamento da estrutura, materiais utilizados, execução, realização da cura e ação de agentes externos. Esta deterioração por agentes externos pode ser causada de forma física, química ou biológica.

O ataque químico pode ocorrer por diferentes agentes, de entre eles: ar, água, ácidos, sais e sulfatos (Souza e Ripper, 2001). O sulfato, em especial, agride a estrutura causando fissuras e perda de massa e, assim, causa uma perda progressiva de resistência da estrutura de concreto (Andrade e Silva, 2005; Mehta e Monteiro, 2014).

## **1.2 MOTIVAÇÃO**

De acordo com Mehta (1993) citado por Silveira (1996) um dos principais efeitos de deterioração do concreto são os ataques químicos decorrentes da interação com ambientes agressivos, o qual inclui o ataque por sulfatos. Este ataque ocorre pelo transporte de íons por difusão “devido aos gradientes internos de umidade e temperatura e pela osmose” (Neville e Brooks, 2013, p. 256) e, ao reagirem com determinados compostos hidratados do cimento produzem produtos expansivos como a etringita e gipsita. Ao expandirem, estes produtos fissuram o concreto e permitem a entrada de novos agentes

agressivos (Linhares, 2010). Outras manifestações deletérias do ataque por sulfatos são a perda de massa e a perda progressiva de resistência do concreto.

Sendo assim, este trabalho pretende comprovar que a exposição do concreto a íons sulfato influencia as suas propriedades.

### **1.3 OBJETIVOS**

O presente trabalho é orientado pelos seguintes objetivos:

#### **1.3.1 Objetivo geral**

- Analisar o comportamento dos produtos cimentícios submetido ao ataque de sulfato.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Identificar as formas de manifestações deletérias do íon sulfato.
- Verificar a influência das variáveis – tipo de cimento e íons sulfato – no comportamento do concreto, argamassa e pasta de cimento.
- Apontar os impactos dos danos causados.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a Introdução, que é composta pelos seguintes itens: texto de conceituação e caracterização do tema; Objetivos; Justificativa; e Metodologia.

O Capítulo 2 retrata uma Revisão da Literatura sobre a exposição do concreto em meio agressivo pelo ataque por sulfatos contemplando os efeitos, causas e formas de manifestação, como também os fatores e propriedades dos materiais que podem influenciar a intensidade do ataque e sua propagação.

O Capítulo 3 expõe todo o estudo experimental desenvolvido no trabalho, como a composição do concreto; preparação da solução de sulfato; simulação do ataque por sulfatos através da imersão dos corpos de prova em solução de sulfato de sódio; e os ensaios realizados: ultrassom, dureza superficial, absorção, módulo de elasticidade, resistência à compressão axial, resistência à tração diametral, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios x.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos no trabalho experimental, em conjunto com a comparação aos diferentes tipos de cimento.

O Capítulo 5 relata as conclusões do trabalho e indica algumas recomendações, tanto para pesquisas futuras como para seu uso no âmbito da engenharia civil.



## 2 AÇÃO DOS SULFATOS SOBRE PRODUTOS CIMENTÍCIOS

### 2.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DO SULFATO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na China, Liu *et. al.* (2011) analisaram a resistência dinâmica de CP`s submetidos ao ataque por sulfatos. Após 28 dias sendo curados em câmara úmida, as amostras foram divididas em dois grupos: o grupo controle e o submetido ao ataque por sulfatos. O grupo submetido ao ataque, passou por ciclos de secagem e molhagem durante 120 dias (3h a  $35\pm 1^\circ\text{C}$  e 100% de umidade relativa (UR) com solução de 10% de sulfato em massa e 3h a  $45^\circ\text{C}$  e UR=0%). Os resultados obtidos evidenciaram que os CP`s submetidos ao ataque por sulfatos tendem a ter seu módulo de elasticidade, resistência à compressão e energia de absorção reduzidas se comparados aos do grupo controle.

Ainda na China Zhang *et. al.* (2013) ensaiaram CP`s submetidos a cinco diferentes concentrações de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0, 3 e 5%) e NaCl (6 e 10%). Após a moldagem e cura de 28 dias a  $20^\circ\text{C}$  e UR=95%, os CP`s foram submetidos ao ataque pelas soluções de sulfatos. Os ciclos se faziam da seguinte maneira: um dia submerso na solução, posteriormente eram retirados e medida sua expansão e então eram colocados em um forno a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  por 20min e resfriados por 10h. Depois da secagem eram colocados novamente na solução e esse processo se repetiu por 54 dias. Os autores concluíram que os ciclos de secagem e molhagem aceleram a penetração dos íons nas amostras, mas a presença do íon cloreto reduz o ataque por sulfatos, o qual é muito danoso ao concreto. Evidenciaram também que quanto maior a relação a/c, maior a expansão dos CP`s.

Na Grécia, Skaropoulou *et. al.* (2013) analisaram CP`s submetidos ao ataque por solução de  $\text{MgSO}_4$  1,8% a temperaturas de 5 e  $25^\circ\text{C}$ . As amostras, após desmoldadas, foram submersas em água por seis dias. Após esse período foram curadas ao ar a uma temperatura de  $(25\pm 2)^\circ\text{C}$  e UR=60%. Por fim, foram submersos em solução de sulfato de magnésio por três anos. Após esse período, os autores analisaram a perda de massa, a resistência à compressão e a velocidade de propagação de um pulso ultrassônico. Os resultados para as amostras curadas a baixa temperatura mostraram que a coesão entre a areia e a pasta de cimento tem um efeito benéfico para a performance do concreto, enquanto para as amostras curadas a  $25^\circ\text{C}$  não foi observado nenhum dano.

Na Bélgica, Maes e Belie (2014), analisaram a resistência do concreto submetido ao ataque de cloretos e sulfatos, utilizando quatro diferentes tipos de cimento: Portland comum, resistente a sulfato, 50% e 70%



de adição de escoria de alto forno. Utilizando uma relação a/c de 0,45 e consumo de cimento de  $350\text{kg/m}^3$ , os CP's foram moldados e deixados por 28 dias a  $20^\circ\text{C}$  e UR=95% antes de serem submetidos ao ataque pelos íons cloreto e sulfeto. Após 28 e 84 dias de exposição, as amostras foram testadas a difusão de cloretos, perda de massa e variação de comprimento. Os autores concluíram que a presença de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aumenta a penetração de cloretos no concreto com cimento Portland comum. Já no concreto resistente a sulfato a taxa de penetração do íon é constante ou decresce ao longo do tempo. Também evidenciaram que a presença de cloretos retarda a deterioração do concreto pelos sulfatos.

No Canada, Nehdi *et. al.* (2014) analisaram a exposição parcial do concreto submetido ao ataque por  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Os CP's moldados foram divididos em dois grupos: o primeiro foi submetido ao ataque por sulfatos após 24h da desmoldagem e o segundo após permanecer 28 dias em câmara úmida ( $20^\circ\text{C}$  e UR=95%). O grupo submetido ao ataque por sulfato permaneceu uma semana a  $20^\circ\text{C}$  e UR=82% e uma semana a  $40^\circ\text{C}$  e UR=31%. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que quanto menor a relação a/c e maior o tempo de cura em câmara úmida, menor serão os danos aos CP's devido ao ataque por sulfatos.

Na Espanha, Genovés *et. al.* (2015) analisaram o ataque do concreto por  $\text{SO}_3$  a curto prazo, para isso, moldaram CP's com adição de  $\text{SO}_3$  3%. As amostras submetidas a adição apresentaram um aumento expressivo de suas dimensões em um curto período devido a rápida formação de etringita.

Num estudo mais recente, realizado na Turquia, Athahan e Arslan (2016), avaliaram o ataque externo de sulfatos no concreto. Para isso, moldaram CP's com diferentes tipos e concentrações de aditivos minerais: nanosílica, microsílica, cinzas volantes e escória granulada de alto forno. Todos os CPs foram submetidos a uma solução de sulfato de sódio 5% por um período de 3 anos. Após esse período os CP's apresentaram degradações significativas. Se considerar somente a expansão sofrida pelas amostras, a microsílica foi a mais benéfica para o concreto. Os testes realizados evidenciaram que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  inicialmente em altas concentrações, após o período de exposição apresentou um decréscimo, evidenciando a reação pozolânica, em que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reage com o sulfato formando o produto expansivo – a gipsita.

Ainda na Turquia, Tanyildizi (2016), analisou os efeitos das diferentes concentrações de sulfeto de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ) em argamassa leve. As amostras foram mantidas em temperatura de  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  por 28 dias e em 3 diferentes concentrações de  $\text{MgSO}_4$ : 0, 2 e 4%. Os resultados evidenciaram que os mecanismos de deterioração variam de acordo com a concentração da solução de sulfato. Os valores obtidos para os resultados da resistência à compressão foram maiores para as amostras contendo sílica ativa. A maior concentração de gipsita e calcita foram encontradas nas amostras contendo 2% de concentração de sulfatos.

## 2.2 CIMENTO

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais utilizado para a preparação do concreto e é composto principalmente por calcário, sílica, alumina e óxido de ferro (Coutinho, 1997; Neville e Brooks, 2013). Sua preparação consiste na mistura em pó desses componentes e posterior aquecimento em forno rotativo a 1400°C, que resulta no *clínquer*. Após seu resfriamento, o *clínquer* recebe uma quantidade de gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), sendo moído e por fim tem-se o cimento Portland (Coutinho, 1997; Neville e Brooks, 2013).

## 2.3 ÁGUA

A qualidade da água utilizada para o preparo do concreto é de suma importância para a durabilidade e resistência do mesmo, pois o uso de águas impróprias pode interferir na pega do cimento, afetar negativamente a resistência do concreto ou causar manchas superficiais no mesmo e podendo ainda levar à corrosão da armadura (Neville e Brooks, 2013).

Segundo a ABNT NBR 15900/2009 a água utilizada para o preparo do concreto deve atender alguns parâmetros: pH deve variar entre 5,80 a 8,00 e o limite de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) é de 2000 mg por litro de água (ppm).

## 2.4 AGREGADOS

Os agregados afetam diretamente a resistência, durabilidade e desempenho estrutural do concreto, então a sua qualidade é muito importante, além de 75% do volume de concreto ser composto pelos agregados (Neville e Brooks, 2013).

A presença de cloretos e sulfatos nos agregados tem que ser determinada e seus teores conhecidos, pois essas impurezas podem levar a corrosão da armadura e também ao ataque por sulfatos no concreto (Neville e Brooks, 2013).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), agregados contaminados com sulfatos solúveis, como o sulfato de magnésio, de sódio ou de potássio, favorecem o ataque por sulfato. Estes sulfetos e sulfatos estão presentes nos agregados de rochas carbonáticas e folhelhos na forma de gipsita e anidrita (sulfato de cálcio anidro) e assim, aumentam a possibilidade de ataque interno por sulfato no concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

A ABNT NBR 7211/2009 determina limites de íons sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) presentes nos agregados como sendo inferiores a 0,1%. Caso o agregado exceda o limite da norma, a própria permite o uso do concreto em que o teor de sulfatos, contando todos os seus componentes (água, agregados, cimentos, adições e aditivos

químicos), não exceda 0,2% ou caso utilize cimento Portland resistente a sulfatos, conforme a ABNT NBR 5737/1992.

## 2.5 ORIGEM DOS ÍONS SULFATOS

Os sulfatos podem ter diversas origens, como as águas subterrâneas sendo fonte de sulfatos de magnésio, sódio e potássio. O sulfato de amônia está presente em solos e águas agrícolas. O ácido sulfúrico é proveniente de efluentes de fornos e da indústria química ou também é sintetizado a partir do gás  $H_2S$  resultante da decomposição da matéria orgânica presente em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubulação de esgoto (ACI 201.2R-22/2009; Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) ainda afirmam que os solos também contêm sulfato na forma de gipsita  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (normalmente de 0,01 a 0,05% expresso como  $SO_4$ ), mas essa concentração é inofensiva para o concreto.

A água do mar também é uma fonte de sulfatos e pode atacar o concreto, mas não causam a expansão do mesmo, pois na presença de cloretos, a gipsita e a etringita são mais solúveis. Assim, elas podem ser lixiviadas com maior facilidade pela água do mar, não havendo a degradação do concreto, apenas uma diminuição da resistência devido ao aumento da porosidade (Neville e Brooks, 2013). Ainda segundo Neville e Brooks (2013), na zona de variação de maré, o ataque pela água do mar pode ser retardado pelo bloqueio dos poros pelo hidróxido de magnésio juntamente com a gipsita, resultante da reação do sulfato de magnésio com o hidróxido de cálcio.

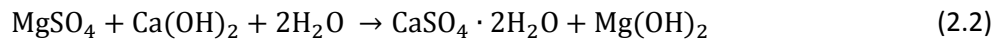
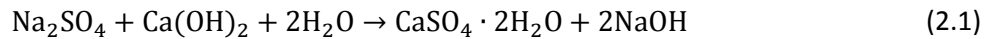
## 2.6 ATAQUE POR SULFATOS

O ataque pelos sulfatos pode ser de forma extrínseca e/ou intrínseca. Na primeira o concreto pode apresentar perda de massa e de resistência (Mehta e Monteiro, 2014). Já no ataque intrínseco, a pasta de cimento é atacada pelos sulfatos em solução resultando em produtos expansivos que causam a fissuração do concreto (Coutinho, 1997; Neville, 1997; Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014). Assim, são dois os principais materiais componentes do cimento responsáveis pelo ataque por sulfatos: o hidróxido de cálcio –  $Ca(OH)_2$  e o aluminato tricálcico –  $C_3A$ .

### 2.6.1 Hidróxido de Cálcio

O  $Ca(OH)_2$  presente no cimento Portland, ao reagir com sulfatos produz a gipsita/gesso. A gipsita é um produto expansivo e assim causa a ruptura do concreto endurecido (Neville e Brooks, 2013).

As reações (2.1) e (2.2) mostram a reação do  $\text{Ca(OH)}_2$  com o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e com o sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ). As duas reações produzem a gipsita, mas o produto resultante da reação com o sulfato de magnésio, o hidróxido de magnésio ou brucita –  $\text{Mg(OH)}_2$ , é mais severo do que os outros produtos, pois este é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema (Mehta e Monteiro, 2014) e ainda “leva a decomposição dos silicatos de cálcio hidratados, bem como do  $\text{Ca(OH)}_2$  e do  $\text{C}_3\text{A}$  hidratado” (Neville e Brooks, 2013, p. 260).

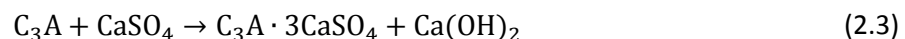


### 2.6.2 Aluminato tricálcico

O aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) é um dos principais componentes do cimento Portland (aproximadamente 10,8%), mas em nada contribui para a resistência do cimento, seu papel é facilitar a combinação do óxido de cálcio com a sílica (Neville e Brooks, 2013).

Esse material é o principal responsável pelo ataque por sulfatos, pois ao combinar-se com sulfatos, produz a etringita (sulfoaluminato de cálcio –  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4$ ), que é um produto expansivo que causa a fissuração do concreto (Coutinho, 1997; Neville, 1997; BAUER, 2011; Neville e Brooks, 2013; ehta e Monteiro, 2014; Rahman e Bassuoni, 2014).

A reação (2.3) (Romano e Brito, 2012) mostra a formação da etringita a partir da reação do  $\text{C}_3\text{A}$  com o  $\text{CaSO}_4$ .



### 2.6.3 Etringita tardia

A formação da etringita tardia ocorre quando a fonte de sulfatos é interna e ela se dá no concreto endurecido (Neville, 1997; Bauer, 2011; Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014). Sua origem se deve a agregados contaminados com gipsita ou cimentos com teores elevados de sulfato. Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2014) afirmam que seu aparecimento se dá após uma cura ou concretagens com temperaturas superiores a  $60^\circ\text{C}$ , mas segundo Collepardi (1999) citado por Mehta e Monteiro (2014) a formação da etringita tardia não se deve somente à temperatura, mas também a outros fatores, como expressos na Figura 2.1.



Figura 2.1 Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia.

Fonte: Mehta e Monteiro, 2014, p. 169.

#### 2.6.4 Taumasita

A taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) é outro produto proveniente do ataque por sulfatos, mas esse tem a peculiaridade de ocorrer em temperaturas menores que  $15^\circ\text{C}$  (Neville e Brooks, 2013 e Rahman e Bassuoni, 2014). Ainda segundo Rahman e Bassuoni (2014), a taumasita pode se formar por um processo direto ou indireto. No primeiro a taumasita reage com o C-S-H e o  $\text{Ca}^{2+}$ , já no processo indireto a etringita atua como um precursor para a formação da taumasita.

Para combater a formação da taumasita, o uso de cimento Portland com baixo teor de  $\text{C}_3\text{A}$  não é eficaz, mas podemos reduzir a sua formação com o uso de aditivos superplastificantes para obter uma relação a/c menor e pela utilização de cimentos compostos para reduzir a permeabilidade do concreto (Neville e Brooks, 2013).

### 2.7 TECNOLOGIA DO CONCRETO

Esta seção trata sobre algumas características que influenciam o ataque por sulfatos no concreto, como a porosidade e permeabilidade, a concentração de sulfatos, tipo de cimento, a influência do pH e da temperatura.

De acordo com ACI 201.2R-23/2009 existem diversos fatores que podem influenciar o ataque químico do concreto, estes são expressos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Fatores que influenciam no ataque químico do concreto.

Fatores que aceleram ou agravam o ataque	Fatores que mitigam ou atrasam o ataque
1. Alta porosidade devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta absorção de água;</li> <li>• Permeabilidade;</li> <li>• Vazios.</li> </ul>	1. Concreto denso obtido pela: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporção adequada na mistura;</li> <li>• Redução do teor de água na mistura;</li> <li>• Aumento de material cimentício;</li> <li>• Introdução de ar;</li> <li>• Adequado processo de adensamento;</li> <li>• Cura eficaz.</li> </ul>
2. Fissuras devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração de tensões;</li> <li>• Choques térmicos.</li> </ul>	2. Redução da tensão de tração no concreto obtida pela: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilização adequada reforço à tração e posicionamento adequado;</li> <li>• Inclusão de pozolana (para reduzir o aumento de temperatura);</li> <li>• Utilização adequada de juntas de contração.</li> </ul>
3. Lixiviação e penetração de líquidos devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Passagem de líquidos;</li> <li>• Empoçamento;</li> <li>• Pressão hidráulica.</li> </ul>	3. Design estrutural: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para minimizar a área de contato e turbulência;</li> <li>• Utilização de membranas e sistemas de barreiras protetoras para reduzir a penetração.</li> </ul>

Fonte: ACI 201.2R-23/2009.

### 2.7.1 Porosidade e permeabilidade

A definição de porosidade é o volume total de vazios no interior do concreto (Neville e Brooks, 2013). Já permeabilidade é a capacidade de um determinado material ser atravessado pelos gases e líquidos (Coutinho, 1997; Neville e Brooks, 2013). Essas duas características influenciam na durabilidade do concreto.

Um concreto poroso não é necessariamente um concreto permeável, esta afirmação se confirma pela fala de Neville e Brooks (2013, p. 257) que dizem que “é possível que dois corpos porosos tenham porosidades semelhantes, mas permeabilidades diferentes”. A Figura 2.2 mostra a representação esquemática de materiais de porosidade similar: (a) alta permeabilidade – poros capilares interconectados por grandes

aberturas e (b) baixa permeabilidade – poros capilares segmentados e apenas parcialmente conectados (Neville e Brooks, 2013).

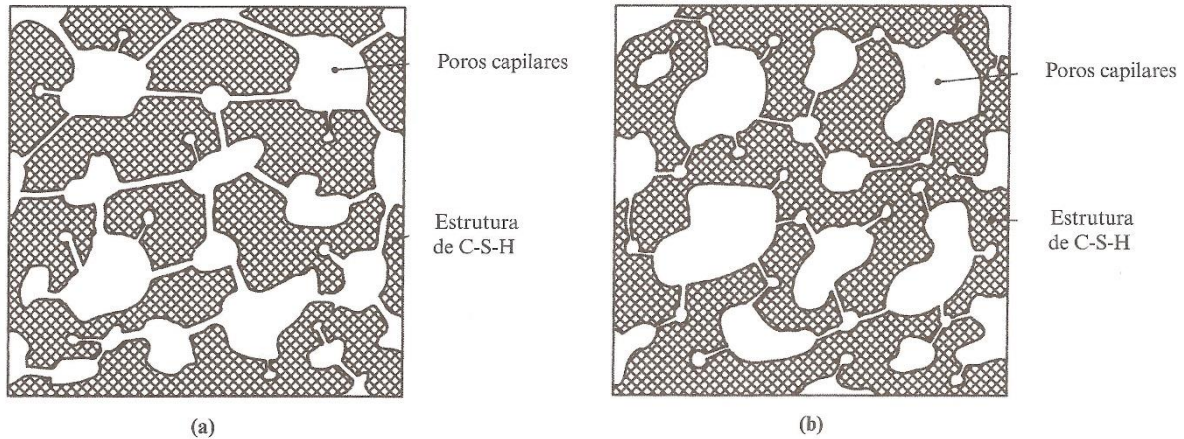


Figura 2.2 Representação esquemática de materiais de porosidade similar.

Fonte: Neville e Brooks, 2013, p. 261.

Neste estudo, a porosidade e permeabilidade se fez de grande importância, pois o ataque do concreto pelos sulfatos é favorecido pelo ingresso de agentes agressivos no concreto, então quanto mais poroso e permeável o concreto, maior serão os danos sofridos.

### 2.7.2 Concentração de sulfatos

O ataque por sulfatos depende da permeabilidade do concreto e da concentração de sulfatos. Se o concreto for muito permeável haverá a lixiviação do  $\text{Ca(OH)}_2$  que ao chegar na superfície do concreto e reagirá com o  $\text{CO}_2$  do ar formando o  $\text{CaCO}_3$ , um precipitado esbranquiçado, conhecido como eflorescência. Esse fenômeno não é prejudicial, porém a lixiviação do  $\text{Ca(OH)}_2$  aumentará a porosidade do concreto deixando-o mais susceptível ao ataque por sulfatos (Neville e Brooks, 2013).

A ABNT NBR 12655/2015 estabelece requisitos para concretos expostos a ataques por sulfatos, definindo classes de agressividades e concentrações para as mesmas (Tabela 2.2). No ACI 201.2R-24/2009 a classificação é um pouco diferente, além de apresentar uma classe de agressividade a mais (Tabela 2.3).

Tabela 2.2 Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo, % em massa	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente na água, ppm	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo f <sub>ck</sub> (para concreto com agregado normal e leve), MPa
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

Fonte: ABNT NBR 12655/2015.

Tabela 2.3 Requisitos para concreto submetidos a ataque por sulfatos.

Severidade do potencial de exposição	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo, % em massa	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente na água, ppm	Máxima relação a/c, em massa	Mínimo f <sub>ck</sub> (para concreto com agregado normal e leve), MPa
Classe de exposição 0	0,00 a 0,10	0 a 150	sem especificação	---
Classe de exposição 1	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	27,58
Classe de exposição 2	0,20 a 2,00	1500 a 10000	0,45	31,03
Classe de exposição 3	acima de 2,00	acima de 10000	0,40	31,03

Fonte: ACI 201.2R-24/2009.

### 2.7.3 Tipo de cimento

O tipo de cimento tem um certo grau de influência em relação ao ataque por sulfatos. De acordo com Neville (1997), para evitar a formação do produto expansivo etringita pode-se utilizar cimentos com uma quantidade limitada de C<sub>3</sub>A ou até mesmo reduzir a quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> na pasta de cimento hidratado utilizando cimentos compostos com escória de alto forno (teor de alumina) ou pozolanas. O autor ainda diz que:

“o efeito da pozolana é duplo. Primeiro, reage com o Ca(OH)<sub>2</sub> não o deixando mais disponível para a reação com os sulfatos. Segundo, em relação ao cimento Portland comum, um mesmo teor de cimento composto resulta menor quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub>” (Neville, 1997, p. 508).



Além disso, deve-se atentar ao utilizar cimentos resistentes a sulfatos pois o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e, possivelmente, o C-S-H sejam mais vulneráveis a ataques do tipo ácido pelos sulfatos (Neville, 1997).

Neville e Brooks (2013) ainda afirmam que o cimento é de importância secundária para a prevenção de ataque por sulfatos se não garantirmos que o concreto tenha uma baixa relação a/c, ou seja, baixa permeabilidade.

Já para Mehta e Monteiro (2014) a qualidade do concreto também é um fator crucial quando se diz em ataque por sulfatos. O alto consumo de cimento, baixa relação a/c, adensamento adequado bem como a cura adequada são fatores que contribuem para a baixa permeabilidade do concreto, e assim para a mitigação dos efeitos deletérios dos sulfatos no mesmo. A Figura 2.3<sup>1</sup> mostra o efeito do consumo de cimento e do teor de  $\text{C}_3\text{A}$  no concreto em relação a deterioração média do concreto por sulfatos (a), bem como a relação entre a expansão frente ao consumo de cimento com adições de cinza volante e sua concentração de  $\text{C}_3\text{A}$  (b).

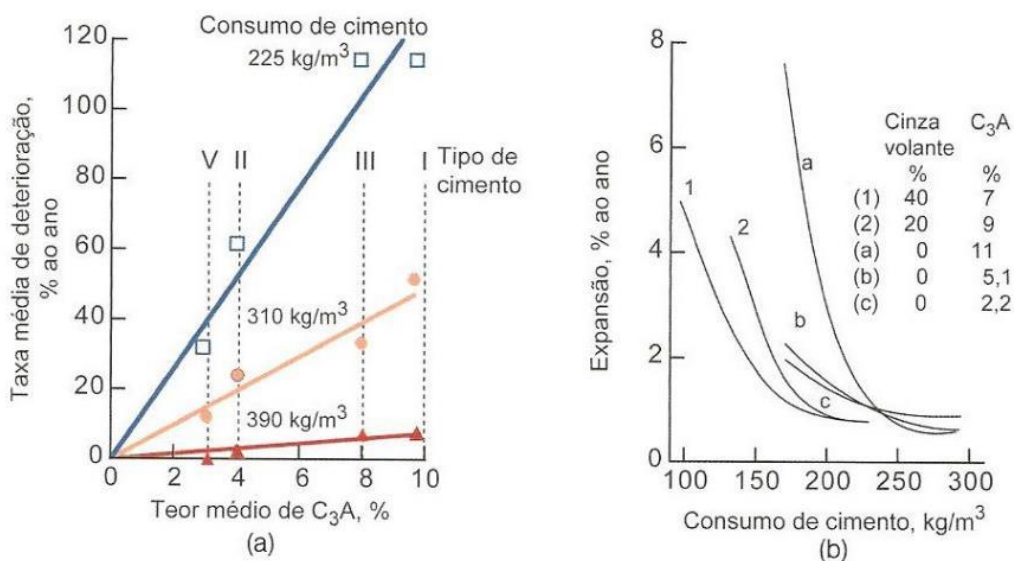


Figura 2.3 Efeito do tipo e consumo de cimento sobre o ataque por sulfato ao concreto.

Fonte: (a) Verbeck, 1968 citado por Mehta e Monteiro, 2014, p. 174;

(b) Brown e Oates, 1983 citado por Mehta e Monteiro, 2014, p. 174.

<sup>1</sup> Os tipos de cimento descritos são da norma norte americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*). De acordo com a ABNT estes cimentos seriam: Tipo I → Cimento Portland comum; Tipo II → Cimento Portland com moderada resistência a sulfatos; Tipo III → Cimento Portland de alta resistência inicial e; Tipo V → Cimento Portland com elevada resistência a sulfatos.

#### 2.7.4 Influência do pH

O pH ideal para a correta hidratação dos produtos do cimento Portland é entre 12 e 13 (Makahloufi *et. al.*, 2016). Assim, um ambiente ácido reduz a alcalinidade do concreto levando a uma “desestabilização dos produtos de hidratação dos materiais cimentícios” (Mehta e Monteiro, 2014, p. 161).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), um pH menor que 6 é considerado nocivo ao concreto. Já Neville e Brooks (2013) dizem que um ambiente com pH menor que 5,5 é severo e menor que 4,5 é muito severo.

O resultado de um estudo de Makahloufi *et. al.* (2016), evidenciou que a manutenção do pH da solução de sulfato em 7 acelera a deterioração do cimento em comparação com soluções não renovadas. Por fim, Rombèn (1978) citado por Neville (1997, p. 504) diz que “não é só o pH que influencia no ataque, mas também a mobilidade dos íons”.

#### 2.7.5 Influência da temperatura

Como visto anteriormente, a temperatura em que o concreto está tem influência no ataque por sulfatos. Temperaturas superiores a 60°C favorecem a formação da etringita tardia (Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014). Já em temperaturas inferiores a 15°C o produto formado é a taumasita (Neville e Brooks, 2013; Rahman e Bassouni, 2014). Em temperatura ambiente o ataque sofrido pelo concreto frente a soluções de sulfato de sódio, magnésio ou cálcio é moderado (ACI 201.2R-23, 2009).

#### 2.7.6 Sílica ativa

A sílica ativa é um material pozzolânico altamente reativo que acelera a reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produzido pela hidratação do cimento Portland (Neville, 1997; Neville e Brooks, 2013). Devido a sua pequena dimensão – diâmetro médio de 0,1 a 0,2 $\mu\text{m}$  (ACI 234R-26, 2009; Mehta e Monteiro, 2014), a sílica ativa preenche muito bem os espaços entre os grãos do cimento, melhorando o seu empacotamento, e assim diminuindo a permeabilidade do concreto (Neville, 1997; Neville e Brooks, 2013).

A diminuição da permeabilidade faz com que o ataque pelo sulfato de sódio se torna mais difícil, pois também reduz o  $\text{Ca(OH)}_2$  livre devido a reação pozzolânica. Em relação ao sulfato de magnésio, sua reatividade é menor quando comparado ao concreto sem a sílica ativa e em relação ao sulfato de amônia a performance é mista (ACI 234R-26, 2009).

Uma desvantagem em se utilizar a sílica ativa para minimizar o ataque por sulfatos é o fato do material pozzolânico ser de difícil manuseio aumentando assim a necessidade de utilizar mais água no concreto (Mehta e Monteiro, 2014). Ao aumentarmos a água no concreto, aumentamos a relação a/c e, conseqüentemente, a porosidade do concreto.



### **3 ESTUDO EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS**

Este estudo foi desenvolvido para avaliar o comportamento de produtos cimentícios submetidos a uma solução de sulfato de sódio 5% e com três diferentes tipos de cimento: CII-F-32, CIII-40-RS e CPV-ARI-RS.

A metodologia experimental consistiu na moldagem de corpos de prova de pasta de cimento, argamassa e concreto. Após 24h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida por 14 dias. Após este período, foram submetidos à exposição em solução composta por  $SO_4$  com ambiente controlado e em temperatura elevada.

Todos os corpos de prova foram submetidos as mesmas condições de exposição para eliminar possíveis distorções nos resultados dos ensaios.

A parte experimental foi desenvolvida nos Laboratório de Materiais de Construção, Laboratório de Cerâmica, e Laboratório de Engenharia de Materiais, todos localizados na Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Uma nova campanha experimental foi realizada para avaliar a maior exposição dos corpos de prova aos íons sulfato. Nesta, foram moldados corpos de prova de pasta de cimento e de argamassa com quatro diferentes tipos de cimento: CII-E-32 R, CIII-40-RS, CIV-32-RS e CPV-ARI-RS. Os resultados obtidos para esta análise foram semelhantes ao da primeira campanha experimental. Assim, optou-se por apresentar nos Anexo IV, Anexo V e Anexo VI os resultados e conclusões da segunda campanha experimental.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

Para mitigar a influência de variáveis estranhas ao experimento, todos os materiais utilizados foram caracterizados quanto a sua procedência, tipo e características. Assim como as variáveis estudadas que também foram controladas na totalidade do experimento.

##### **3.1.1 Cimento**

Objetivando avaliar a influência dos diferentes tipos de cimento no ataque por sulfatos, foram utilizados o CII-F-32 (cimento Portland composto por fíler calcário) da Votorantim, CIII-40-RS (cimento Portland de Alto-Forno) e CPV-ARI-RS (cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos), ambos da

Cauê. Os cimentos seguem as normas NBR 5733/1991 e NBR 11578/1991. A Tabela 3.1 apresenta a composição química dos cimentos utilizados no presente estudo.

Tabela 3.1 Composição química dos cimentos utilizados no estudo.

Cimento Portland	Componentes (% em massa)		
	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória Granulada de Alto-Forno	Material Carbonático
CPII-F-32	90 – 94	---	6 – 10
CPIII-40-RS	25 – 65	35 – 70	0 – 5
CPV-ARI-RS	95 – 100	---	0 – 5

Fonte: adaptado da NBR 5733/1991 e NBR 11578/1991.

Para a nova campanha experimental, foram utilizados quatro tipos de cimento o CPII-E-32 R (cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno) da Votorantim, CPIII-40-RS (cimento Portland de Alto-Forno), CPIV-32-RS (cimento Portland pozolânico) da Liz e CPV-ARI-RS (cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos), ambos da Cauê. A composição química dos mesmos está na Tabela IV.1 do Anexo IV.

### 3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado neste estudo foi a areia média fina quartzosa e a areia quartzosa rosa do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie. A Tabela 3.2 apresenta o resultado obtido da granulometria dos agregados miúdos, seguindo a NBR NM 248/2003.

Tabela 3.2 Granulometria dos agregados miúdos.

Abertura das peneiras (mm)	Areia Média Fina Quartzosa		Areia Quartzosa Rosa	
	Porcentagens de massa retida (%)			
	Média individual	Média acumulada	Média individual	Média acumulada
4,75	1	1	0	0
2,36	2	3	1	1
1,18	5	8	1	2
0,600	23	31	2	4
0,300	42	73	32	36
0,150	21	94	43	79
< 0,150	6	100	21	100

A Tabela 3.3 apresenta as características dos agregados miúdos: dimensão máxima do agregado, módulo de finura, massa específica e massa unitária. As normas para a realização dos ensaios são: NBR NM 248/2003, NBR 7211/2009, NBR NM 53/2009, respectivamente.

Tabela 3.3 Características dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia Média Fina Quartzosa	Areia Quartzosa Rosa
	Resultado	
Dimensão Máxima do Agregado	2,36 mm	0,600 mm
Módulo de Finura	2,10	1,21
Massa Específica	2,591 g/mL	2,694 kg/L
Massa Unitária	1,401 kg/L	1,593 kg/L

A Figura 3.1 apresenta a curva granulométrica obtida para a areia média fina quartzosa.

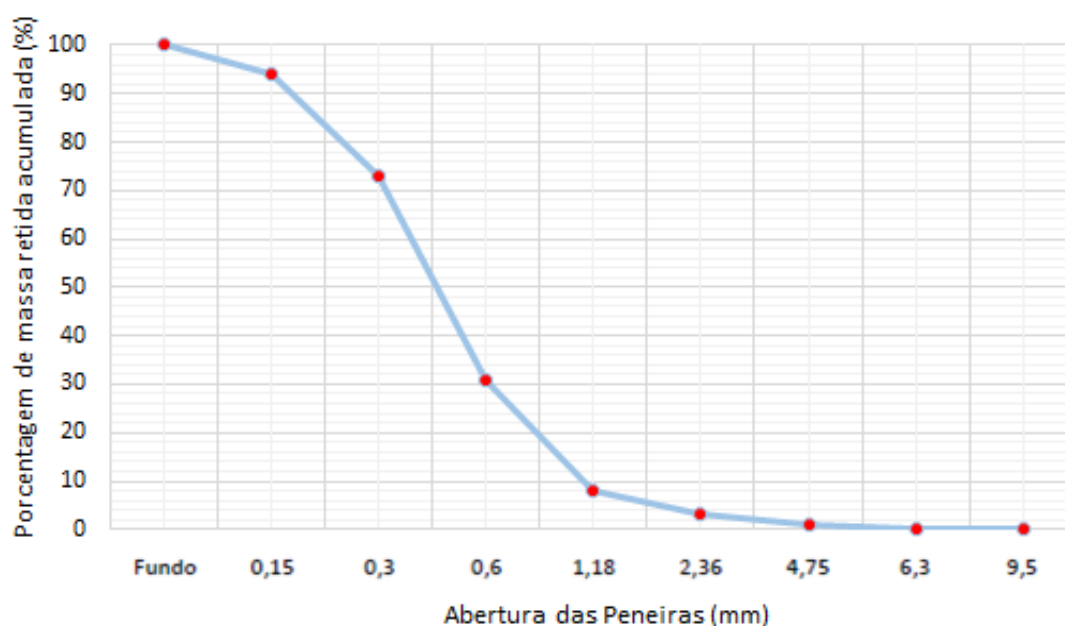


Figura 3.1 Curva granulométrica da areia média fina quartzosa.

A Figura 3.2 apresenta a curva granulométrica obtida para a areia quartzosa rosa.

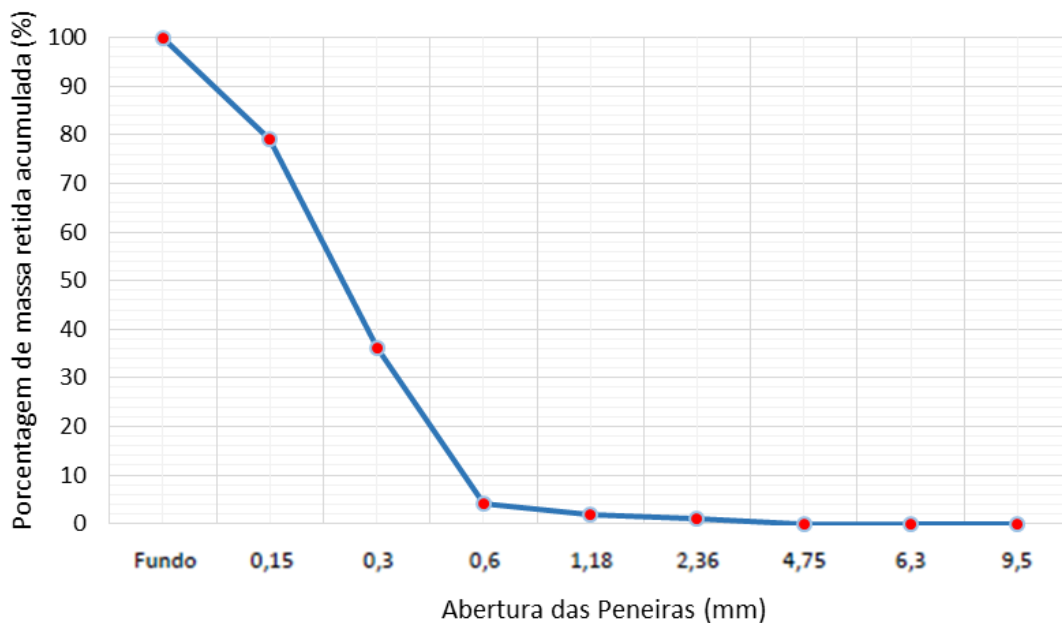


Figura 3.2 Curva granulométrica da areia quartzosa rosa.

### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado neste estudo foi a brita granítica do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie. A Tabela 3.4 apresenta o resultado obtido da granulometria da brita granítica, seguindo a NBR NM 248/2003.

Tabela 3.4 Granulometria do agregado graúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagens de massa retida (%)	
	Média individual	Média acumulada
19	10	10
12,5	49	59
9,5	25	84
6,3	13	97
4,75	1	98
2,36	0	98
1,18	0	98
0,600	0	98
0,300	0	98
0,150	0	98
Fundo	0	100

A Tabela 3.5 apresenta as características do agregado graúdo: dimensão máxima do agregado, módulo de finura, massa específica e massa unitária. As normas para a realização dos ensaios são: NBR NM 248/2003, NBR 7211/2009, NBR NM 53/2009, respectivamente.

Tabela 3.5 Características do agregado graúdo.

Propriedade	Resultado
Dimensão Máxima do Agregado	25 mm
Módulo de Finura	6,82
Massa Específica	2,667 kg/L
Massa Unitária	1,460 kg/L

A Figura 3.3 apresenta a curva granulométrica obtida para o agregado graúdo.

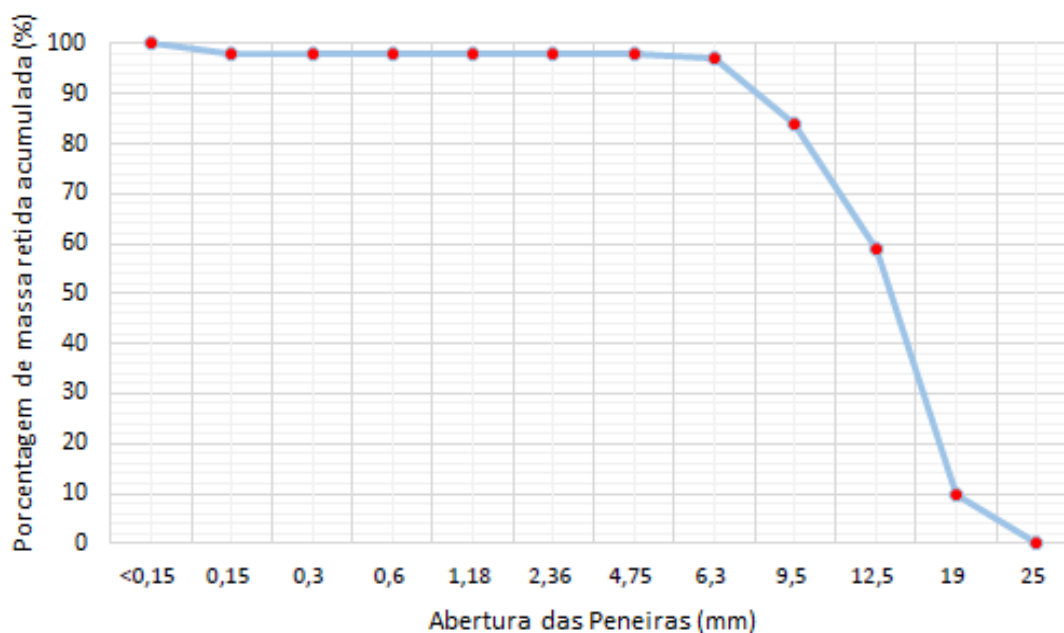


Figura 3.3 Curva granulométrica do agregado graúdo.

### 3.1.4 Aditivos

Os aditivos superplastificantes foram desenvolvidos na década de 1970, e tem a função de reduzir o consumo de água de amassamento, aumentar a fluidez e assim, melhorar a trabalhabilidade do concreto. Após ser adsorvido pelas partículas de cimento, cria uma carga negativa que repele a água, aumentando a fluidez do sistema (Neville, 1997; Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014). Segundo Neville e



Brooks (2013, p. 155) os superplastificantes “são à base de condensado de formaldeído-sulfonato de melamina ou de naftaleno”.

Na preparação do concreto para a moldagem dos CP's utilizou-se um aditivo superplastificante Adiment Premium MC da empresa Vedacit, com densidade de 1,10 g/cm<sup>3</sup>.

## 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a análise dos efeitos deletérios dos íons sulfatos nos produtos cimentícios, optou-se pela utilização de um traço de pasta de cimento, um de argamassa e um de concreto.

As etapas que se seguiram foram a dosagem dos traços, moldagem e cura dos corpos de prova.

### 3.2.1 Dosagens da pasta de cimento, da argamassa e do concreto

Para a dosagem foram utilizados três diferentes tipos de cimentos e CP's de diferentes dimensões e formatos.

#### 3.2.1.1 Pasta de cimento

O traço utilizado para a pasta de cimento foi de 1:0,4 em massa e está descrito na Tabela 3.6. O traço foi realizado em uma argamassadeira (Figura 3.4).

A pasta de cimento foi feita em porções de acordo com a Tabela 3.6 e então foram moldados 13 CP's: 3 com cimento CII-F-32; 4 com CIII-40-RS e 6 com CPV-ARI-RS. Na segunda campanha experimental foram moldados 15 CP's para cada tipo de cimento.



Figura 3.4 Argamassadeira utilizada para o preparo da pasta de cimento e da argamassa

Tabela 3.6 Quantificação do traço da pasta de cimento.

Componentes	CPII-F-32	CPIII-40-RS	CPV-ARI-RS
Cimento (g)	1000	1000	1000
Água (g)	400	400	400

### 3.2.1.2 Argamassa

O traço utilizado para a moldagem da argamassa foi de 1:3:0,52 em massa e é apresentado na Tabela 3.7, e a massa específica para cada tipo de cimento. O traço foi realizado em uma argamassadeira (Figura 3.4).

A areia utilizada para o preparo da argamassa foi uma mistura de 50% de areia média fina quartzosa e 50% de areia quartzosa rosa. Em um recipiente foi misturado manualmente 10 kg de cada tipo de areia até a obtenção de uma areia homogênea. Posteriormente, foram pesadas as quantidades para o preparo da argamassa. As porções de argamassa foram feitas de acordo com a Tabela 3.7, e foram moldados 15 CP's para cada tipo de cimento, sendo 5 para cada tipo de cimento. Para a segunda campanha experimental foram moldados 15 corpos de prova para cada tipo de cimento e a Tabela IV.2 do Anexo IV mostra a quantificação dos traços de argamassa.

Tabela 3.7 Quantificação do traço de argamassa.

Componentes	CPII-F-32	CPIII-40-RS	CPV-ARI-RS
Cimento (g)	700	700	700
Areia Média Fina Quartzosa + Areia Quartzosa Rosa (g)	2100	2100	2100
Água (g)	364	364	364
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2253	2239	2158

### 3.2.1.3 Concreto

Na dosagem do concreto inicialmente foi estabelecido o número de CP's a serem moldados para as diferentes idades de ensaios e diferentes tipos de exposição. Com o volume de concreto a ser utilizado, realizou-se o cálculo da quantidade de cada material.

Optou-se por um consumo de cimento de 360 kg/m<sup>3</sup>, pois, de acordo com a NBR 12655/2015, um concreto submetido ao ataque de sulfatos deve apresentar no mínimo tal consumo.

O traço de concreto foi de 1:2:3:0,52:0,08 em massa. A quantificação dos materiais, bem como a massa específica e o índice de consistência “slump” de cada traço são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Quantificação do traço de concreto.

Componentes	CPII-F-32	CPIII-40-RS	CPV-ARI-RS
Cimento (kg)	13	13	13
Areia Quartzosa (kg)	26	26	26
Brita Granítica (kg)	39	39	39
Água (kg)	6,76	6,76	6,76
Aditivo (g)	104	104	104
Índice de Consistência “slump” (mm)	50	40	40
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2376	2402	2370

### 3.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, os moldes metálicos foram revestidos internamente com desmoldante para proporcionar uma desforma adequada e sem danos aos CP's. Os materiais, previamente pesados (balança Toledo, modelo 2098DD/5), foram adicionados em uma betoneira estacionária de eixo inclinado (Figura 3.5) e misturados até obter-se uma mistura homogênea.

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738/2015, visando obter uma melhor precisão dos resultados e mitigando ao máximo o aparecimento de novas variáveis. Para a retirada de bolhas de ar presentes no interior do concreto, o mesmo foi vibrado com um vibrador na posição vertical. A princípio introduziu o vibrador no CP e depois o mesmo foi retirado de forma lenta e gradual, evitando o contato com o molde metálico (Figura 3.6).

As dimensões dos corpos de prova utilizados são apresentadas na Tabela 3.9



Figura 3.5 Mistura dos materiais na betoneira estacionária de eixo inclinado.



Figura 3.6 Corpos de prova de concreto sendo moldados e vibrados.

Tabela 3.9 Dimensões dos CP's.

	<b>Tipo</b>	<b>Dimensões (cm)</b>
Pasta de Cimento	Prismático	2,5x2,5x30
Argamassa	Prismático	4x4x16
Concreto	Cilíndrico	Ø10x20

Foram moldados 13 CP's de pasta de cimento, 15 de argamassa e 54 de concreto. Todos foram moldados em formas metálicas com as dimensões descritas.

### 3.2.3 Cura dos corpos de prova

Após moldados, os corpos de prova foram colocados por 24h em superfícies horizontais plana e livre de vibrações. A superfície dos corpos de prova foi coberta para evitar a evaporação da água de hidratação dos mesmos (Figura 3.7). Posterior a esse período, foi feita a desmoldagem dos corpos de prova e suas identificações. Os CP's de pasta de cimento e de argamassa foram embrulhados em papel filme (Figura 3.8) e pesados (Figura 3.9) para o acompanhamento da variação de massa. Por fim, foram colocados em câmara úmida por 14 dias (Figura 3.10). Após este período foram submetidos as condições experimentais: Grupo 1 – controle; Grupo 2 – solução de sulfato de sódio 5% à temperatura de 55°C.



Figura 3.7 Corpos de prova cobertos para evitar a evaporação da água de hidratação.



Figura 3.8 Corpos de prova embrulhados em papel filme.



Figura 3.9 Corpos de prova sendo pesados na balança da Gehaka, modelo BK5002 classe II.



Figura 3.10 Corpos de prova em câmara úmida.

### 3.3 ATAQUE PELA SOLUÇÃO DE SULFATOS

O procedimento experimental adotado para o ataque por sulfatos dos corpos de prova foi o de imersão em solução de sulfato de sódio a 5% à temperatura de, aproximadamente, 55°C. A escolha pela alta concentração de íons sulfato e pela alta temperatura teve o intuito de acelerar o ataque dos corpos de prova pelos íons sulfato, de forma a evidenciar os efeitos deletérios dos mesmos nas propriedades do concreto.

### CAPÍTULO 3

Para a definição da concentração de sulfatos a utilizar, buscou-se na literatura diversos trabalhos e chegou-se a uma concentração de 5%. A Tabela 3.10 mostra um resumo das concentrações de sulfatos utilizadas por diferentes autores.

Para a cura à temperatura elevada, os CP`s foram colocados dentro de uma caixa de água com capacidade de 100 litros (Figura 3.11), uma resistência de 2000W e um termostato. Com o auxílio de um técnico em elétrica, foi montado um sistema para ligar o termostato à resistência. O termostato e a resistência foram fixados no fundo da caixa de água. Na sequência, foi colocada uma malha de ferro para apoiar os CP`s, de modo que não encostassem na resistência.

Depois de permanecerem 14 dias na câmara úmida, os CP`s foram imersos em solução de sulfato de sódio a 5% e então ligou-se a resistência para o aquecimento da água até a temperatura de 55°C. Tomou-se o cuidado para que o aumento de temperatura não fosse muito rápido, pois caso isso ocorresse poderia ocasionar microfissuras nos corpos de prova devido ao gradiente térmico entre as camadas do seu interior e a superfície (Camarini e Cincotto, 1995; Peres, 2006). Assim, os CP`s permanecerem imersos em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5% a 55°C (Figura 3.12) por um período de 53 dias e então foram retirados para a realização dos ensaios.

O pH da solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  foi medido durante todo o experimento e se manteve constante em 13.

Tabela 3.10 Concentração de sulfatos utilizadas por diferentes autores.

<b>Autor</b>	<b>Tipo de solução agressiva</b>	<b>Concentração em relação ao volume de solução</b>
ABNT NBR 12655/2015.	SO <sub>4</sub>	0 a 0,2% (3 classes)
ACI 201.2R-24/2009	SO <sub>4</sub>	0 a 2% (4 classes)
Costa (2004)	MgSO <sub>4</sub>	0; 1 e 5 %
Jiang <i>et. al.</i> (2015)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5%
	MgSO <sub>4</sub>	3%
Linhares (2010)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5,56 %
Nehdi <i>et. al.</i> (2014)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5%
Pinheiro-Alves <i>et. al.</i> (2007)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5%
	MgSO <sub>4</sub>	5%
Romano e Brito (2012)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,5%
	MgSO <sub>4</sub>	2,5%
Silveira (1996)	Sulfato de sódio anidro	5%
Sotiriadis <i>et. al.</i> (2013)	Solução de sulfatos (SO <sub>4</sub> )	2 %
Souza (2006)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,8 e 45,4 %
	MgSO <sub>4</sub>	2,8 e 54,4 %
Zhang <i>et. al.</i> (2013)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0; 3 e 5%





Figura 3.11 Caixa de água onde os corpos de prova foram submetidos à cura térmica.



Figura 3.12 Corpos de prova submetidos à cura térmica em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%.

### 3.4 ENSAIOS

Após serem submetidos à solução de sulfato de sódio a 5%, os corpos de provas foram analisados quanto a ensaios de abatimento (“*slump test*”), ultrassom, absorção, módulo de elasticidade, resistência à compressão axial, resistência à tração diametral, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-x.

Vale ressaltar que os CP's de pasta de cimento foram moldados para acompanhar apenas as variações de massa e comprimento. Já os corpos de prova de argamassa foram moldados para medir a variação de massa e, na data do ensaio, foram ensaiados à flexão e posteriormente ensaiados quanto à sua resistência à compressão. Utilizou-se um paquímetro digital da Mitutoyo, modelo CD-12”C para a medição do comprimento dos CP's.

A Tabela 3.11 mostra os ensaios realizados nos corpos de prova.

Tabela 3.11 Ensaio realizados nos CP's.

	Pasta de cimento	Argamassa	Concreto
Traço (em massa)	1:0,4	1:3:0,52	1:2:3:0,52:0,08
Variação de massa	X	X	
Variação de comprimento	X		
Absorção			X
Ultrassom			X
Módulo de elasticidade			X
Resistência à flexão		X	
Resistência à compressão axial		X	X
Resistência à tração por compressão diametral			X
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	X	X	
Difratometria de Raios-X (DRX)	X	X	

#### 3.4.1 Abatimento (“*slump test*”)

Para caracterização dos concretos em estado fresco, foram realizados ensaios de abatimento. O ensaio consiste em moldar um tronco de cone com três camadas de volume aproximadamente igual e adensar com uma haste cilíndrica de aço com 25 golpes por camada (Figura 3.13). Após moldado, o tronco de cone

foi retirado com velocidade constante e, posteriormente, foi medido o índice de consistência (Figura 3.14). O ensaio seguiu os procedimentos descritos na NBR 15823-2/2010.



Figura 3.13 Moldagem do tronco de cone para a realização do ensaio de consistência.



Figura 3.14 Medição do índice de consistência.

### 3.4.2 Ultrassom

Para a realização do ensaio de ultrassom, os CP's foram retificados (Figura 3.15) para que tivessem suas superfícies planas e lisas. Posteriormente, aplicou-se uma fina camada de silicone nas superfícies para a realização do ensaio de transmissão direta, com os transdutores nas faces opostas (Figura 3.16), de acordo com a NBR 8802/2013. O aparelho utilizado para o ensaio de ultrassom foi o da CNS Farnell, modelo Pundit Plus.



Figura 3.15 Retificadora utilizada no presente estudo.



Figura 3.16 Ensaio de ultrassom nos corpos de prova de concreto.

### 3.4.3 Absorção

Para a análise de absorção do concreto seguiu-se a NBR 9778/2005. Após a ruptura dos CP's de concreto no ensaio de resistência à tração diametral, foram separadas uma das metades do CP. As amostras foram identificadas e colocadas em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)$  °C por um período de 72 h. Após esse período foram retiradas pesadas e então imersas em água à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C por um período de 72 h. após esta fase, as amostras foram retiradas da água, enxutas com um pano úmido e então foram pesadas para a determinação da quantidade de água absorvida.

### 3.4.4 Módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade do concreto consiste na carga e descarga do CP e a medição da sua deformação. Os valores estipulados pela NBR 8522/2008 são de 400 kgf e  $0,3.P_{máx.}$ , em que  $P_{máx.}$  foi obtido pela carga de ruptura de um CP de cada grupo e cada tipo de cimento. Este processo de carga e descarga foi realizado 4 vezes e posteriormente foi feita a ruptura do corpo de prova à compressão axial.

A Figura 3.17 mostra um dos CP's sendo ensaiado e, ao lado nota-se o extensômetro onde é registrado o valor da deformação (ordem de  $10^{-6}$  m) sofrida pelo corpo de prova de acordo com a carga aplicada. Existem dois aparelhos, pois é feita uma média da deformação na carga estipulada. Também é possível observar o relógio onde mostra a carga aplicada.



Figura 3.17 Ensaio para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto.



Figura 3.18 Detalhe dos extensômetros fixados juntos ao CP.

### 3.4.5 Resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, os corpos de prova de argamassa foram marcados com caneta para identificar com precisão o local de aplicação da carga como também os apoios. Após marcado, o CP foi

colocado na prensa para a realização do ensaio. A Figura 3.19 mostra o corpo de prova já na prensa para a realização do ensaio.

O vão livre (distância entre apoios consecutivos) do ensaio foi de 12 cm e a carga foi aplicada no centro de gravidade do prisma de argamassa.



Figura 3.19 Detalhe do corpo de prova de argamassa na prensa para o ensaio.

### 3.4.6 Resistência à compressão axial

Para a realização do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto, foi medido o diâmetro médio dos CP's para o cálculo da seção transversal. O ensaio de resistência à compressão axial consiste na aplicação de uma carga contínua, constante e sem choques, com velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. A relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) não deve exceder 2,02. Caso esta relação seja menor que 1,94; deve-se proceder com a correção para o cálculo da resistência à compressão axial. No presente estudo não foi necessário realizar tal correção e o ensaio foi realizado seguindo as especificações da NBR 5739/2007.

Os CP's de argamassa foram ensaiados de forma diferente quanto a resistência à compressão. Após serem ensaiados em relação a resistência à flexão, suas metades foram colocadas na prensa juntamente com dois suportes metálicos com dimensões de 4,0x4,0x2,0 cm. A Figura 3.20 ilustra a montagem realizada com uma das metades de um corpo de prova de argamassa submetido ao ensaio de resistência à compressão. Nota-se ainda a marcação com caneta no prisma, indicando o local a serem colocados os suportes metálicos para a realização do ensaio.



Figura 3.20 Detalhe da montagem para o ensaio.

### 3.4.7 Resistência à tração por compressão diametral

À luz da NBR 7222/2010 realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. O ensaio consiste na colocação de tiras de madeiras com 15 mm de largura e 5 mm de altura no plano diametral dos CP's (Figura 3.21). O ensaio fornece uma estimativa da resistência à tração do concreto.



Figura 3.21 Corpos de prova de concreto sendo ensaiados à tração por compressão diametral.

### 3.4.8 Microscopia eletrônica de varredura

Para a análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), integrado com um espectrômetro de energia dispersiva de raio X (EDS – *energy dispersive x-ray detector*) (Figura 3.22), que possibilita a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes na amostra, as mesmas foram coletadas de forma aleatória dos CP's de pasta de cimento e argamassa. Em seguida foram selecionadas do grupo curado em câmara úmida e do submetido à solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%. Após selecionadas, as amostras foram identificadas e fragmentadas para a melhor realização do experimento.

Como as amostras são de um material não condutor de elétrons, elas passaram por um processo de deposição de pó de ouro, no vácuo, para possibilitar a visualização das mesmas no MEV. O processo foi realizado no aparelho Sputter Coater SCD 050 da Baltec (Figura 3.23).



Figura 3.22 Microscópio Eletrônico de Varredura da Jeol, modelo JSM-6510.



Figura 3.23 Aparelho Sputter Coater SCD 050 da Baltec.

### 3.4.9 Difractometria de Raios-X

A difratometria de raios-X permite uma análise qualitativa dos materiais presentes na amostra. Quando um material é exposto aos raios-X, ele difrata os raios com uma determinada angulação. Assim, como



cada elemento possui uma angulação diferente é possível determinar a composição da amostra (Gomides, 2009; Neville e Brooks, 2013).

Para a análise no Difratorômetro de Raios-X (DRX) (Figura 3.24) as amostras de pasta de cimento e de argamassa foram coletadas do grupo curado em câmara úmida e do grupo submetido à solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  5%. Então foram identificadas, fragmentadas e moídas em um moinho giratório de porcelana carregado com esferas de alumina do Laboratório de Cerâmica da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Posteriormente, foram manualmente peneiradas em peneira de malha 0,177 mm. Após peneiradas foram colocadas em um molde para a análise no DRX (Figura 3.25).

Foi guardado uma certa quantidade das amostras para possível teste de contraprova.



Figura 3.24 Aparelho de DRX da Rigaku, modelo MiniFlex II.

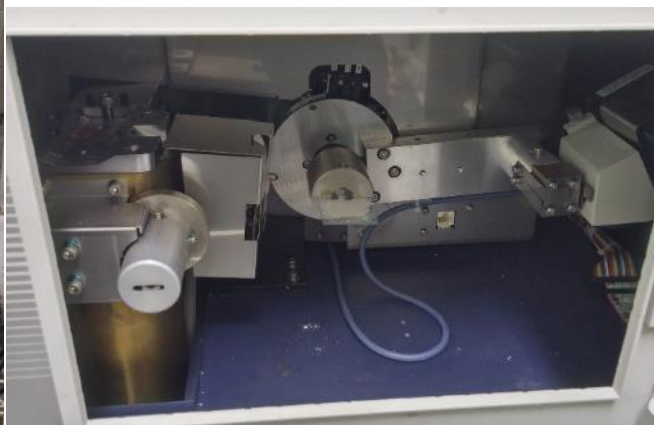


Figura 3.25 Detalhe da amostra preparada para o ensaio no DRX.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta seção serão analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados nos CP's de pasta de cimento, argamassa e concreto.

As análises de DRX e do MEV serão tratadas separadamente, logo após a discussão sobre os resultados obtidos para a argamassa.

### **4.1 ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO**

Para os corpos de prova de pasta de cimento foram medidos seu comprimento e massa de 4 em 4 dias para a verificação da variação dos mesmos. As Tabela 4.1 e Tabela 4.2 mostram, respectivamente, as máximas e mínimas variações de massa e comprimento dos CP's em comparação com suas medidas originais, no dia 07/04/2016 (14 dias), quando os grupos de estudo foram separados em relação a condição de cura: um para cura em câmara úmida e outro em solução de sulfato de sódio a 5% à 55°C.

As análises dos resultados obtidos para a variação de massa evidenciaram uma pequena diminuição da mesma na segunda medição, mas a partir desta, a massa de todas as amostras aumentou com o decorrer do tempo, fato este observável na Figura 4.1. O mesmo resultado é evidenciado nos corpos de prova da segunda campanha experimental (Figura IV.1 a Figura IV.8).

Tabela 4.1 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de massa dos CP's de pasta de cimento.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Variação Mínima (g)	Variação Máxima (g)
CPV-ARI-RS	1	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,2	4,0
	11	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,7	3,2
	12	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,1	3,7
	2	H <sub>2</sub> O	2,7	7,5
	13	H <sub>2</sub> O	1,4	8,8
	14	H <sub>2</sub> O	0,9	8,8
CPII-F-32	4	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,7	5,4
	5	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1,1	6,6
	6	H <sub>2</sub> O	1,0	7,2
CPIII-40-RS	7	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,3	5,4
	8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,1	4,6
	9	H <sub>2</sub> O	0,3	8,4
	10	H <sub>2</sub> O	2,8	8,4

Em relação à variação de comprimento, da Figura 4.2, nota-se que praticamente todos os corpos de prova sofreram expansões e retrações ao decorrer das medições. Porém, os CP's de número 1, 12 e 14 sofreram variações muito significativas ao longo do estudo. A Figura 4.3 mostra a variação destes corpos de prova em específico.

Na segunda campanha experimental os corpos de prova apresentaram o mesmo comportamento (Figura IV.9 a Figura IV.16).

Tabela 4.2 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de comprimento dos CP's de pasta de cimento.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Variação Mínima (mm)	Variação Máxima (mm)
CPV-ARI-RS	1	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,50	0,41
	11	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,42	0,51
	12	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1,03	0,37
	2	H <sub>2</sub> O	- 0,41	0,23
	13	H <sub>2</sub> O	- 0,23	0,43
	14	H <sub>2</sub> O	- 0,99	0,17
CPII-F-32	4	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,08	0,70
	5	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,11	0,36
	6	H <sub>2</sub> O	- 0,50	0,39
CPIII-40-RS	7	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,37	0,48
	8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,32	0,21
	9	H <sub>2</sub> O	- 0,23	0,42
	10	H <sub>2</sub> O	- 0,15	0,26

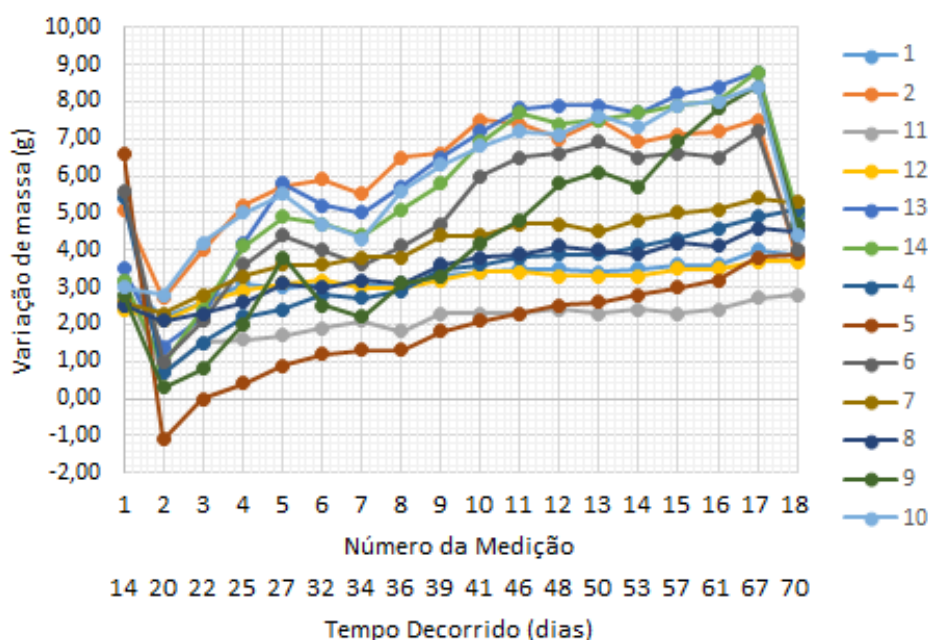


Figura 4.1 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento.

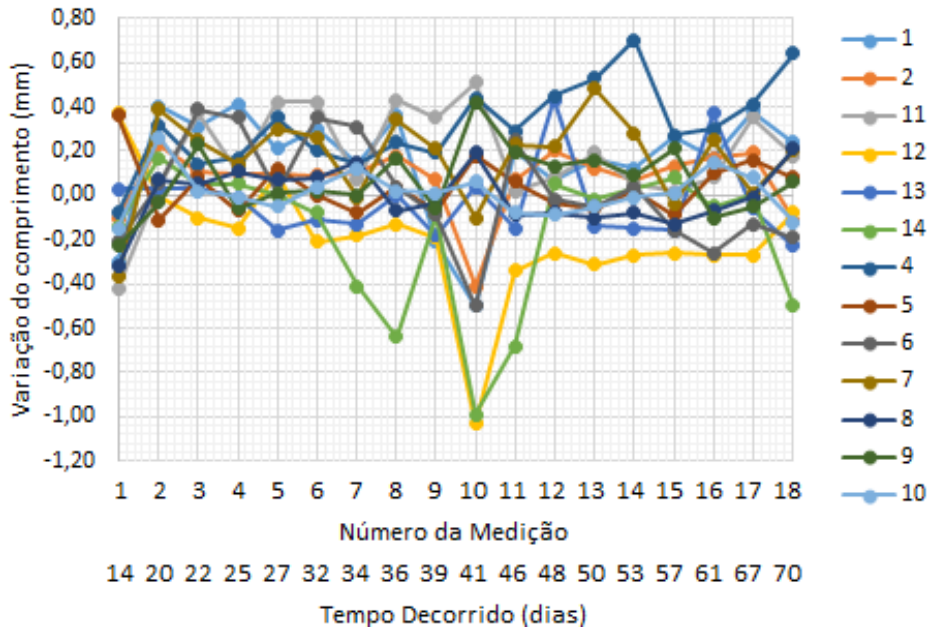


Figura 4.2 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento.

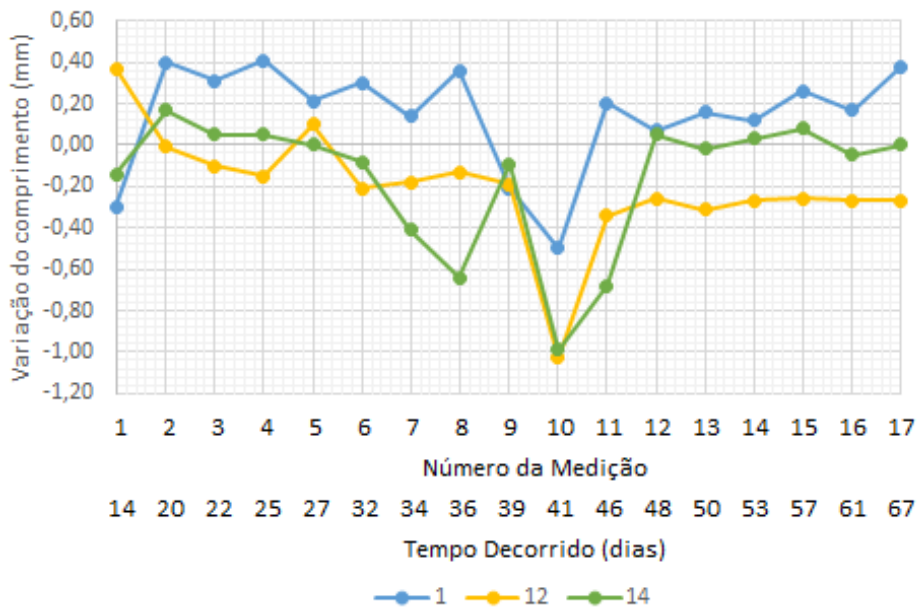


Figura 4.3 Variação de comprimento nos CP's 1, 12 e 14 de pasta de cimento.

De acordo com Marciano (1993) citado por Souza (2006), os resultados obtidos para cimentos resistentes a sulfatos não devem apresentar uma expansão superior a 0,030 % aos 42 dias de idade. Assim, os resultados indicados na Tabela 4.3 evidenciam que para o cimento Portland CPV-ARI-RS, os corpos de prova número 1 e 2 apresentaram uma expansão acima da descrita pelo autor. Já no CPIII-40-RS, os dois

CP's expostos a solução de sulfato tiveram uma retração na dimensão. No CII-F-32 apenas o CP de número 4 apresentou uma variação acima da descrita. Os demais CP's deste cimento sofreram retração aos 43 dias de idade.

Tabela 4.3 Expansão dos CP's de pasta de cimento expostos a solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  5% aos 43 dias.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Expansão em %
CPV-ARI-RS	1	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,091
	11	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,007
	12	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	- 0,092
	2	$\text{H}_2\text{O}$	0,046
	13	$\text{H}_2\text{O}$	- 0,056
	14	$\text{H}_2\text{O}$	0,028
CIII-40-RS	7	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	- 0,014
	8	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	- 0,046
	9	$\text{H}_2\text{O}$	0,074
	10	$\text{H}_2\text{O}$	0,004
CII-F-32	4	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,095
	5	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	- 0,032
	6	$\text{H}_2\text{O}$	- 0,056

Tanto os resultados obtidos para a variação de massa, quanto para a variação de comprimento, evidenciam uma grande variação dos valores medidos. Porém, estas variações, ocorrem de forma bem similar nos corpos de prova do Grupo 1 e do Grupo 2.

## 4.2 ENSAIOS EM ARGAMASSA

Para os corpos de prova de argamassa foi medida a sua variação de massa de 4 em 4 dias. A Tabela 4.4 apresenta os resultados das máximas e mínimas variações de massa, suas respectivas médias e desvios padrão e os desvios padrão relativos. Estas variações são em referência a sua medida original do dia 07/04/2016, quando os grupos de estudo foram separados em relação a condição de cura: um para cura em câmara úmida e outro em solução de sulfato de sódio a 5% a 55°C.

Nota-se que os resultados obtidos não apresentam uma diferença quanto ao tipo de cura e nem quanto ao tipo de cimento. Mas, se selecionarmos os resultados de todas as medições em forma de gráfico, é possível identificar um padrão. Na Figura 4.4 é possível visualizar uma queda na massa de todos os CP's na segunda medição e, a partir desta, as massas tendem a aumentar conforme passam os dias.

Tabela 4.4 Resultados obtidos para a variação de massa dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Variação Mínima (g)	Variação Máxima (g)	Média ± DP <sup>a</sup> (n)
CPII-F-32	1	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,0	5,0	3,1 ± 0,9 (17)
	2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,9	8,4	- 0,8 ± 2,4 (17)
	3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1,9	4,3	1,2 ± 1,5 (17)
	4	H <sub>2</sub> O	- 0,5	5,9	1,8 ± 1,5 (17)
	5	H <sub>2</sub> O	1,3	4,7	2,9 ± 1,0 (17)
CPIII-40-RS	6	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1,1	5,9	0,5 ± 1,4 (17)
	7	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,8	5,5	- 1,3 ± 1,8 (17)
	8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,0	4,7	- 0,6 ± 1,4 (17)
	9	H <sub>2</sub> O	0,1	5,3	2,6 ± 1,6 (17)
	10	H <sub>2</sub> O	0,5	5,1	2,7 ± 1,4 (17)
CPV-ARI-RS	11	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,8	5,8	- 1,3 ± 1,8 (17)
	12	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,1	4,5	- 0,5 ± 1,3 (17)
	13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,2	4,5	1,1 ± 0,9 (17)
	14	H <sub>2</sub> O	2,8	5,8	4,2 ± 0,9 (17)
	15	H <sub>2</sub> O	1,7	6,3	4,3 ± 1,4 (17)

a.Desvio Padrão, n=número de determinações.

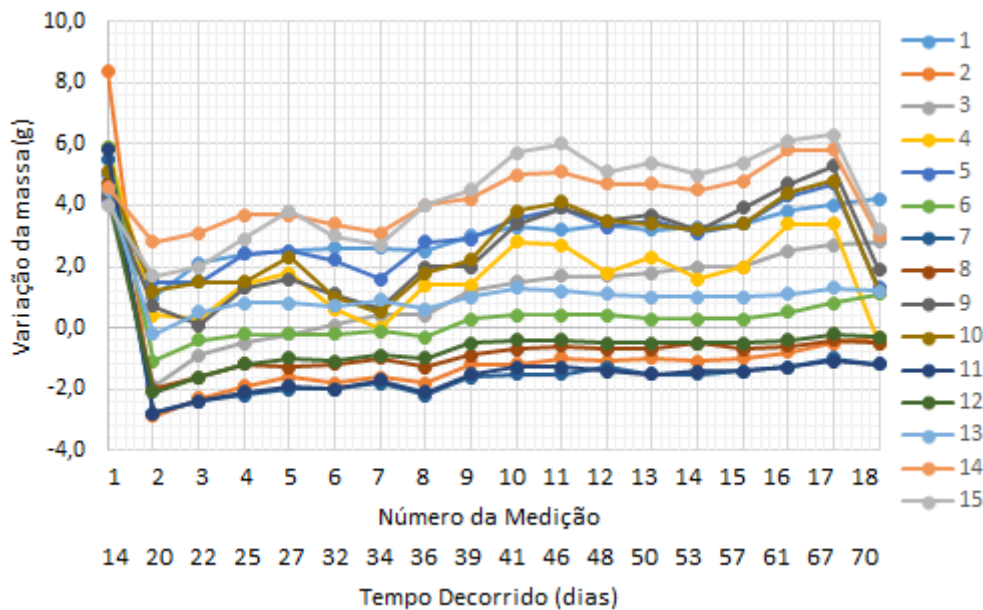


Figura 4.4 Variação de massa nos CP's de argamassa.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à flexão dos corpos de prova de argamassa com 71 dias de idade.

Os resultados para os diferentes grupos mostram que os CP's tratados na solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%, apresentaram valores superiores em relação ao grupo curado em câmara úmida, com exceção do resultado para os CP's de CII-F-32. Os desvios padrão relativos foram inferiores à 6,8 % evidenciando a precisão dos resultados obtidos.

Os corpos de prova curados em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5% apresentaram valores superiores ao grupo controle possivelmente por estarem submersos em água (mesmo que em solução de sulfatos) e em elevada temperatura, isso é evidenciado por Neville (1997), Bauer, (2011), Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2014) que dizem que a cura térmica pode aumentar a resistência dos corpos de provas.

Tabela 4.5 Resistência à flexão (em MPa) dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Cura	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,2 ± 0,5 (3)	5,1
	H <sub>2</sub> O	7,4 ± 2,1 (2)	28,7
CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,7 ± 0,7 (3)	6,7
	H <sub>2</sub> O	5,4 ± 0,1 (2)	1,3
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,5 ± 0,6 (3)	6,8
	H <sub>2</sub> O	4,9 ± 0,2 (2)	4,6

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa com 71 dias de idade.

Tabela 4.6 Resistência à compressão (em MPa) dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Cura	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	33,1 ± 7,3 (6)	22,1
	H <sub>2</sub> O	36,3 ± 1,7 (4)	4,8
CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	41,4 ± 2,5 (6)	6,1
	H <sub>2</sub> O	36,1 ± 1,6 (4)	6,2
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	38,5 ± 1,6 (6)	4,2
	H <sub>2</sub> O	31,0 ± 2,4 (4)	7,6

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.



Os resultados obtidos para a resistência à compressão apresentaram resultados similares, ou seja, os CP's tratados em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5% apresentaram resultados superiores aqueles do grupo controle, com exceção do resultado obtido do ensaio de resistência à compressão para os CP's de CII-F-32.

Os valores de desvios padrão relativos inferiores 7,6% indica uma boa reprodutibilidade dos resultados, indicando sua precisão, com exceção do resultado obtido para os corpos de prova com cimento CII-F-32 curados em solução de sulfato de sódio a 5%.

### **4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X**

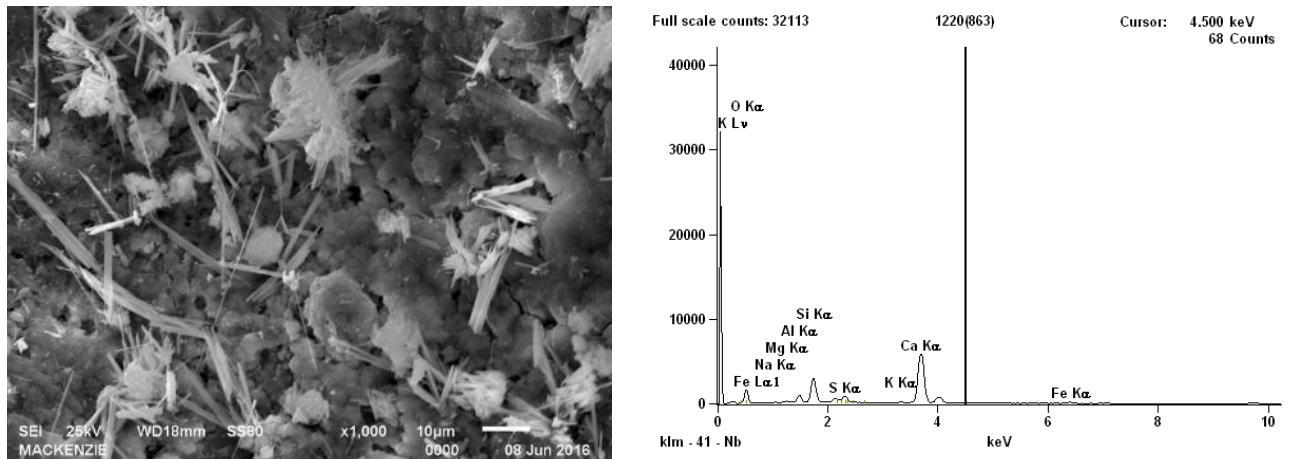
Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados obtidos do MEV e DRX realizados na pasta de cimento e na argamassa.

Tanto os gráficos obtidos da análise de DRX como as imagens obtidas no MEV permitiram uma análise mais minuciosa e detalhada dos resultados apresentados anteriormente.

#### **4.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura**

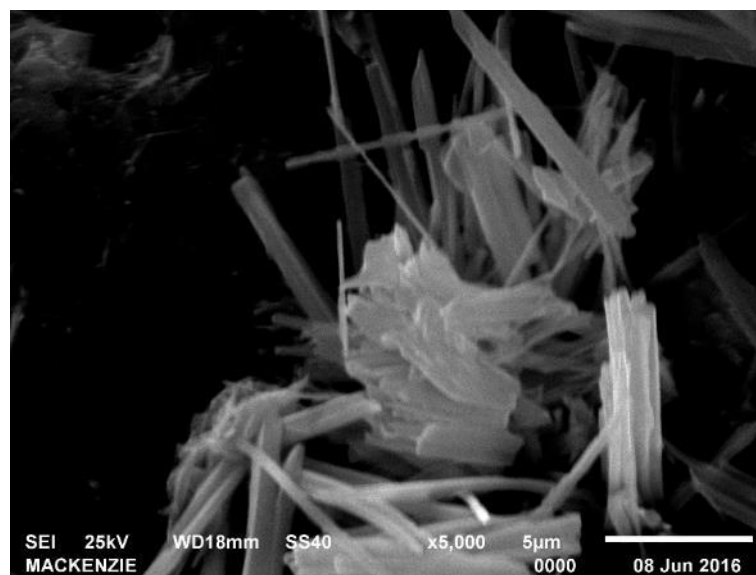
A seguir são analisados os resultados obtidos da análise das amostras de argamassa no MEV.

A Figura 4.5 mostra a micrografia da amostra de argamassa CII-F-32 curada em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%, e é possível notar cristais de formato acicular como a formação de microfissuras. O EDS, na Figura 4.5 (b), indicou a presença de Al (alumínio), Si (silício) e Ca (cálcio). Estes elementos químicos são componente da etringita.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.5 (a) Micrografia da amostra de argamassa CII-F-32, cura:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , aumento 1000x; (b) análise EDS; (c) detalhe dos cristais de formato acícula, aumento 5000x.

A Figura 4.6 apresenta a superfície da argamassa com aspecto denso, sem pulverulência e com poucas microfissuras. A Figura 4.7 mostra um detalhe da mesma amostra com a análise de EDS. Nota-se que os elementos Ca (cálcio) e Si (silício) aparecem na análise, estes são provenientes do próprio cimento, que tem em sua composição tais elementos químicos.

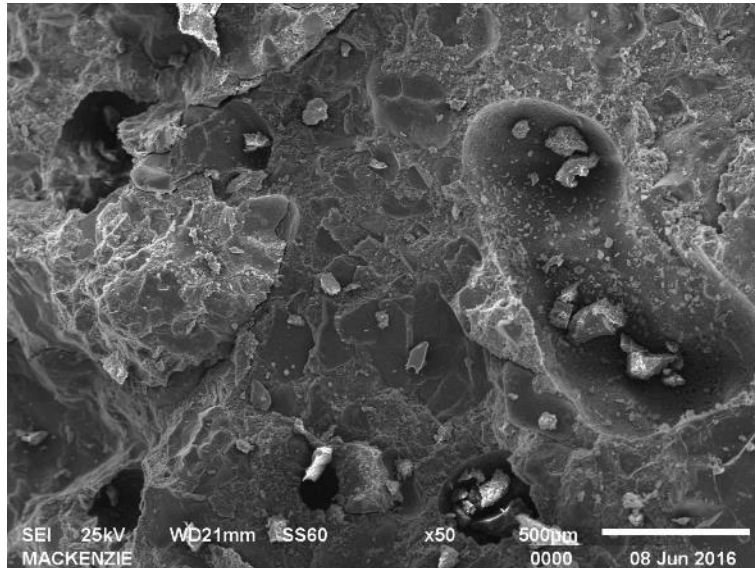
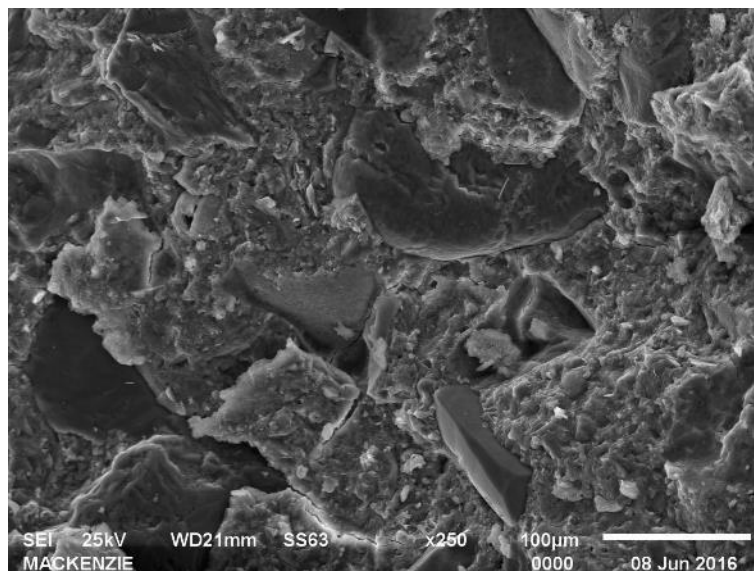
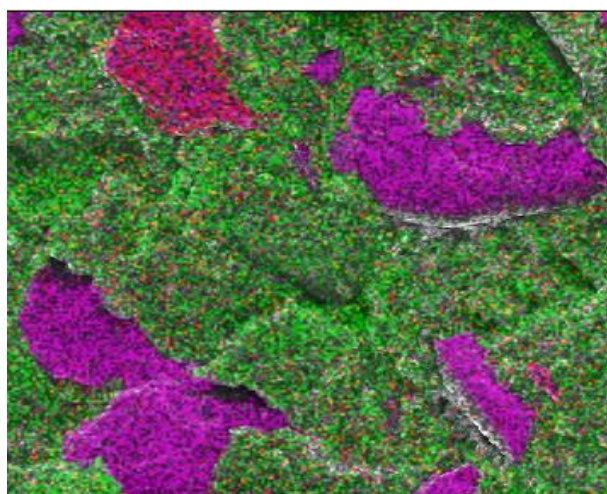


Figura 4.6 Micrografia da amostra de argamassa CPlI-F-32, cura: câmara úmida, aumento 50x.

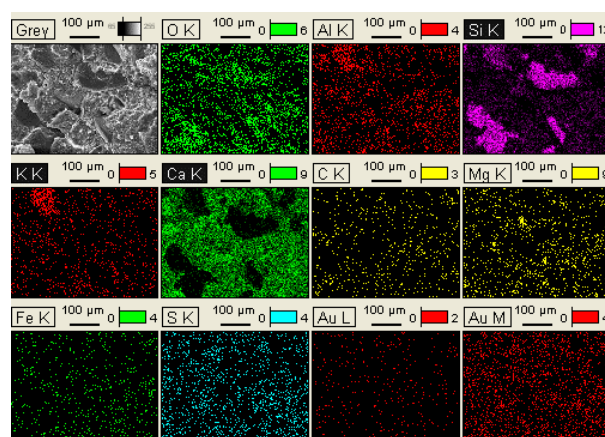
Da Figura 4.8 nota-se uma formação de diversos cristais acículas em uma cratera na superfície da amostra. A análise EDS, Figura 4.8 (b) e (c), indicou a presença de Al (alumínio), Ca (cálcio), S (enxofre) e Si (sílicio). A Figura 4.9 mostra em detalhe a formação dos cristais acículas da Figura 4.8 (a).



(a)

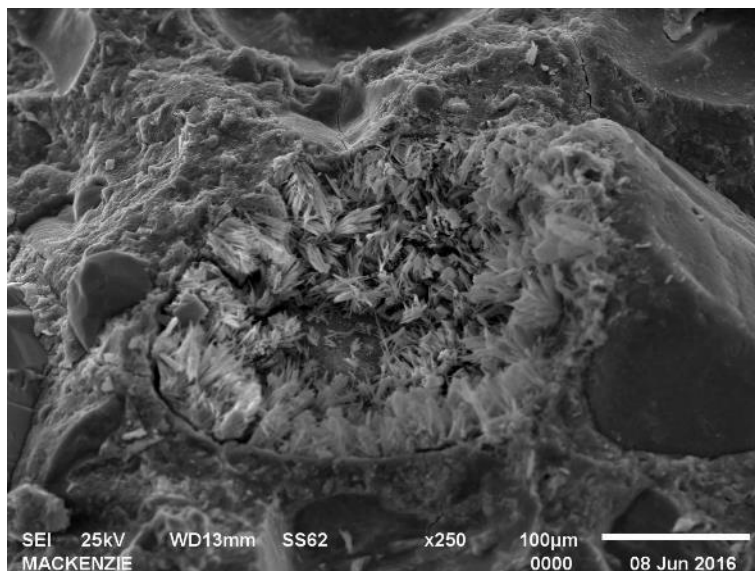


(b)

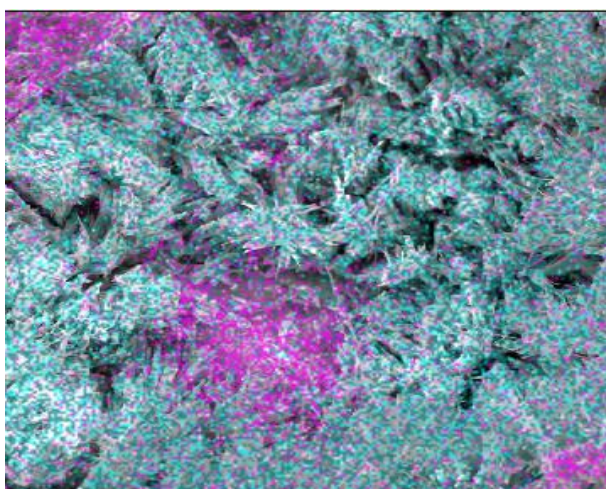


(c)

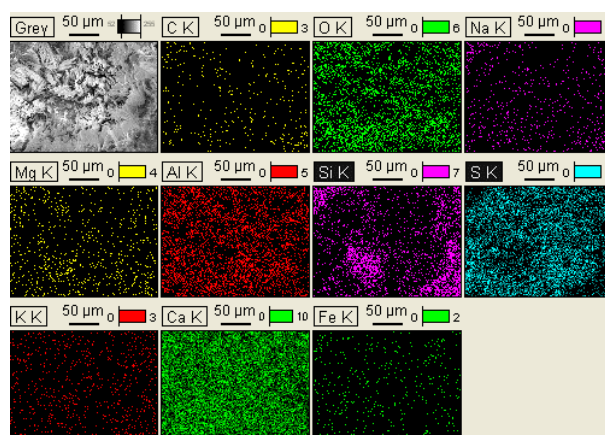
Figura 4.7 (a) Micrografia da amostra de argamassa CPlI-F-32, cura: câmara úmida, aumento 250x; (b) análise EDS; (c) correspondência das cores com o elemento químico, da análise EDS.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 (a) Micrografia da amostra de argamassa CPIII-40-RS, cura:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , aumento 250x; (b) análise EDS; (c) correspondência das cores com o elemento químico, da análise EDS.

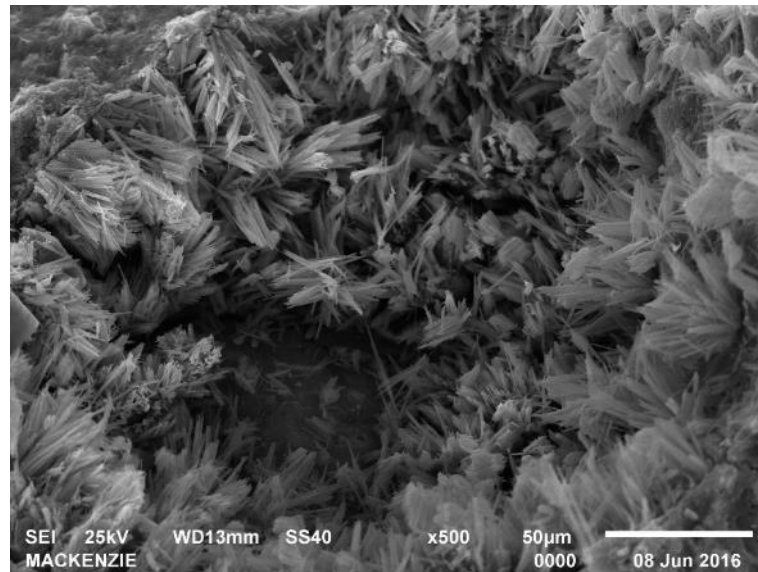


Figura 4.9 Detalhe da Figura 4.8 (a), aumento 500x.

A Figura 4.10 mostra uma microfissura na superfície da argamassa de cimento CIII-40-RS curado em câmara úmida. Já na Figura 4.11, temos um detalhe da mesma amostra com a formação de cristais. Em comparação com os trabalhos de Nehdi *et. al.* (2014), Jiang *et. al.* (2015) e Secco *et. al.* (2015) tais cristais podem ser de gipsita.

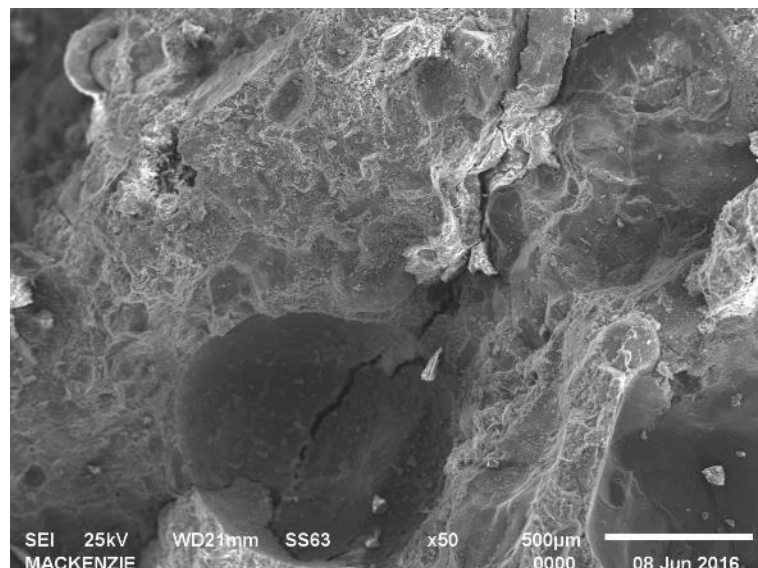


Figura 4.10 Micrografia da amostra de argamassa CIII-40-RS, cura: câmara úmida, aumento 50x.

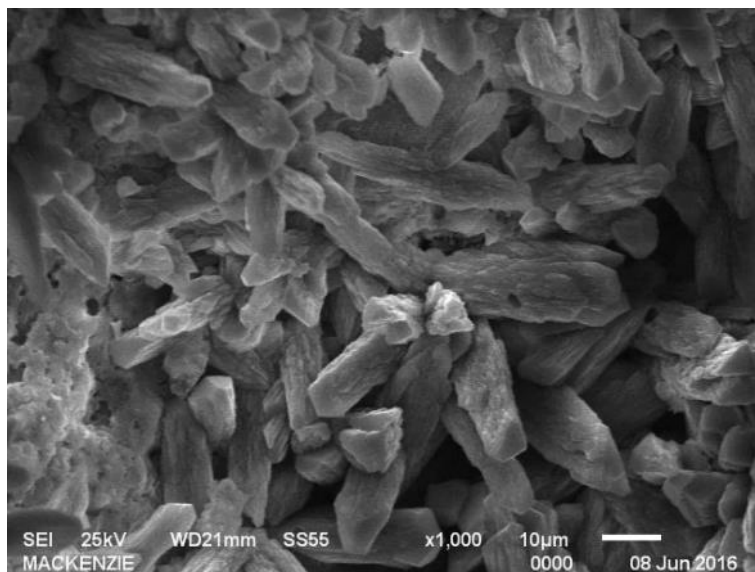


Figura 4.11 Micrografia da amostra de argamassa CPIII-40-RS, cura: câmara úmida, aumento 1000x.

A análise no MEV da amostra de CPV-ARI-RS curado em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%, também evidenciou a presença de cristais de formato acicular e de microfissuras (Figura 4.12).

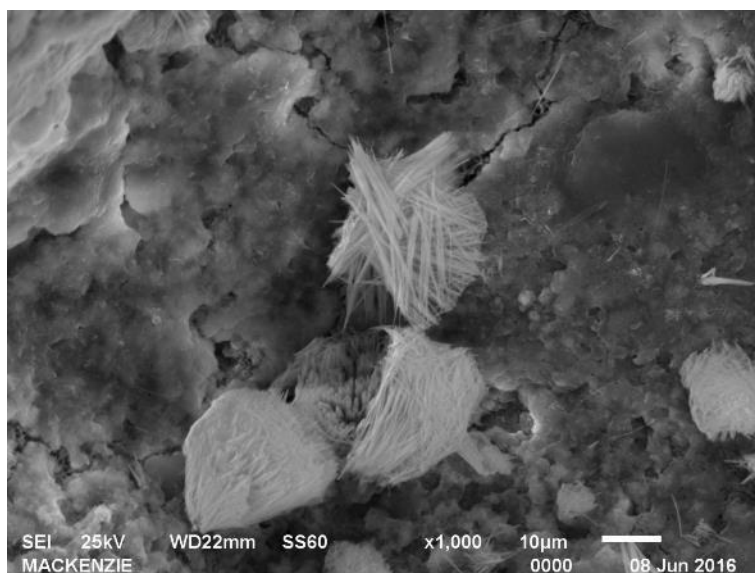


Figura 4.12 Micrografia da amostra de argamassa CPV-ARI-RS, cura:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , aumento 1000x.

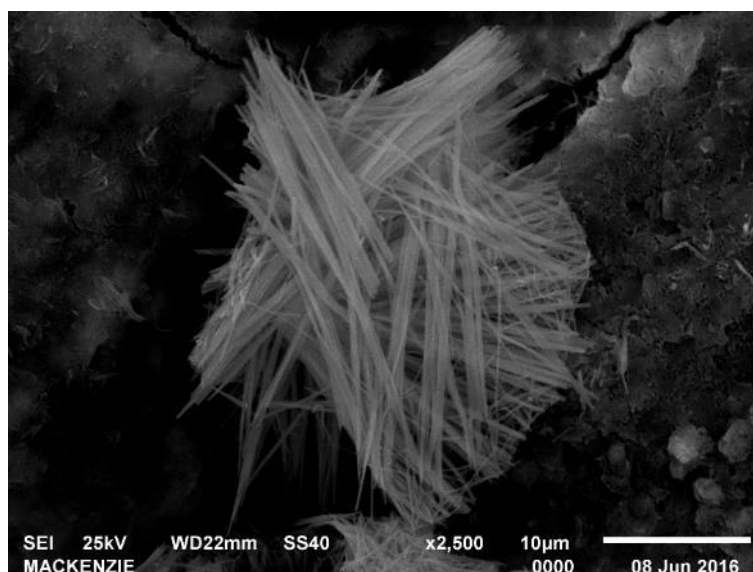


Figura 4.13 Detalhe da Figura 4.12, aumento 2500x.

Na amostra de argamassa de CPV-ARI-RS curado em câmara úmida não se observou a formação de cristais de formato acicular.

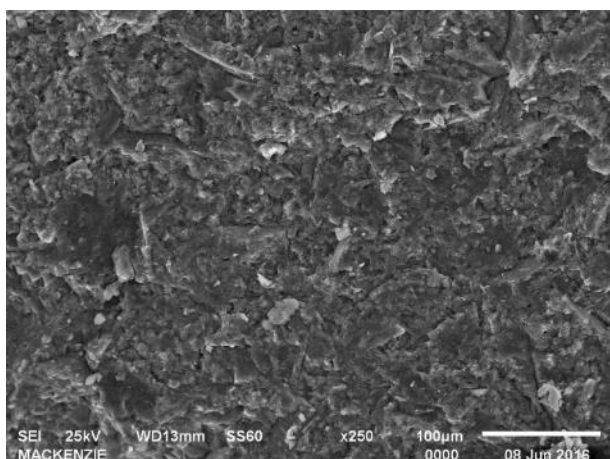
A presença dos elementos químicos Al (alumínio), Ca (cálcio), S (enxofre) e Si (sílicio), em comparação com os trabalhos de Silveira (1996), Costa (2004), Araújo *et. al.* (2008), Skaropoulou *et. al.* (2013), Nehdi *et. al.* (2014), Rahman e Bassuoni (2014), Genovés *et. al.* (2015), Jiang *et. al.* (2015) e Secco *et. al.* (2015) pode ser uma evidência da formação de etringita nas amostras, porém estes elementos aparecem em quantidades semelhantes em todas amostras de argamassa. Assim, não se pode afirmar com convicção que houve a formação de etringita. Porém a formação de cristais de formato acícula se restringe apenas as amostras que foram submetidas a solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e, novamente em comparação com os trabalhos de Gomides (2009), Nehdi *et. al.* (2014) e Genovés *et. al.* (2015) tais cristais podem ser de etringita.

Nos resultados obtidos da análise no MEV, as amostras de pasta de cimento apresentaram resultados muito semelhantes quanto a morfologia encontrada como também em relação a composição química presente. Assim, concluiu-se que se torna difícil a avaliação da reação da solução de sulfato com a pasta de cimento.

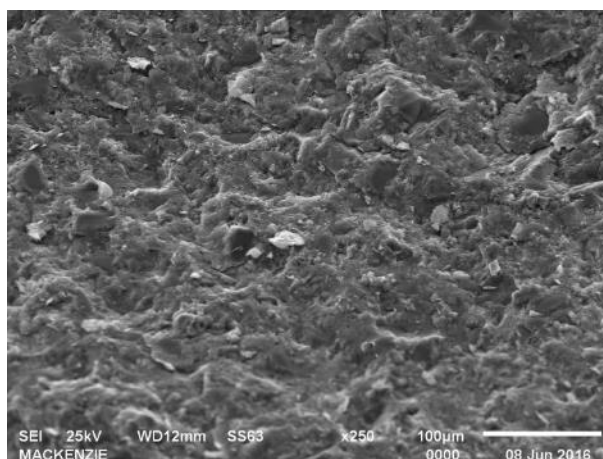
A Figura 4.14 elucidada o exposto anterior. Nota-se que a superfície da amostra de pasta de cimento de CII-F-32 curados em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5% (Figura 4.14a) e em câmara úmida (Figura 4.14b) apresentam aspectos muito semelhantes. As mesmas amostras são mostradas em um aumento maior (Figura 4.14c e Figura 4.14d) e, novamente nota-se a mesma morfologia.

O mesmo se repete para as amostras de pasta de cimento de CIII-40-RS e de CPV-ARI-RS.

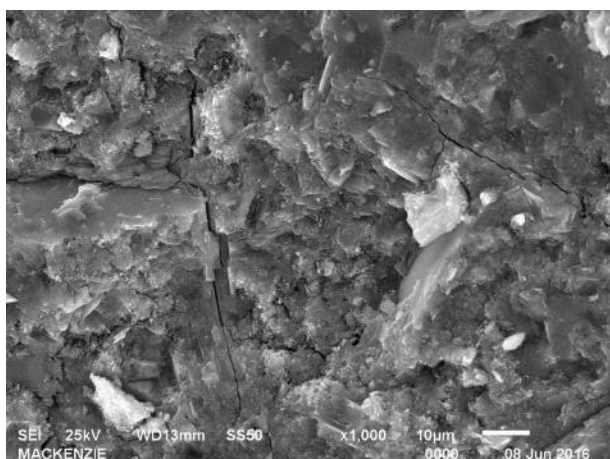




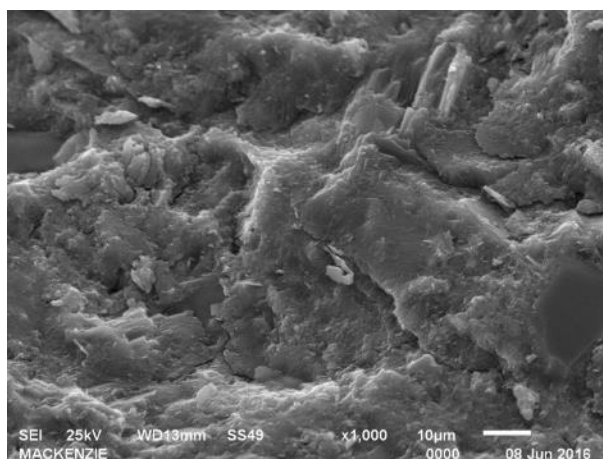
(a) Cura: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, aumento 250x.



(b) Cura: câmara úmida, aumento 250x.



(c) Cura: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, aumento 1000x.



(d) Cura: câmara úmida, aumento 1000x.

Figura 4.14 Micrografia da amostra de pasta de cimento CPII-F-32.

### 4.3.2 Difractometria de Raios-X

Para a análise dos resultados obtidos no DRX buscou-se na literatura os valores dos principais picos de etringita e gipsita (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 Principais picos obtidos na literatura para etringita e gipsita.

Autores	Etringita	Gipsita
Souza (2006)	9,1°	11,6° e 20,7°
Quarcioni (2008)	9,25°, 15,9° e 22,9°	11,6° e 20,9°
Schaefer <i>et. al.</i> (2010)	---	11,69° e 20,75°
Tavares <i>et. al.</i> (2010)	9° e 22°	---

Em posse dos principais picos da literatura, buscou-se nos resultados do DRX tais picos. Na Tabela 4.8 são apresentados a contagem por segundo da etringita nas amostras de pasta de cimento nos picos apontados pelos autores. Nota-se que os resultados se apresentam muito semelhantes, com exceção do resultado para o CPV-ARI-RS, que apresenta uma leve diferença de contagem, podendo evidenciar a presença de etringita na amostra. Porém, na análise do MEV não foi possível identificar cristais de formato acicular.

Tabela 4.8 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de pasta de cimento.

Cimento Portland	Cura	Contagem por segundo nos picos:		
		9º	15,9º	22,9º
CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	77	72	107
	H <sub>2</sub> O	77	58	94
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	69	112
	H <sub>2</sub> O	61	49	91
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	124	118	135
	H <sub>2</sub> O	82	78	113

Em comparação com os resultados obtidos para os corpos de prova de pasta de cimento da segunda campanha experimental, nota-se que há uma maior contagem por segundo nos picos de etringita (Tabela IV.9 do Anexo IV) para os cimentos CPII-E-32 R e CPV-ARI-RS, evidenciando que uma maior exposição à solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%, pode resultar em mais formação de etringita nas amostras.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos para as amostras de argamassa. Comparando os corpos de prova submetidos a diferentes tipos de cura, pode-se observar que não houve uma diferença significativa quanto os picos de etringita obtidos. Porém, para a análise de todas as amostras no MEV, foi possível identificar cristais de formato acicular, que evidenciam a possível formação de etringita.

Tabela 4.9 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de argamassa.

Cimento Portland	Cura	Contagem por segundo nos picos:		
		9º	15,9º	22,9º
CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24	28	52
	H <sub>2</sub> O	36	25	62
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	193	24	22
	H <sub>2</sub> O	nd	30	41
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	45	49	64
	H <sub>2</sub> O	53	36	65

nd = não detectado.

Para a análise dos picos de gipsita, as amostras de pasta de cimento não apresentaram nenhum pico característico do cristal (o mesmo ocorre nos resultados obtidos da segunda campanha experimental). Já para a análise dos corpos de prova de argamassa (Tabela 4.10), nota-se uma grande discrepância nos resultados obtidos para a amostra de CII-F-32. Este resultado aponta para a existência de gipsita na amostra, porém na análise no MEV não foi possível observar a formação de tais cristais.

Tabela 4.10 Contagem por segundo dos picos de gipsita nas amostras de argamassa.

Cimento Portland	Cura	Contagem por segundo nos picos:	
		11,6º	20,8º
CII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	nd	2511
	H <sub>2</sub> O	nd	672
CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	nd	1049
	H <sub>2</sub> O	nd	450 e 996
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	nd	616
	H <sub>2</sub> O	nd	780

nd = não detectado.

#### 4.4 ENSAIOS EM CONCRETO

Na Tabela 4.11 são apresentadas as médias dos resultados obtidos no ensaio de ultrassom, com coeficiente de Poisson de 0,2 para todas as amostras.

Os resultados indicam uma evolução no valor do módulo de elasticidade dinâmico do concreto dos 14 aos 70 dias de idade. Os valores da média para os diferentes grupos de cura se mostram muito próximos. Os desvios padrão relativos inferiores a 3,85% indicam uma boa precisão dos resultados obtidos.

Tabela 4.11 Média dos resultados para o módulo de elasticidade dinâmico do concreto obtidos do ensaio de ultrassom.

Cimento Portland	Cura	Idade	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GN/m <sup>2</sup> )	
			Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CPII-F-32	H <sub>2</sub> O	14 dias	44,2 ± 0,8 (6)	1,89%
	H <sub>2</sub> O	70 dias	53,5 ± 1,3 (3)	2,48%
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		50,8 ± 1,1 (3)	2,24%
CPIII-40-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	43,9 ± 0,5 (6)	1,03%
	H <sub>2</sub> O	70 dias	53,9 ± 0,5 (3)	0,93%
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		52,9 ± 1,7 (3)	3,15%
CPV-ARI-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	41,4 ± 0,8 (6)	1,97%
	H <sub>2</sub> O	70 dias	48,6 ± 1,9 (3)	3,85%
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		51,7 ± 0,6 (3)	1,21%

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

Na Tabela 4.12 é apresentado o módulo de elasticidade calculado através da carga e descarga dos CP's. Os resultados obtidos para os corpos de prova curados em solução de sulfato de sódio a 5% apresentaram um maior módulo de elasticidade em relação aqueles curados somente em câmara úmida. Tal resultado, possivelmente, se deve ao fato das resistências à compressão axial também ser maior nos CP's do Grupo 2. Assim, o esperado é que seu módulo de elasticidade fosse maior.

Na Tabela 4.13 são apresentadas as médias dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial. Os desvios padrão relativos inferiores a 9,47% indica a boa precisão dos resultados obtidos.

Da mesma tabela é possível notar que houve uma evolução da resistência à compressão axial dos CP's de concreto dos 14 para os 70 dias. Porém, o grupo controle apresentou resultados inferiores ao grupo submetido ao ataque de sulfatos. Como já explanado anteriormente, tal resultado pode ser explicado pela cura dos CP's do Grupo 2 ser submersa e em temperatura elevada, aumentando assim a resistência dos corpos de prova quanto à compressão axial.

Tabela 4.12 Média dos resultados para o módulo de elasticidade do concreto obtidos do ensaio de carga e descarga.

Cimento Portland	Cura	Média (n) (GPa)
CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	35,0 (2)
	H <sub>2</sub> O	32,0 (2)
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	40,4 (2)
	H <sub>2</sub> O	33,7 (2)
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	34,2 (2)
	H <sub>2</sub> O	28,4 (2)

Tabela 4.13 Média dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão axial (em MPa).

Cimento Portland	Cura	Idade	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CPII-F-32	H <sub>2</sub> O	14 dias	42,8 ± 1,1 (3)	2,48
	H <sub>2</sub> O	70 dias	50,5 ± 0,9 (3)	1,86
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		53,5 ± 1,0 (3)	1,85
CPIII-40-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	36,6 ± 3,5 (3)	9,47
	H <sub>2</sub> O	70 dias	48,0 ± 1,4 (3)	2,87
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		50,0 ± 2,3 (3)	4,54
CPV-ARI-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	34,6 ± 1,7 (3)	4,90
	H <sub>2</sub> O	70 dias	47,0 ± 0,9 (3)	2,02
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		49,3 ± 2,4 (3)	4,93

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

Na Tabela 4.14 são apresentadas as médias dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão por tração diametral. Desvios padrão relativos inferiores à 8,23%, indicam a boa reprodutibilidade dos resultados, evidenciado a precisão dos mesmos, com exceção dos CP's de CPII-F-32 curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5% com 70 dias de idade e dos corpos de prova de CPV-ARI-RS curados em câmara úmida com 14 dias de idade.

Da Tabela 4.14 pode-se notar que os resultados não seguem um padrão. Os CP's feitos com cimento CPII-F-32 apresentaram resultados de resistência à compressão por tração diametral superior na cura em câmara úmida. Inverso do apresentado pelos CP's de cimento CPV-ARI-RS. Já para os corpos de prova de

CPIII-40-RS, os resultados foram similares. Tais resultados podem ser explicados pelo cimento CPV-ARI-RS apresentar baixa concentração de  $C_3A$  e maior concentração de escória de alto-forno, o que o torna mais resistente ao ataque de sulfatos (Neville e Brooks, 2013; Mehta e Monteiro, 2014). Diferente do CPII-F-32, que apresenta apenas adições de filer calcário, sendo menos resistente ao ataque de sulfatos.

Tabela 4.14 Média dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão por tração diametral (em MPa).

Cimento Portland	Cura	Idade	Média $\pm$ DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CPII-F-32	H <sub>2</sub> O	14 dias	4,0 $\pm$ 0,1 (3)	1,91
	H <sub>2</sub> O	70 dias	4,3 $\pm$ 0,1 (3)	2,63
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4,1 $\pm$ 0,8 (3)	20,35
CPIII-40-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	3,7 $\pm$ 0,2 (3)	4,34
	H <sub>2</sub> O	70 dias	4,2 $\pm$ 0,1 (3)	3,59
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4,2 $\pm$ 0,3 (3)	7,92
CPV-ARI-RS	H <sub>2</sub> O	14 dias	3,1 $\pm$ 0,5 (3)	14,91
	H <sub>2</sub> O	70 dias	4,0 $\pm$ 0,3 (3)	6,90
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4,3 $\pm$ 0,4 (3)	8,23

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

A Tabela 4.15 mostra os resultados obtidos para a absorção dos corpos de prova de concreto. Os resultados apresentam uma boa precisão, com desvios padrão relativos inferiores a 8,27%, com exceção do resultado obtido para os CP's de CPII-F-32 curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e CPV-ARI-RS curados em câmara úmida.

Os baixos valores de absorção obtidos, evidenciam a baixa permeabilidade dos corpos de prova, ou seja, eles têm uma baixa capacidade de serem atravessados por gases ou líquidos (Coutinho, 1997; Neville e Brooks, 2013). Isto é demonstrado pela proximidade dos valores obtidos para os resultados das resistências à compressão axial e diametral e, módulo de elasticidade, em relação ao tipo de cura.

Tabela 4.15 Média dos resultados para o ensaio de absorção do CP's de concreto (em %).

Cimento Portland	Cura	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,12 ± 0,15 (3)	13,46
	H <sub>2</sub> O	1,54 ± 0,11 (3)	6,89
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,97 ± 0,08 (3)	8,27
	H <sub>2</sub> O	1,27 ± 0,04 (3)	3,30
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,96 ± 0,05 (3)	5,34
	H <sub>2</sub> O	1,26 ± 0,14 (3)	10,77

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

#### 4.5 CONCLUSÕES DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Com a avaliação dos resultados obtidos, esperava-se que os corpos de prova submetidos ao ataque por sulfatos apresentassem resultados inferiores de resistências à compressão, tração e flexão. Porém não foi o observado no presente estudo. Tais resultados podem ser explicados:

- pelo pequeno período de tempo em que os CP's ficaram em contato com a solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%, pois a reação de ataque por sulfatos é uma reação lenta;
- pela elevada temperatura, aumentando a resistência dos corpos de provas;
- pelo fato de estarem submersos em água (mesmo com íons sulfatos presentes), proporcionando, assim, uma hidratação contínua e adequada;
- pela baixa absorção dos corpos de prova.

Em contrapartida, na análise em escala micrométrica foi possível visualizar a formação de cristais de etringita e gipsita. Então, a cura em solução de sulfatos mostrou resultados esperados. Porém, tais formações não ocorreram de forma suficiente para influenciar nas propriedades mecânicas dos corpos de prova.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Durante o trabalho foi realizada uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema para elucidação dos estudos desenvolvidos sobre o mesmo. Nesta revisão pode-se encontrar diversos trabalhos que abordaram o tema. À luz desta revisão, decidiu-se por realizar estudos experimentais complementares e em diversos tipos de produtos cimentícios para evidenciar o ataque por sulfato nos mesmos. Assim, este estudo teve o objetivo de elucidar as manifestações deletérias dos íons sulfato em produtos cimentícios. Para investigar esta hipótese, foram feitas campanhas experimentais.

Nas campanhas experimentais, foram moldados corpos de prova de pasta de cimento, argamassa e de concreto. Separados em dois grupos: grupo controle submetido a cura em câmara úmida e grupo submetido a exposição de solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%. Após 57 dias submetidos ao ataque por sulfatos, os corpos de prova foram ensaiados quanto a: velocidade de propagação de ultrassom, dureza superficial, absorção, módulo de elasticidade, resistência à compressão axial, resistência à tração diametral, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios x.

Os resultados obtidos dos ensaios, puderam evidenciar a formação de produtos intrínsecos ao ataque por sulfatos, como a etringita e gipsita. Mas ainda há a necessidade de uma maior exposição a solução de íons sulfatos para elucidar de forma mais veemente as manifestações deletérias dos sulfatos em produtos cimentícios.

Os resultados da segunda campanha experimental, com os corpos de prova submetidos a um período maior de exposição à solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%, ainda foram semelhantes aos resultados obtidos para a primeira campanha experimental. Assim, como já indicado, seria necessário um tempo de exposição mais prolongado com íons sulfatos.

Este estudo pode demonstrar que mesmo em pequenas concentrações e por períodos curtos de exposição aos íons sulfato, os produtos cimentícios apresentam manifestações a tal exposição. Assim, a engenharia civil deve se preocupar com o ataque destes íons em produtos cimentícios.



## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para futuros estudos, sugere-se a elaboração de experimentos com um prazo de duração maior; realização de ensaios com um maior número de amostras para cada variante estudada; diferentes consumos de cimento; variação da relação água/cimento, considerando a porosidade dos corpos de prova; diferentes métodos de ataque de sulfatos, como ciclos de secagem e molhagem, intensificando assim, o ataque pelos íons sulfatos e; a utilização de diferentes fontes de sulfatos, como: sulfato de magnésio, sulfato de cálcio e sulfato de cobre.

A temperatura foi uma variável que não foi considerada para a comparação entre os resultados pois somente os corpos de prova submetidos ao ataque de sulfatos estavam à temperatura elevada. Assim, vale ressaltar que para estudos futuros os corpos de prova sejam submetidos as mesmas temperaturas de cura para minimizar a influência desta variável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 201.2R. 2009, Manual of Concrete Practice. Parte 1.

ACI 234R-26. 2009, Manual of Concrete Practice. Parte 1.

ANDRADE, Tibério; SILVA, Angelo Just da Costa e – Patologia das Estruturas. In Isaia, Geraldo C. – *Instituto Brasileiro do Concreto: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2005. (V. 2).

ARAÚJO, Georgia Serafim; CHINCHÓN, Sebastian; AGUADO, Antonio. – Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack. Ibracon Structures And Materials Journal. Espírito Santo, 2008. Vol. 1, nº 1, p.1-14.

ABNT NBR 5733. 1991, Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 5737. 1992, Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 5738. 2015, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 5739. 2007, Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 7211. 2009, Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 7222. 2010, Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8522. 2008, Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8802. 2013, Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro.

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

ABNT NBR 11578. 1991, Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 12655. 2015, Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15823-2. 2010, Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15900. 2009, Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 53. 2009, Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro.

ABNT NBR NM 248. 2003, Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

ATAHAN, Hakan Nuri; ARSLAN, Koray Mehmet. – Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives. Sustainable Cities And Society. Vol. 22 (2016), p.40-48. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.008>.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão – **Materiais de construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 2011. ISBN 978-85-21612-49-0.

CAMARINI, Gladis; CINCOTTO, Maria Alba. – Efeito da Cura Térmica na Resistência de Argamassas de Cimento Portland Comum e de Alto-Forno. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1995.

COSTA, Rodrigo Moysés. – Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV. Belo Horizonte: [s.n.], 2004. Tese de doutorado.

COUTINHO, A. de Sousa – **Fabrico e propriedades do betão**. 3. ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. Vol. 1. ISBN 978-97-24903-26-2.

GENOVÉS, V.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; EIRAS, J.; PAYÁ, J. – Preliminary study on short-term sulphate attack evaluation by non-linear impact resonance acoustic spectroscopy technique. Construction And Building Materials. Vol. 78 (2015), p.295-302. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.016>.

GOMIDES, Maria de Jesus. – Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto. Porto Alegre: [s.n.], 2009. Tese de doutorado.

JIANG, Lei; NIU, Ditao; YUAN, Lidong; FEI, Qiannan. – Durability of concrete under sulfate attack exposed to freeze–thaw cycles. Cold Regions Science And Technology. Vol. 112 (2015), p.112-117. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.12.006>.

LINHARES, Bruno Tasca de. – Avaliação do desempenho de cimentos CII E e CII F com diferentes teores de pozolanas frente ao ataque de íons sulfato. Porto Alegre: [s.n.], 2010. Tese de graduação.

LIU, Tiejun; ZOU, Dujian; TENG, Jun; YAN, Guilan. – The influence of sulfate attack on the dynamic properties of concrete column. Construction And Building Materials. China. n° 28 (2011), p.201-207.

MAES, Mathias; BELIE, Nele de. – Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. Cement & Concrete Composites. Bélgica. n° 53 (2014), p.58-72.

MAKHLOUFI, Z; AGGOUN, S.; BENABED, B.; KADRI, E. H.; BEDERINA, M. – Effect of magnesium sulfate on the durability of limestone mortars based on quaternary blended cements. Cement And Concrete Composites. França Vol. 65 (2016), p.186-199.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. – **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk/IBRACON, 2014. ISBN 978-85-98576-21-3.

NEHDI, M.L.; SULEIMAN, A.R.; SOLIMAN, A.M. – Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack. Cement And Concrete Research. Vol. 64 (2014), p.42-53. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.002>.

NEVILLE, Adam M. – **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. ISBN 978-85-8260-365-9.

NEVILLE, Adam M; BROOKS, J J. – **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-071-9.

PERES, Luciano Donizeti Pantano. – Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo método da maturidade: Estudo de caso. Ilha Solteira: [s.n.], 2006. Tese de mestrado.

PINHEIRO-ALVES, Maria Teresa; GOMÀ, Ferrán; JALALI, Said. – Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos. Actas do Congresso Construção, Coimbra, 2007.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. – Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland - estudo em pasta. São Paulo: [s.n.], 2008. Tese de doutorado.

RAHMAN, M.M.; BASSUONI, M.T. – Thaumassite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation. Construction And Building Materials. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.034. Vol. 73 (2014), p.652-662.

ROMANO, Pedro; BRITO, Paulo S. D. – Estudo da degradação de estruturas de betão armado expostos ao ataque por sulfatos. Actas do III Seminário de I&DT, Porto Alegre, 2012.

SCHAEFER, Cecília Ogliari; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. – Valorização de fontes de sulfato de cálcio em argamassas fluidas. Actas do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Canelas, 2010.

SECCO, Michele; LAMPRONTI, Giulio Isacco; SCHLEGEL, Moritz-Caspar; MARITAN, Lara; ZORZI, Federico. – Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate-phosphate attack. Cement And Concrete Research. Vol. 68 (2015), p.49-63. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.023>.

SILVEIRA, Adriana Augustin. – A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos. Porto Alegre: [s.n.], 1996. Tese de mestrado.

SKAROPOULOU, A.; SOTIRIADIS, K.; KAKALI, G.; TSIVILIS, S. – Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack. Cement And Concrete Composites. Vol. 37 (2013), p.267-275. [Consult. 02 Mar. 2016]. Disponível na <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.007>.

SOTIRIADIS, K.; NIKOLOPOULOU, E.; TSIVILIS, S.; PAVLOU, A.; CHANIOTAKIS, E.; SWAMY, R. N. – The effect of chlorides on the thaumasite form of sulfate attack of limestone cement concrete containing mineral admixtures at low temperature. Construction And Building Materials. Grécia. Vol. 43 (2013), p.156-164.

SOUZA, Rui Barbosa de. – Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos - Método de ensaio acelerado. São Paulo: [s.n.], 2006. Tese de mestrado.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. – **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 2001. ISBN 85-7266-096-8.

TANYILDIZI, Harun. – The investigation of microstructure and strength properties of lightweight mortar containing mineral admixtures exposed to sulfate attack. Measurement. Turquia. Vol. 77 (2016), p.143-154.

TAVARES, A. M. G.; ANDRADE JÚNIOR, M. A. S.; CESTARI, A. R.; VIEIRA, E. F. S. – Síntese e caracterização de pasta de cimento aditivadas com resinas epóxi - análises cinéticas, termodinâmicas e calorimétricas. Actas do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos do Jordão, 2010.

ZHANG, Minghua; CHEN, Jiankang; LV, Yunfeng; WANG, Dongjie; YE, Jian. – Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate–chloride ions. Construction And Building Materials. China. n. 39 (2013), p.26-32.



Tabela I.2 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão.

Data da Moldagem		23/03/2016	Idade		71 dias					
Data do Ensaio		02/06/2016	OBS.: Aresta a --> Face do prisma metálico							
Composição da argamas:		1:3:0,52	Aresta b --> Face irregular do CP.							
Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas			Carga à Compressã o (kgf)	Resistência à Compressão			
			Aresta a (cm)	Aresta b (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	Mpa		
1.1	CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,242	17,129	7680	448,4	44,8		
1.2			4,038	4,204	16,976	6260	368,8	36,9		
2.1			4,038	4,238	17,113	6060	354,1	35,4		
2.2			4,038	4,271	17,246	4920	285,3	28,5		
3.1			4,038	4,117	16,624	4360	262,3	26,2		
3.2			4,038	4,181	16,883	4500	266,5	26,7		
4.1		H <sub>2</sub> O	4,038	4,174	16,855	6100	361,9	36,2		
4.2			4,038	4,161	16,802	5820	346,4	34,6		
5.1			4,038	4,143	16,729	5960	356,3	35,6		
5.2			4,038	4,199	16,956	6560	386,9	38,7		
6.1			CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,091	16,519	6760	409,2	40,9
6.2					4,038	4,165	16,818	6200	368,6	36,9
7.1	4,038	4,066			16,419	7200	438,5	43,9		
7.2	4,038	4,086			16,499	7200	436,4	43,6		
8.1	4,038	4,177			16,867	7040	417,4	41,7		
8.2	4,038	4,183			16,891	6960	412,1	41,2		
9.1	H <sub>2</sub> O	4,038		4,206	16,984	6640	391,0	39,1		
9.2		4,038		4,250	17,162	5820	339,1	33,9		
10.1		4,038		4,137	16,705	6060	362,8	36,3		
10.2		4,038		4,205	16,980	5960	351,0	35,1		
11.1	CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,302	17,371	6860	394,9	39,5		
11.2			4,038	4,325	17,464	6540	374,5	37,4		
12.1			4,038	4,245	17,141	6820	397,9	39,8		
12.2			4,038	4,226	17,065	6820	399,7	40,0		
13.1			4,038	4,235	17,101	6540	382,4	38,2		
13.2			4,038	4,222	17,048	6100	357,8	35,8		
14.1		H <sub>2</sub> O	4,038	4,287	17,311	5220	301,5	30,2		
14.2			4,038	4,304	17,380	4960	285,4	28,5		
15.1			4,038	4,182	16,887	5760	341,1	34,1		
15.2			4,038	4,245	17,141	5380	313,9	31,4		

Tabela I.3 Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto

Data da Moldagem 30/03/2016

Idade

Data do Ensaio 08/06/2016

70 dias

l0 0,10 m

Cimento Portland	CP	Carga (kgf)	Leitura Média ( $\Delta l \times 10^{-6}$ m)	Diâmetro Médio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidade (GPa)	Cura
CPV-ARI-RS	5	400	6	9,98	78,23	31,6	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		11900	52,5				
	8	400	1,5	10,03	79,01	36,8	
		11900	41,0				
	4	400	3,5	9,98	78,23	30,5	H <sub>2</sub> O
		10900	47,5				
11	400	1,5	9,97	78,07	26,4		
	10900	52,5					
CPIII-40-RS	39	400	4	10,02	78,85	41,6	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		12200	40,0				
	44	400	1	9,97	78,07	39,3	
		12200	39,5				
	46	400	5	9,91	77,13	32,2	H <sub>2</sub> O
		11200	48,5				
52	400	3,5	9,93	77,44	35,3		
	11200	43,0					
CPII-F-32	31	400	3	10,00	78,54	35,2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		12300	46,0				
	32	400	2	10,01	78,70	34,8	
		12300	45,5				
	27	400	7	9,96	77,91	30,1	H <sub>2</sub> O
		12000	56,5				
35	400	4	9,95	77,76	33,9		
	12000	48,0					



Tabela I.4 Resultado do ensaio de absorção dos corpos de prova de concreto.

Cimento Portland	Tipo de Cura	Peso Seco (g)	Peso Saturado (g)	Absorção (%)
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1982,3	2001,4	0,96
		1992,4	2010,1	0,89
		1745,7	1760,8	0,86
	H <sub>2</sub> O	2016,7	2042,1	1,26
		1862,4	1882,5	1,08
		1754,7	1778,3	1,34
CPII-F-32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2133,3	2157,2	1,12
		1887,3	1914,1	1,42
		1940,2	1965,4	1,30
	H <sub>2</sub> O	1501,1	1524,2	1,54
		1874,2	1900,9	1,42
		1785,9	1809,6	1,33
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2025,3	2044,9	0,97
		1799,1	1816,2	0,95
		1932,6	1953,8	1,10
	H <sub>2</sub> O	1946,0	1970,8	1,27
		1927,3	1952,6	1,31
		1823,2	1845,6	1,23

Tabela I.5 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPII-F-32).

<b>Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico</b>						
Data da Moldagem		30/03/2016		Idade		
Data do Ensaio		08/06/2016		70 dias		
Composição da argamassa		1:2:3:0,52				
Cimento Portland		CPII-F-32				
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
29	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,93	77,44	41000	529,41	52,9
32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,01	78,70	41300	524,80	52,5
31	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,00	78,54	42700	543,67	54,4
27	H <sub>2</sub> O	9,96	77,91	39800	510,83	51,1
28	H <sub>2</sub> O	10,00	78,54	40000	509,30	50,9
35	H <sub>2</sub> O	9,95	77,76	38400	493,85	49,4
<b>Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
20	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,99	20,29	15600	48,996	4,9
21	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,02	19,97	10200	32,451	3,2
22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,97	20,01	12700	40,527	4,1
19	H <sub>2</sub> O	9,99	19,96	13700	43,740	4,4
25	H <sub>2</sub> O	10,00	19,49	12900	42,136	4,2
34	H <sub>2</sub> O	9,96	19,60	13600	44,351	4,4
<b>Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percurso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
29	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2376	20,00	42,9	4662	51,6
31	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2376	20,00	43,8	4566	49,5
32	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2376	20,00	43,0	4651	51,3
27	H <sub>2</sub> O	2376	20,00	41,8	4784	54,3
28	H <sub>2</sub> O	2376	20,00	42,7	4683	52,0
35	H <sub>2</sub> O	2376	20,00	41,8	4784	54,3

Coeficiente de Poisson 0,2

Tabela I.6 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPIII-40-RS).

<b>Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico</b>						
Data da Moldagem		30/03/2016		Idade		
Data do Ensaio		08/06/2016		70 dias		
Composição da argamassa		1:2:3:0,52				
Cimento Portland		CPIII-40-RS				
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
39	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,02	78,85	40100	508,53	50,9
41	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,99	78,38	40500	516,69	51,7
44	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,97	78,07	37000	473,94	47,4
40	H <sub>2</sub> O	9,98	78,23	37200	475,55	47,6
46	H <sub>2</sub> O	9,91	77,13	38200	495,25	49,5
52	H <sub>2</sub> O	9,93	77,44	36300	468,73	46,9
<b>Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
38	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,99	20,16	12000	37,93	3,8
42	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,98	20,28	13800	43,41	4,3
53	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,07	19,45	13500	43,88	4,4
37	H <sub>2</sub> O	9,98	20,16	13700	43,35	4,3
43	H <sub>2</sub> O	10,02	20,46	13400	41,61	4,2
49	H <sub>2</sub> O	10,01	19,38	12300	40,36	4,0
<b>Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percorso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
39	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2403	20,00	43,4	4608	51,0
41	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2403	20,00	42,1	4750	54,2
44	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2403	20,00	42,4	4716	53,4
40	H <sub>2</sub> O	2403	20,00	42,0	4761	54,4
46	H <sub>2</sub> O	2403	20,00	42,2	4739	53,9
52	H <sub>2</sub> O	2403	20,00	42,4	4716	53,4

Coeficiente de Poisson = 0,2

Tabela I.7 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 70d (CPV-ARI-RS).

<b>Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico</b>						
Data da Moldagem		30/03/2016		Idade		
Data do Ensaio		08/06/2016		70 dias		
Composição da argamassa		1:2:3:0,52				
Cimento Portland		CPV-ARI-RS				
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,05	79,33	36900	465,16	46,5
5	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,98	78,23	40000	511,34	51,1
8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,03	79,01	39600	501,19	50,1
11	H <sub>2</sub> O	9,97	78,07	36400	466,25	46,6
4	H <sub>2</sub> O	9,98	78,23	37600	480,66	48,1
16	H <sub>2</sub> O	9,98	78,23	36200	462,76	46,3

<b>Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,99	20,29	15000	47,11	4,7
9	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9,99	20,03	12700	40,41	4,0
13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,05	20,33	13400	41,75	4,2
1	H <sub>2</sub> O	9,97	20,31	11600	36,47	3,6
7	H <sub>2</sub> O	9,96	20,36	13200	41,44	4,1
10	H <sub>2</sub> O	9,98	20,11	12900	40,92	4,1

<b>Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico</b>						
Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percorso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2370	20,00	43,1	4640	51,0
5	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2370	20,00	42,6	4694	52,2
8	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2370	20,00	42,7	4683	51,9
4	H <sub>2</sub> O	2370	20,00	43,2	4629	50,7
11	H <sub>2</sub> O	2370	20,00	44,5	4494	47,8
16	H <sub>2</sub> O	2370	20,00	44,8	4464	47,2

Coeficiente de Poisson 0,2

Tabela I.8 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPII-F-32).

**Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico**

<b>Data da Moldagem</b>	30/03/2016	<b>Idade</b>
<b>Data do Ensaio</b>	13/04/2016	14 dias
<b>Composição da argamassa</b>	1:2:3:0,52	
<b>Cimento Portland</b>	CPII-F-32	

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
30	H <sub>2</sub> O	10,10	80,12	34600	431,86	43,19
33	H <sub>2</sub> O	10,00	78,54	34200	435,45	43,54
36	H <sub>2</sub> O	10,04	79,17	32900	415,56	41,56

**Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
23	H <sub>2</sub> O	10,01	19,92	12500	39,91	3,99
24	H <sub>2</sub> O	10,00	19,72	12400	40,03	4,00
26	H <sub>2</sub> O	10,00	19,73	12800	41,30	4,13

**Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percorso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
23	H <sub>2</sub> O	2376	19,92	44,0	4545	44,1
24	H <sub>2</sub> O	2376	19,72	43,7	4576	44,7
26	H <sub>2</sub> O	2376	19,73	44,1	4535	43,9
30	H <sub>2</sub> O	2376	20,05	43,5	4597	45,1
33	H <sub>2</sub> O	2376	19,77	44,7	4474	42,7
36	H <sub>2</sub> O	2376	19,87	43,8	4566	44,5

Coeficiente de Poisson 0,2

Tabela I.9 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPIII-40-RS).

**Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico**

<b>Data da Moldagem</b>	30/03/2016	<b>Idade</b>
<b>Data do Ensaio</b>	13/04/2016	14 dias
<b>Composição da argamassa</b>	1:2:3:0,52	
<b>Cimento Portland</b>	CPIII-40-RS	

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
48	H <sub>2</sub> O	9,97	78,07	30500	390,68	39,07
50	H <sub>2</sub> O	10,03	79,01	25800	326,53	32,65
51	H <sub>2</sub> O	9,94	77,60	29600	381,44	38,14

**Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
45	H <sub>2</sub> O	10,00	20,02	11200	35,62	3,56
47	H <sub>2</sub> O	9,94	19,99	12000	38,45	3,84
54	H <sub>2</sub> O	10,06	19,93	12100	38,42	3,84

**Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percurso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
45	H <sub>2</sub> O	2403	20,02	44,3	4514	44,0
47	H <sub>2</sub> O	2403	19,99	44,6	4484	43,4
48	H <sub>2</sub> O	2403	19,99	44,0	4545	44,6
50	H <sub>2</sub> O	2403	19,88	44,6	4484	43,4
51	H <sub>2</sub> O	2403	19,69	44,3	4514	44,0
54	H <sub>2</sub> O	2403	19,93	44,4	4504	43,8

Coeficiente de Poisson 0,2

Tabela I.10 Resultados dos ensaios nos corpos de prova de concreto aos 14d (CPV-ARI-RS).

**Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndrico**

<b>Data da Moldagem</b>	30/03/2016	<b>Idade</b>
<b>Data do Ensaio</b>	13/04/2016	14 dias
<b>Composição da argamassa</b>	1:2:3:0,52	
<b>Cimento Portland</b>	CPV-ARI-RS	

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
		Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
6	H <sub>2</sub> O	10,06	79,49	28000	352,27	35,23
14	H <sub>2</sub> O	10,06	79,49	28500	358,56	35,86
17	H <sub>2</sub> O	10,01	78,70	25700	326,57	32,66

**Ensaio de resistência à tração diametral em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Medidas (cm)		Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		Diâmetro	Altura		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
12	H <sub>2</sub> O	10,00	19,94	8000	25,54	2,55
15	H <sub>2</sub> O	10,00	19,82	10600	34,05	3,40
18	H <sub>2</sub> O	10,00	20,00	10300	32,79	3,28

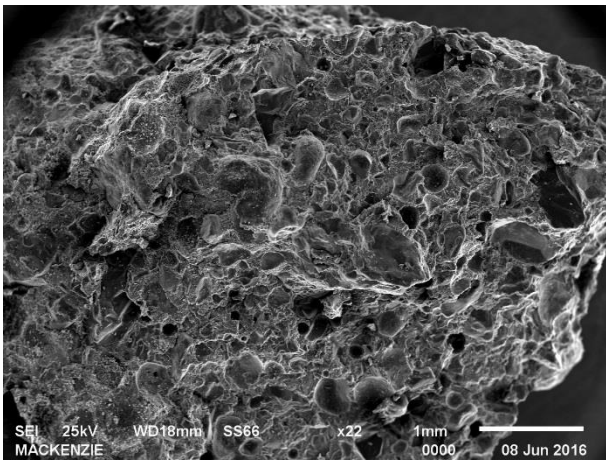
**Ensaio de Propagação de Onda Ultrassônica em corpos de prova cilíndrico**

Nº do CP	Tipo de Cura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Comprimento (Altura) (cm)	Tempo de Percorso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de Elasticidade (GN/m <sup>2</sup> )
6	H <sub>2</sub> O	2370	19,88	45,6	4385	41,0
12	H <sub>2</sub> O	2370	19,94	46,1	4338	40,1
14	H <sub>2</sub> O	2370	19,87	45,5	4395	41,1
15	H <sub>2</sub> O	2370	19,82	45,0	4444	42,1
17	H <sub>2</sub> O	2370	19,86	45,2	4424	41,7
18	H <sub>2</sub> O	2370	20,00	44,9	4454	42,3

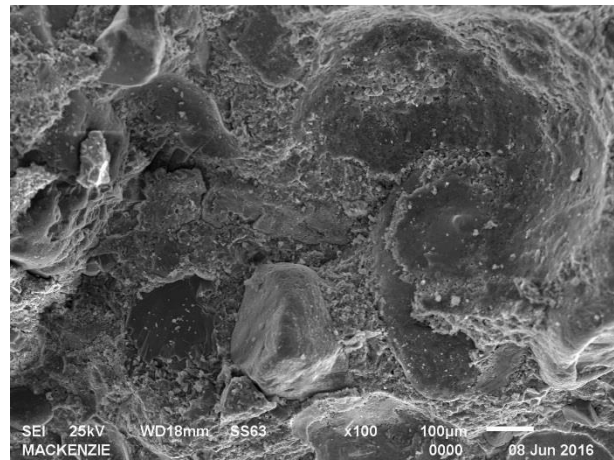
Coeficiente de Poisson 0,2

## **Anexo II RESULTADO DAS ANÁLISES NO MEV**

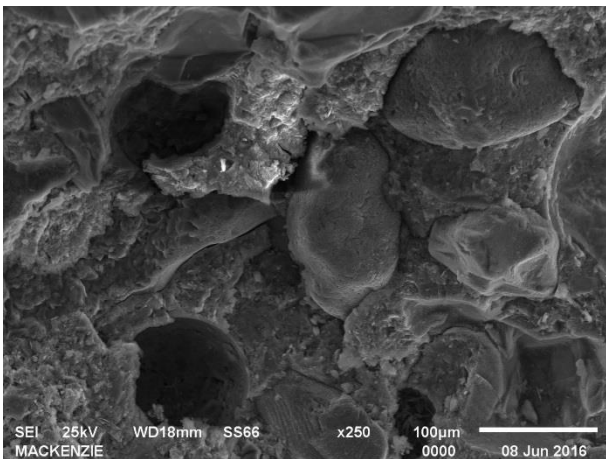




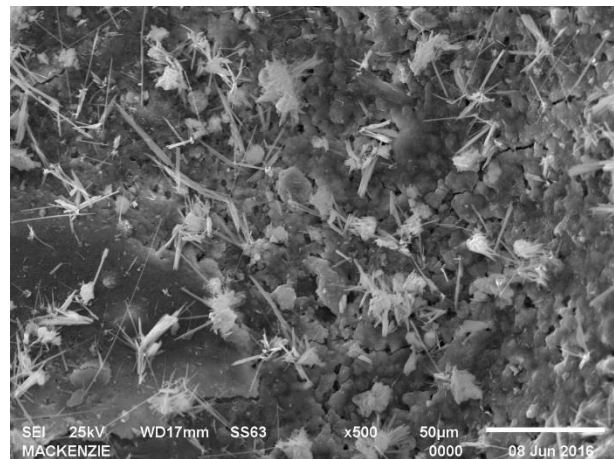
(a) aumento 22x



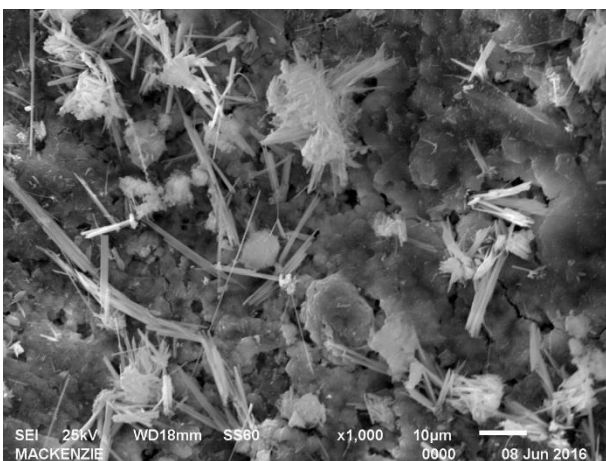
(b) aumento 100x



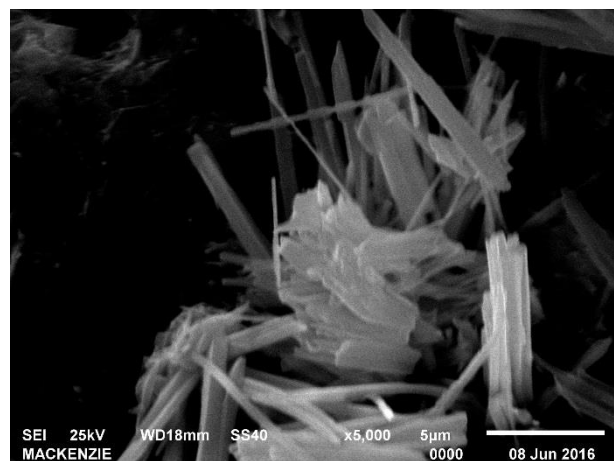
(c) aumento 250x



(d) aumento 500x

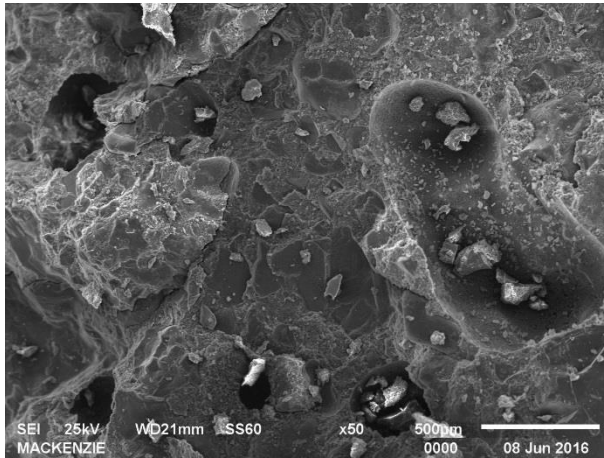


(e) aumento 1000x

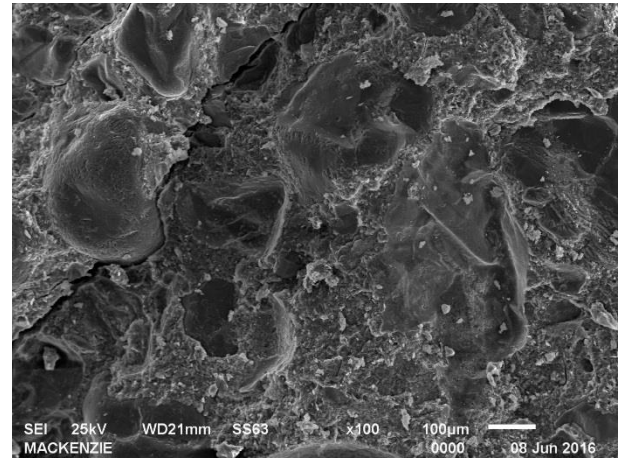


(f) aumento 5000x

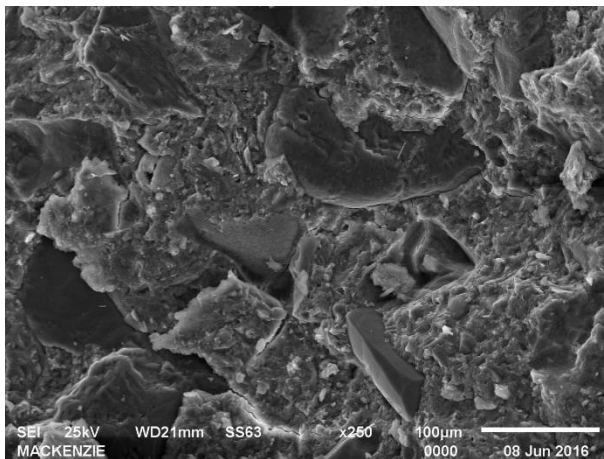
Figura II.1 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



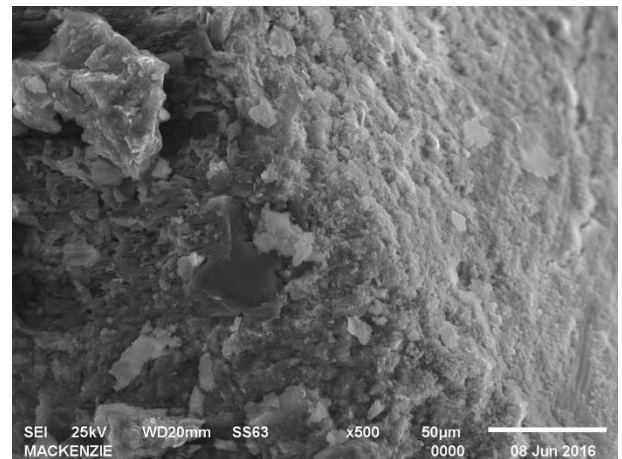
(a) aumento 50x



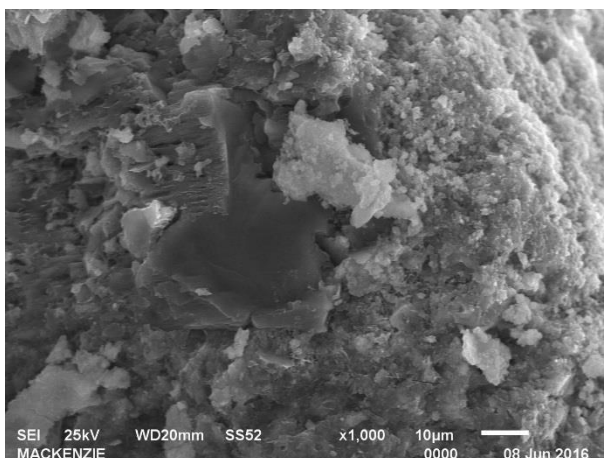
(b) aumento 100x



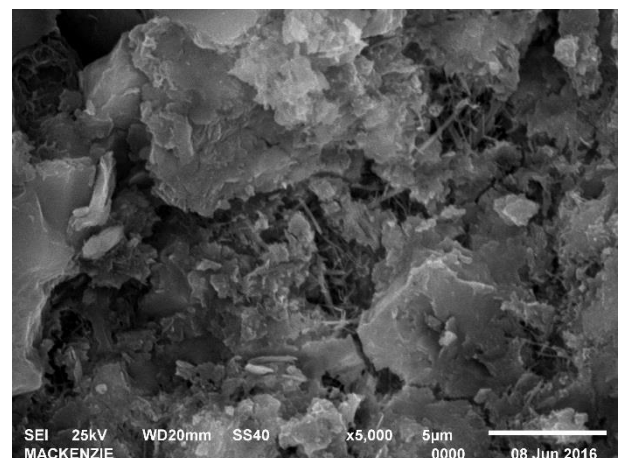
(c) aumento 250x



(d) aumento 500x



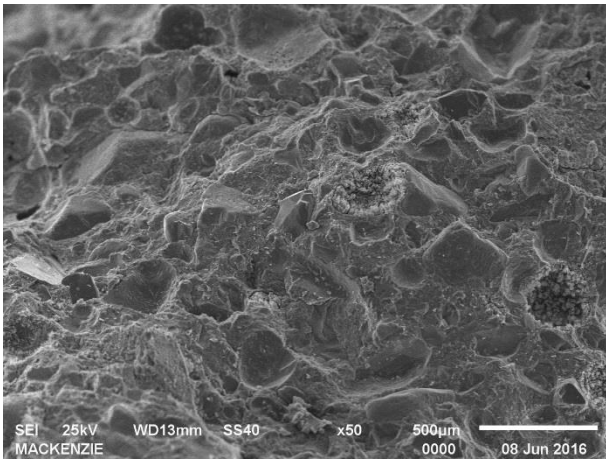
(e) aumento 1000x



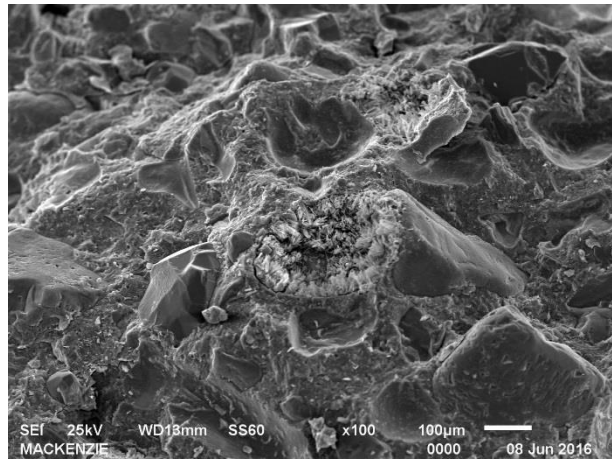
(f) aumento 5000x

Figura II.2 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CPII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.

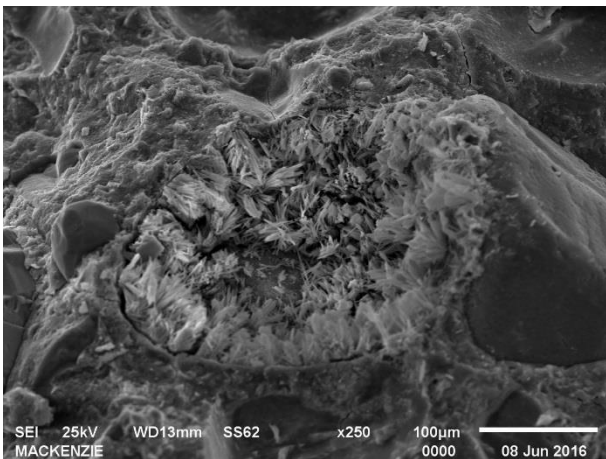
(continua)



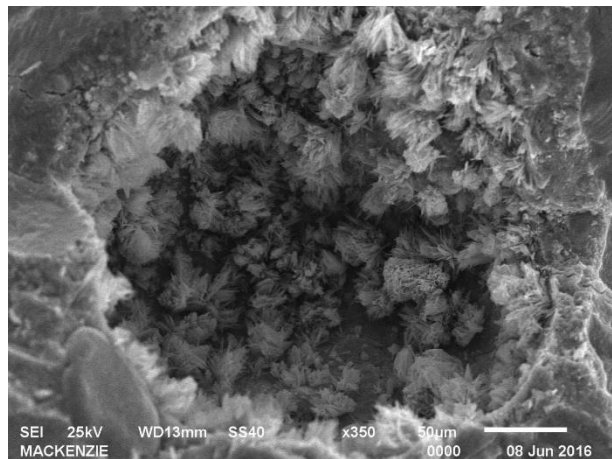
(a) aumento 50x



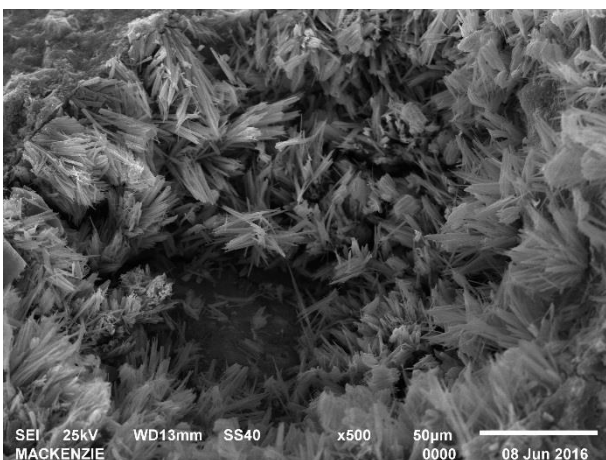
(b) aumento 100x



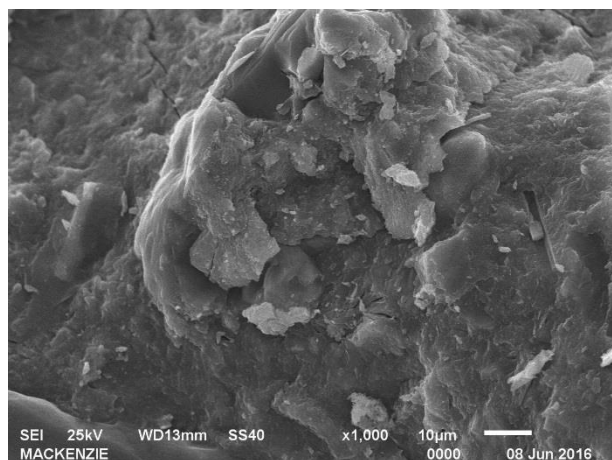
(c) aumento 250x



(d) aumento 350x

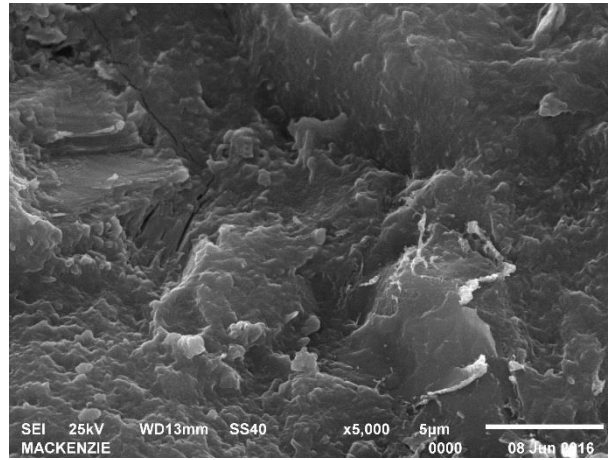


(e) aumento 500x



(f) aumento 1000x

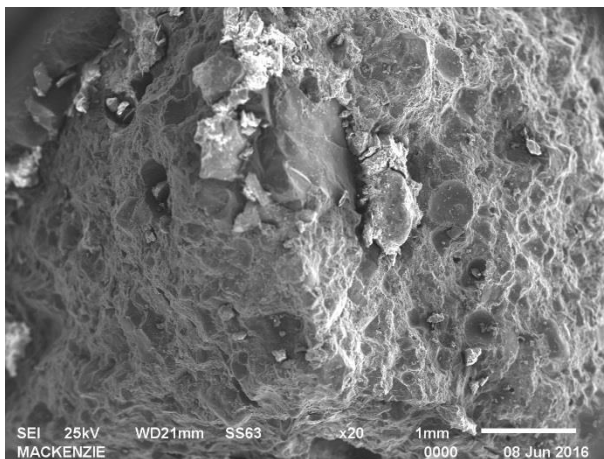
(continuação)



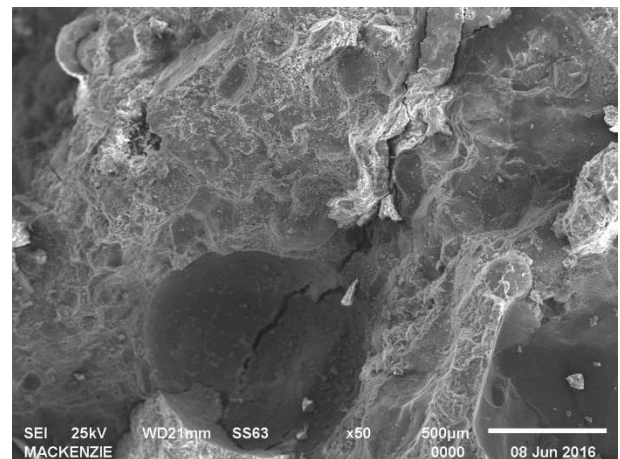
(g) aumento 5000x

Figura II.3 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

(continua)

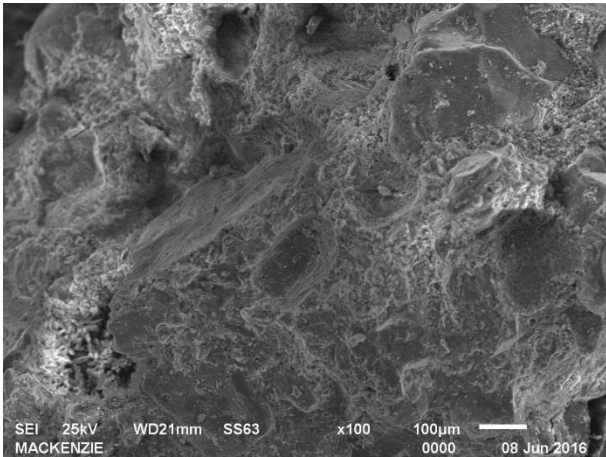


(a) aumento 20x

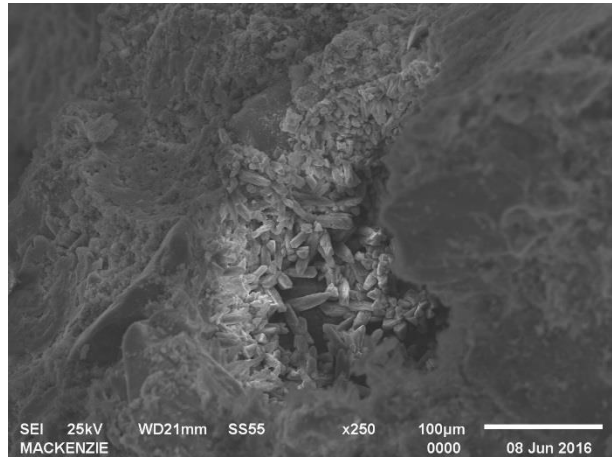


(b) aumento 50x

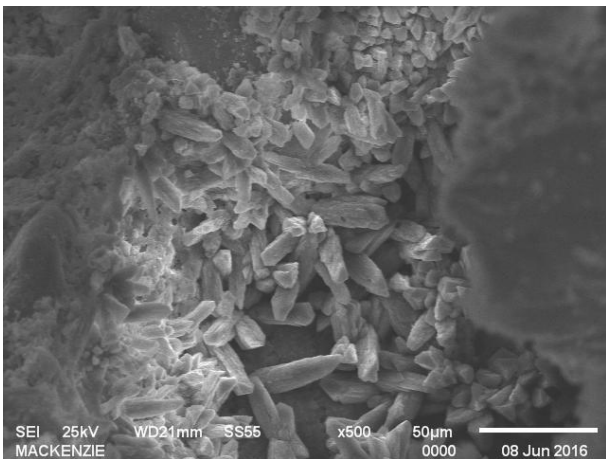
(continuação)



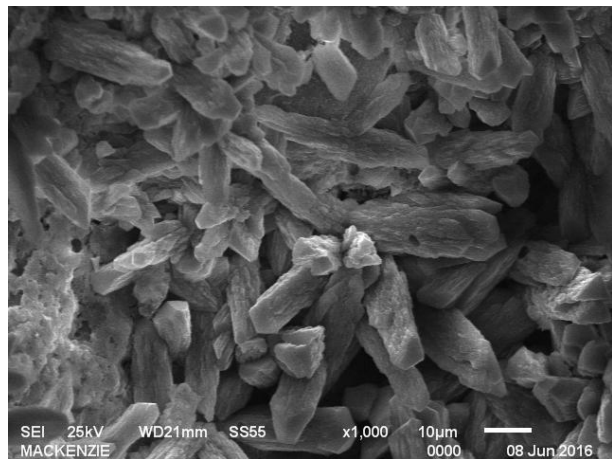
(c) aumento 100x



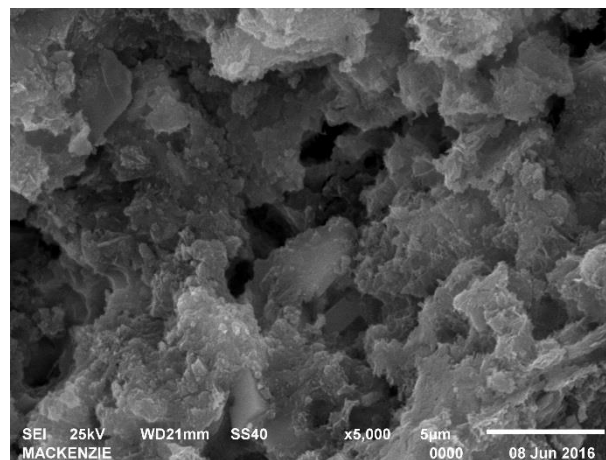
(d) aumento 250x



(e) aumento 500x



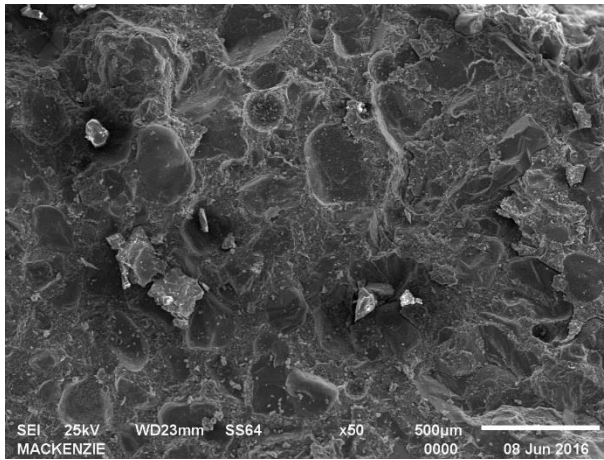
(f) aumento 1000x



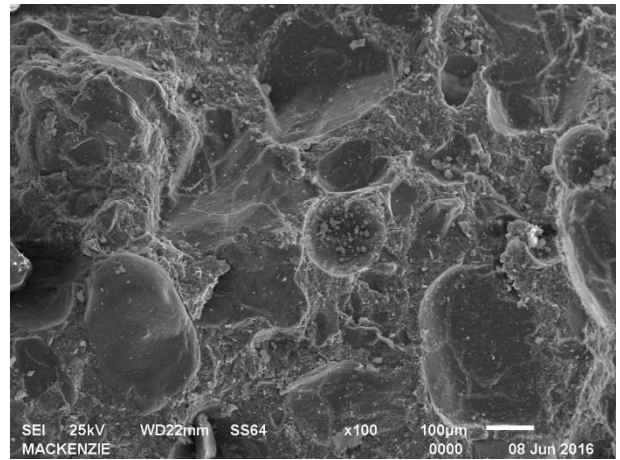
(g) aumento 5000x

Figura II.4 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CPIII-40-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

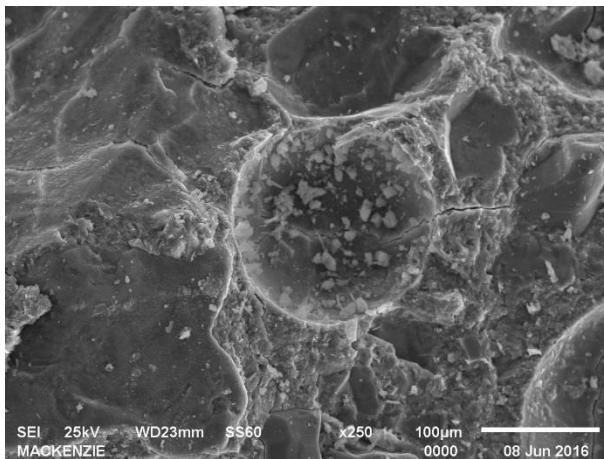
(continua)



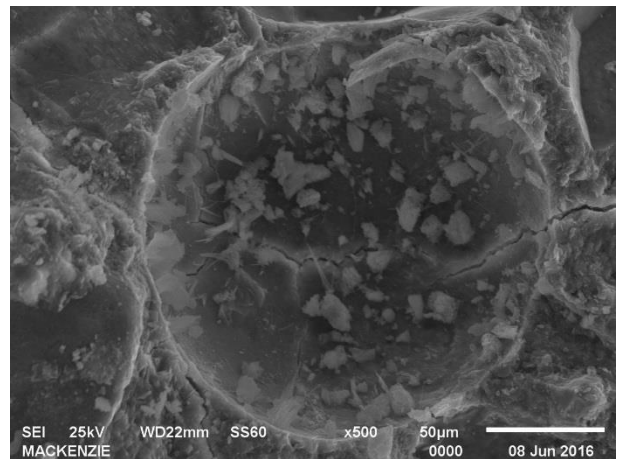
(a) aumento 50x



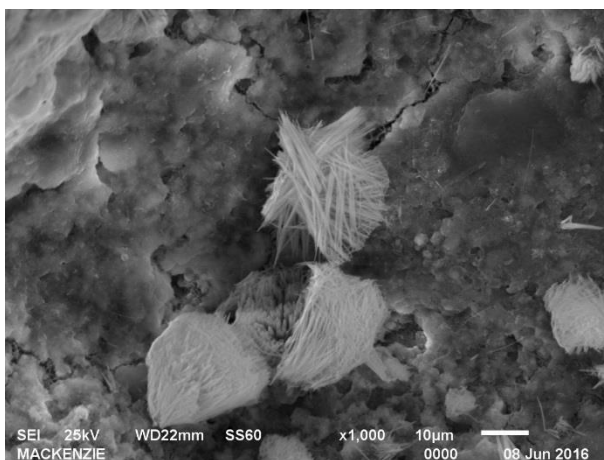
(b) aumento 100x



(c) aumento 250x



(d) aumento 500x

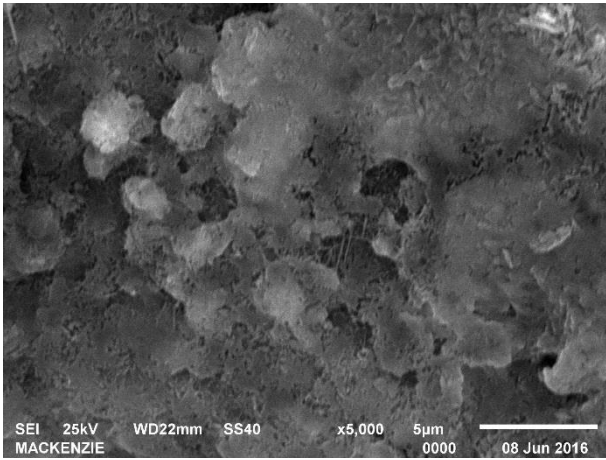


(e) aumento 1000x

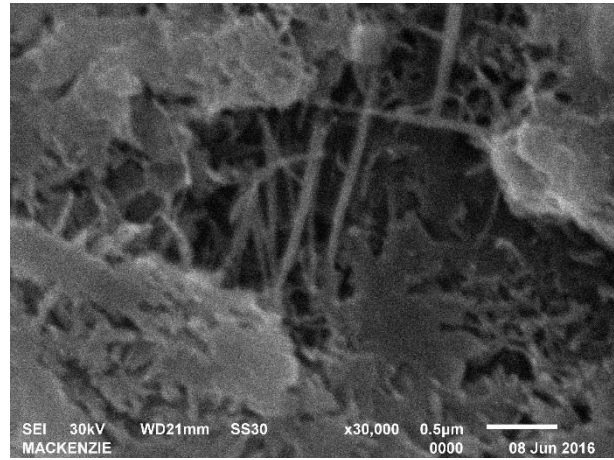


(f) aumento 2500x

(continuação)



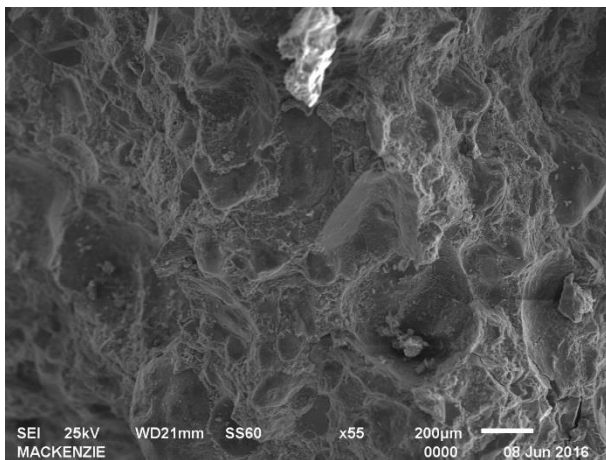
(g) aumento 5000x



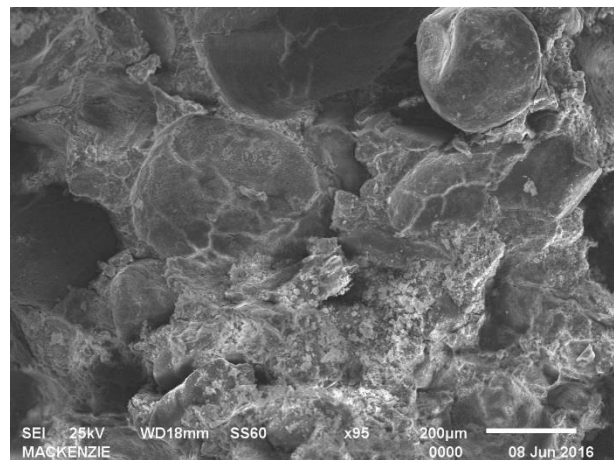
(h) aumento 30000x

Figura II.5 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

(continua)

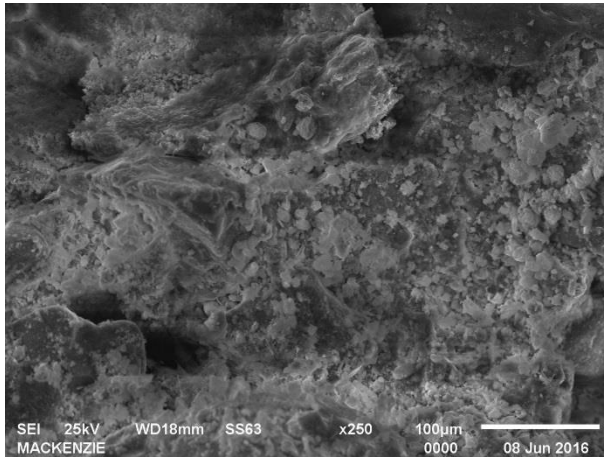


(a) aumento 55x

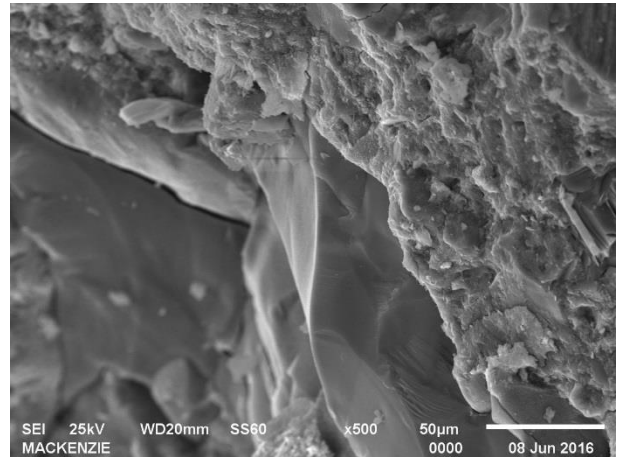


(b) aumento 100x

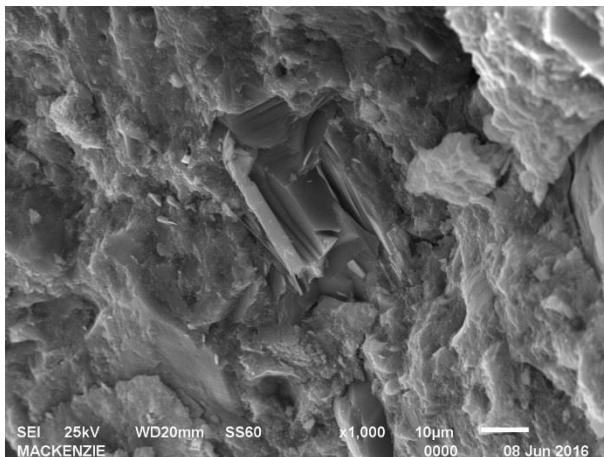
(continuação)



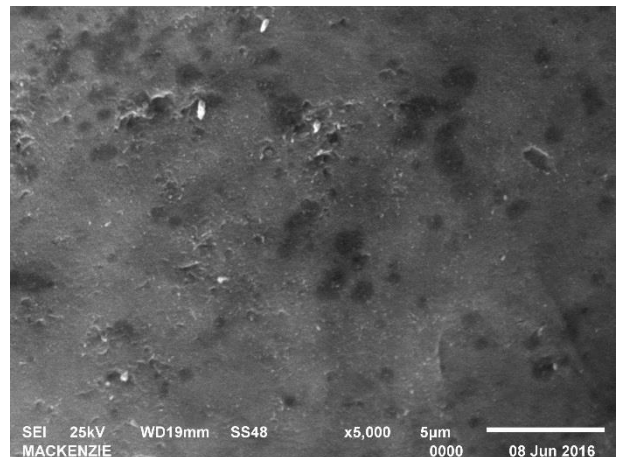
(c) aumento 250x



(d) aumento 500x



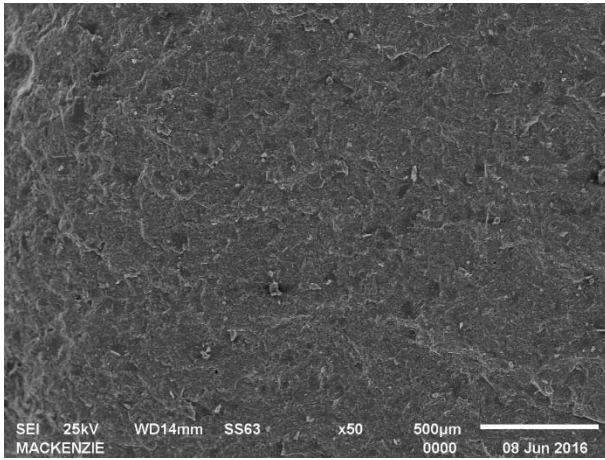
(e) aumento 1000x



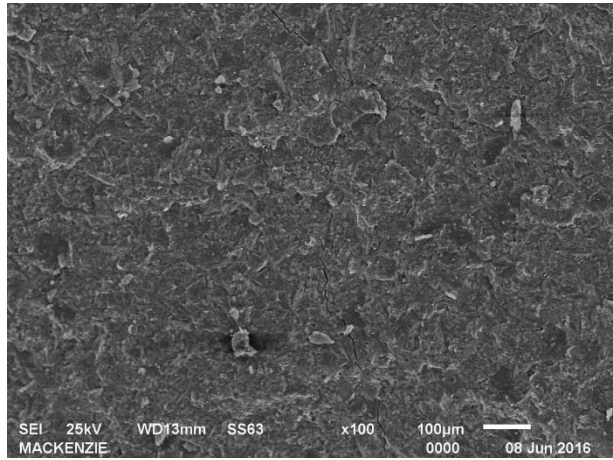
(f) aumento 5000x

Figura II.6 Micrografia dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

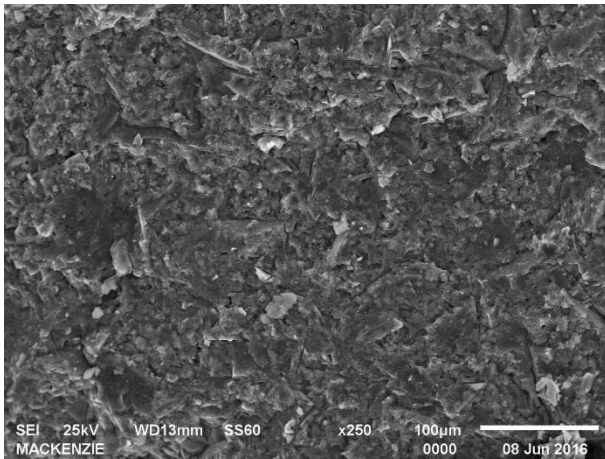




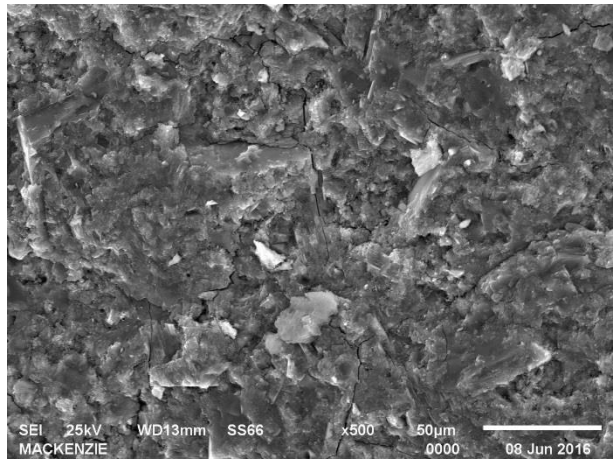
(a) aumento 50x



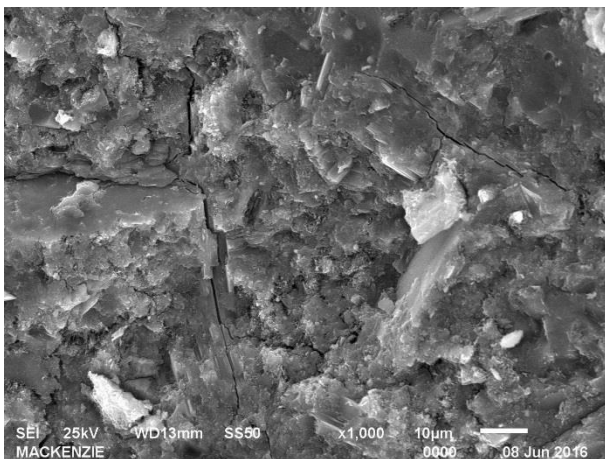
(b) aumento 100x



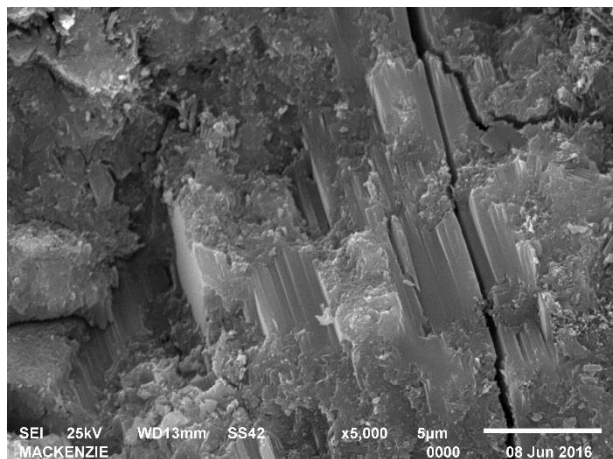
(c) aumento 250x



(d) aumento 500x

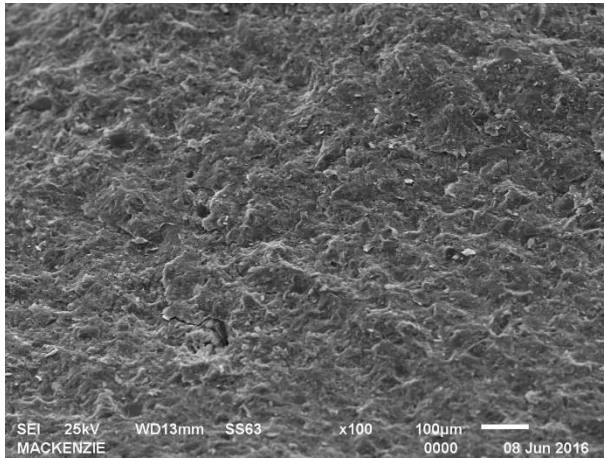


(e) aumento 1000x

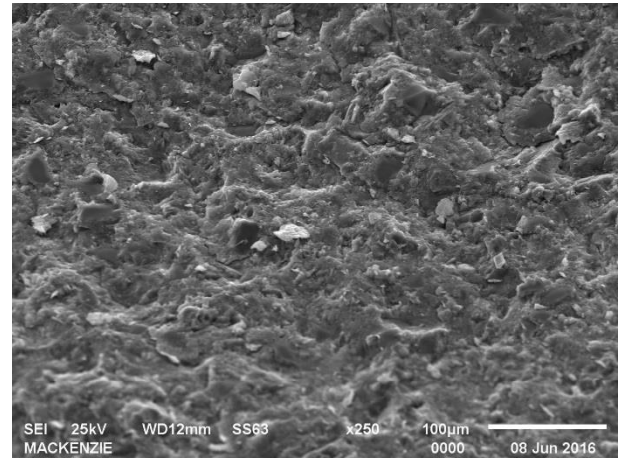


(f) aumento 5000x

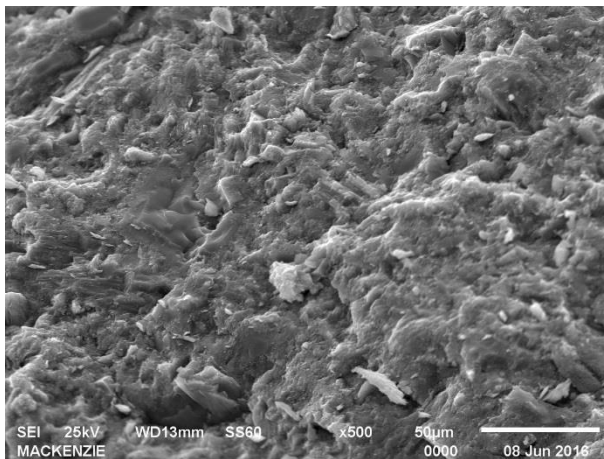
Figura II.7 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



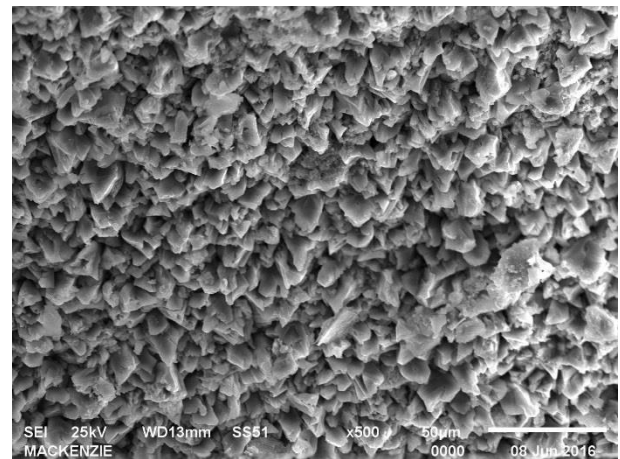
(a) aumento 100x



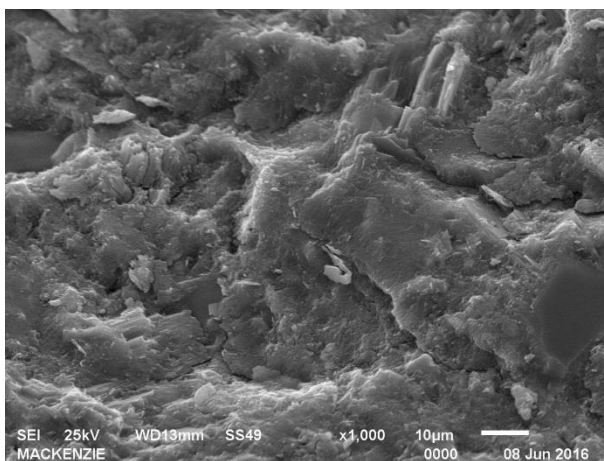
(b) aumento 250x



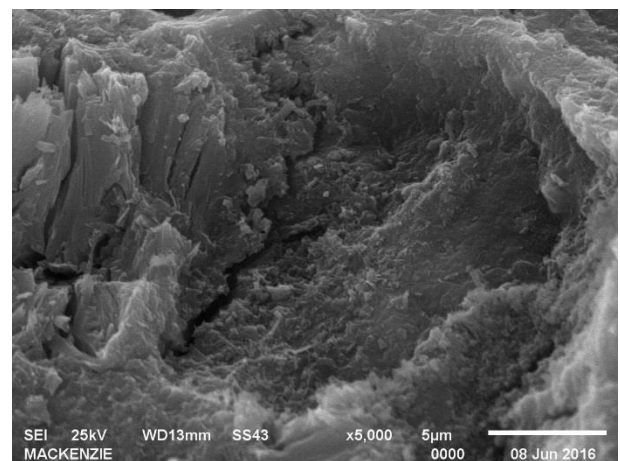
(c) aumento 500x



(d) aumento 500x

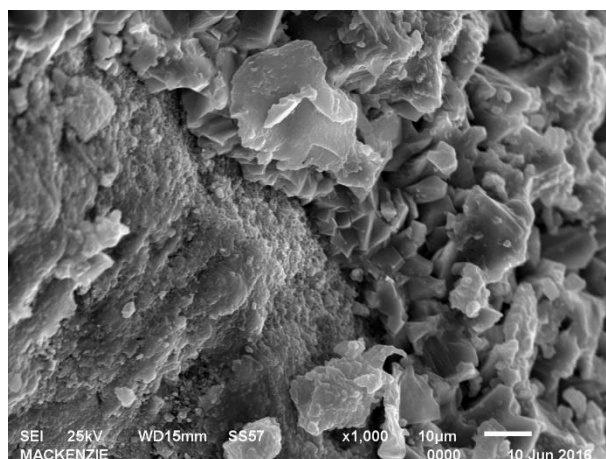


(e) aumento 1000x



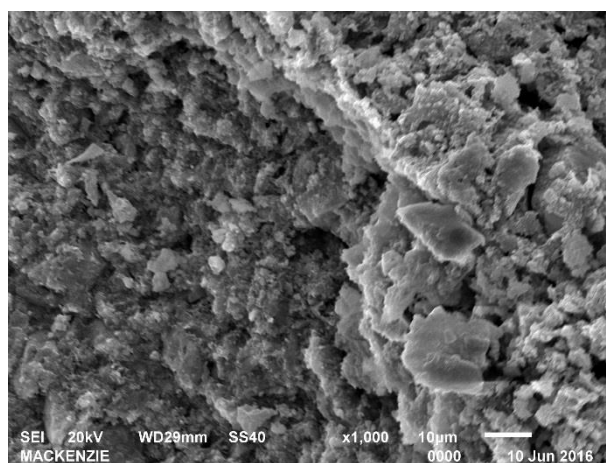
(f) aumento 5000x

Figura II.8 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.



aumento 1000x

Figura II.9 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CPIII-40-RS, curados em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



aumento 1000x

Figura II.10 Micrografia dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

## **Anexo III RESULTADO DAS ANÁLISES NO DRX – PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

Neste Anexo III serão apresentados os espectros e as tabelas dos resultados obtidos das análises no DRX da primeira campanha experimental.

Nas tabelas que se seguem são apresentados os valores dos picos dos elementos encontrados nas amostras. Em amarelo são os picos da etringita, em vermelho os picos da gipsita.

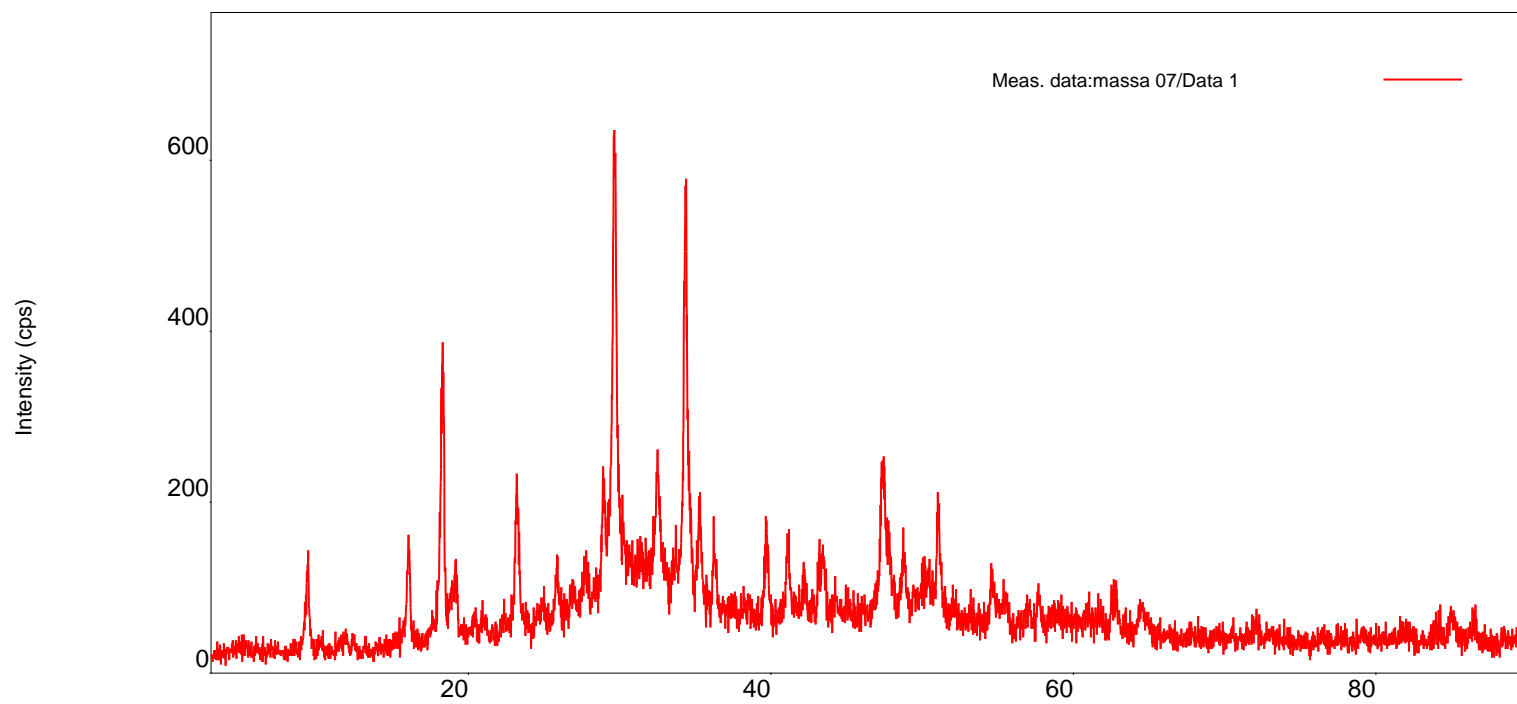


Figura III.1 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%.

Tabela III.1 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPII-F-32, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.375(9)	9.426(9)	77(11)	0.194(18)	25.9(12)	0.74(14)	428(40)
2	16.05(2)	5.517(7)	72(11)	0.249(19)	21.8(14)	1.3(4)	337(26)
3	18.321(12)	4.838(3)	217(19)	0.258(10)	70(3)	2.0(4)	326(13)
4	19.193(11)	4.621(3)	45(9)	0.48(6)	27(2)	4.4(16)	177(21)
5	23.167(12)	3.836(2)	107(13)	0.273(16)	34.5(18)	0.49(10)	310(18)
6	29.67(3)	3.009(3)	377(25)	0.25(3)	161(5)	1.3(7)	341(41)
7	32.443(19)	2.7574(16)	81(12)	0.28(3)	29(3)	0.30(8)	310(32)
8	34.348(11)	2.6087(8)	339(24)	0.213(17)	115(3)	1.2(2)	409(32)
9	35.315(17)	2.5394(12)	72(11)	0.17(3)	15(2)	4(2)	527(89)
10	36.30(4)	2.473(3)	49(9)	0.16(4)	8.9(18)	3(5)	547(143)
11	39.68(4)	2.269(2)	67(11)	0.26(3)	18.2(19)	0.9(5)	346(35)
12	41.11(5)	2.194(2)	63(10)	0.23(5)	18.6(18)	1.2(11)	393(90)
13	42.25(5)	2.137(3)	34(8)	0.18(7)	7.9(16)	3(3)	505(204)
14	43.40(5)	2.083(2)	46(9)	0.40(4)	20(2)	1.8(10)	224(23)
15	47.35(5)	1.9184(17)	113(14)	0.42(5)	69(4)	0.6(3)	215(27)
16	51.11(3)	1.7857(10)	93(12)	0.20(6)	30(3)	2.6(19)	454(133)
17	72.0(3)	1.311(5)	7(3)	1.5(3)	16(3)	0.55(19)	67(12)
18	84.83(8)	1.1420(8)	24(6)	0.32(9)	10(2)	0.3(3)	351(103)

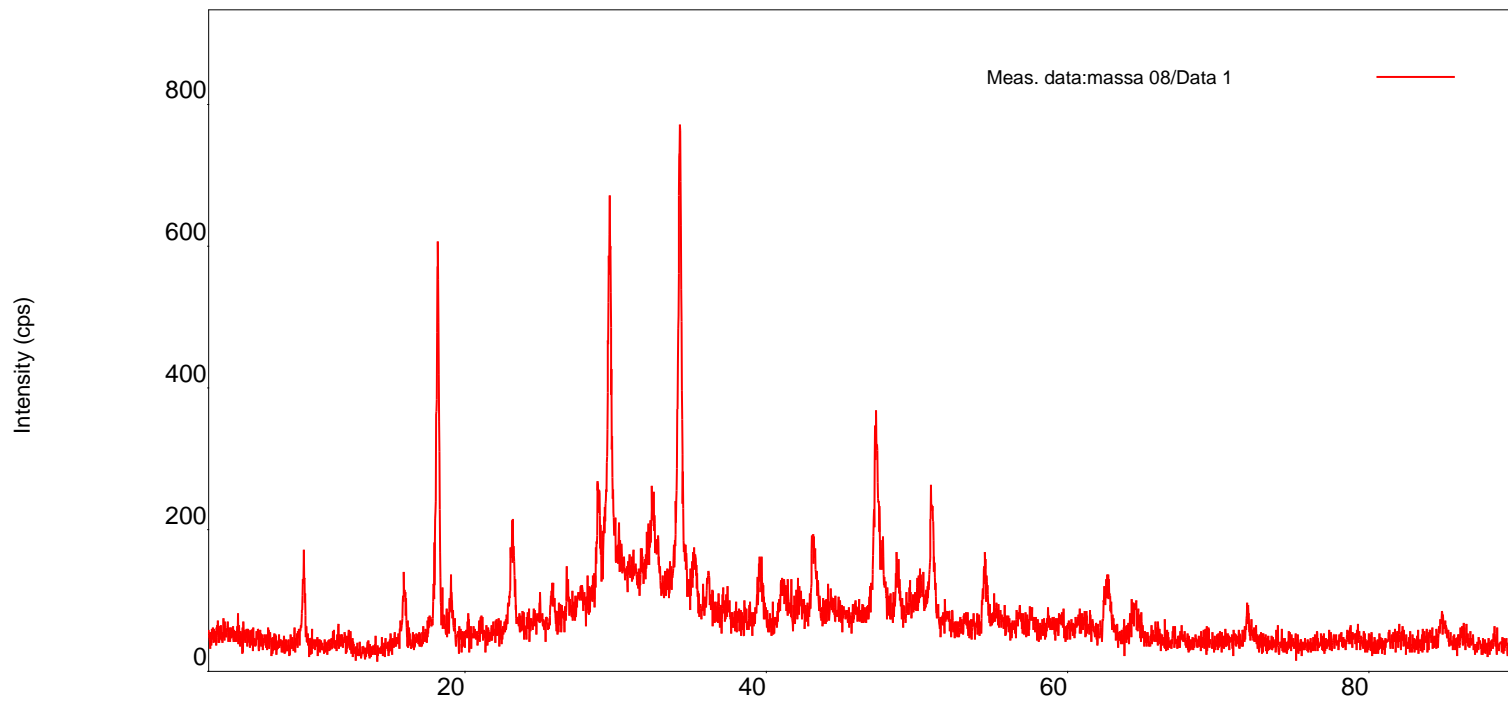


Figura III.2 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.

Tabela III.2 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.31(2)	9.49(2)	77(11)	0.18(3)	22.3(13)	1.3(9)	458(69)
2	15.97(3)	5.546(10)	58(10)	0.23(3)	19.7(13)	1.0(7)	366(51)
3	18.208(11)	4.868(3)	380(25)	0.196(9)	106(2)	1.4(4)	429(21)
4	19.111(14)	4.640(3)	38(8)	0.26(5)	14.6(19)	1.9(19)	326(69)
5	23.087(19)	3.849(3)	94(13)	0.27(3)	34(2)	0.38(19)	319(32)
6	28.802(13)	3.0972(14)	113(14)	0.15(3)	26(2)	0.26(12)	585(131)
7	29.573(16)	3.0182(16)	366(25)	0.23(2)	140(3)	0.8(3)	372(34)
8	32.475(17)	2.7547(14)	52(9)	0.54(5)	30(3)	1.3(6)	159(14)
9	34.281(11)	2.6136(8)	460(28)	0.226(14)	140(3)	2.3(7)	384(24)
10	41.08(4)	2.195(2)	31(7)	0.42(13)	19(3)	0.8(12)	210(65)
11	43.092(10)	2.0974(5)	74(11)	0.31(3)	27(2)	0.6(4)	284(28)
12	47.29(2)	1.9206(8)	181(17)	0.30(3)	82(4)	1.3(4)	298(33)
13	51.04(2)	1.7881(8)	124(14)	0.25(5)	50(3)	3.3(19)	368(69)
14	54.50(3)	1.6823(10)	66(11)	0.22(5)	20.1(19)	1.4(10)	420(89)
15	62.58(6)	1.4832(13)	48(9)	0.41(4)	21(2)	0.8(5)	240(27)
16	64.38(10)	1.446(2)	26(7)	0.47(7)	13(2)	0.7(6)	209(33)
17	71.91(5)	1.3119(8)	23(6)	0.46(9)	14.9(17)	0.7(3)	221(45)
18	84.82(5)	1.1421(6)	31(7)	0.27(7)	12.6(15)	1.0(11)	410(102)



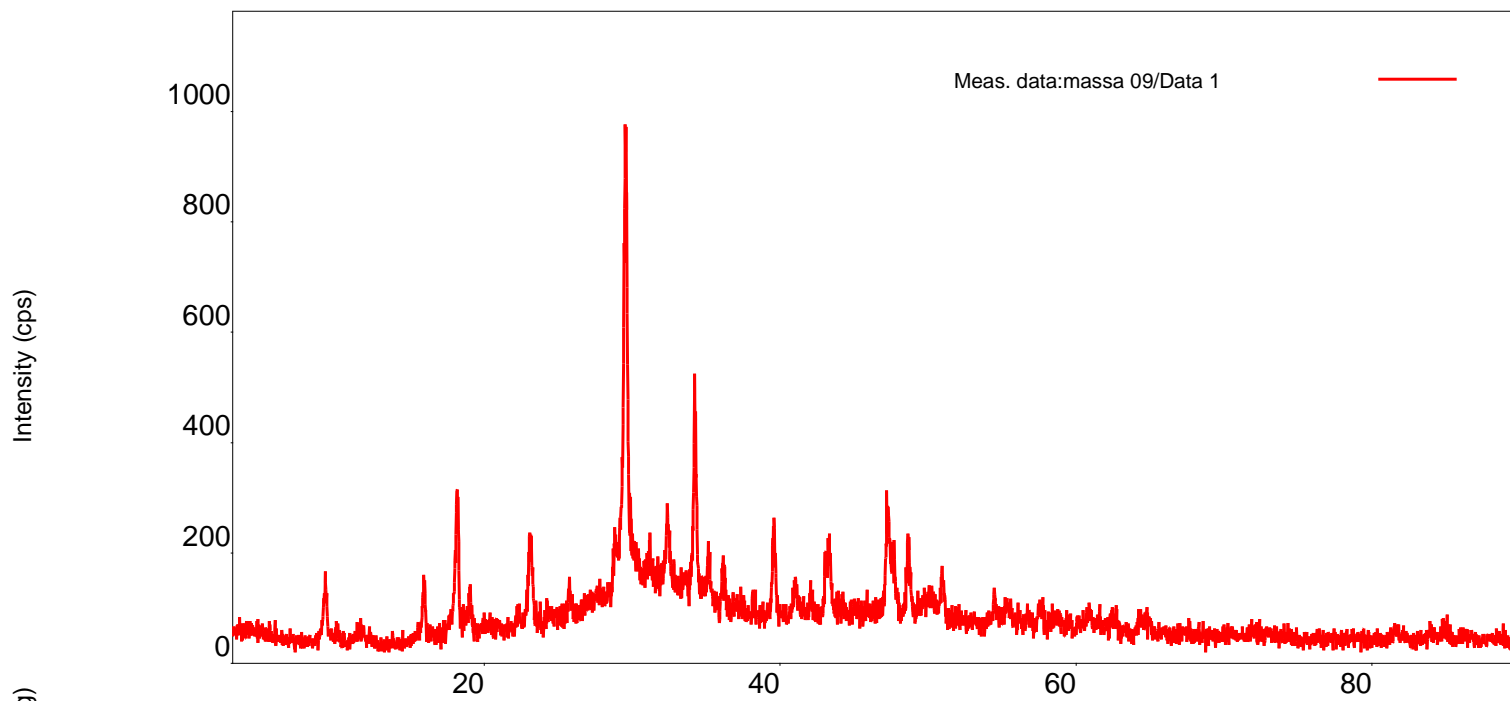


Figura III.3 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CPIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

Tabela III.3 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.29(3)	9.51(3)	63(10)	0.30(3)	24.0(17)	1.8(10)	280(30)
2	15.966(14)	5.546(5)	69(11)	0.21(3)	21.5(14)	3.1(10)	394(48)
3	18.184(19)	4.875(5)	168(17)	0.237(18)	55(2)	1.9(7)	354(27)
4	19.04(4)	4.658(9)	47(9)	0.23(5)	19(2)	1.7(12)	365(78)
5	23.08(3)	3.851(4)	112(14)	0.29(3)	40(2)	0.6(3)	296(27)
6	29.546(18)	3.0208(18)	597(32)	0.240(19)	230(5)	1.2(5)	357(28)
7	32.34(2)	2.7661(18)	77(11)	0.21(3)	21(3)	0.36(15)	412(58)
8	34.224(15)	2.6178(11)	272(21)	0.158(16)	60(2)	0.8(4)	549(54)
9	35.170(6)	2.5496(4)	96(13)	0.061(12)	12.1(12)	1.6(5)	1425(280)
10	39.56(3)	2.2760(14)	111(14)	0.218(18)	25.7(19)	1.1(5)	404(33)
11	43.17(5)	2.094(2)	71(11)	0.38(3)	29(3)	0.7(3)	234(21)
12	47.25(3)	1.9220(12)	140(15)	0.25(4)	43(7)	0.9(6)	359(55)
13	47.65(2)	1.9070(9)	68(11)	0.23(8)	19(6)	1.2(14)	387(137)
14	48.66(2)	1.8695(8)	108(13)	0.19(3)	25(2)	1.7(10)	487(69)
15	49.90(17)	1.826(6)	19(6)	0.9(3)	18(3)	0.5(4)	102(29)
16	50.95(5)	1.7910(16)	55(10)	0.20(5)	12(3)	1.1(10)	465(113)

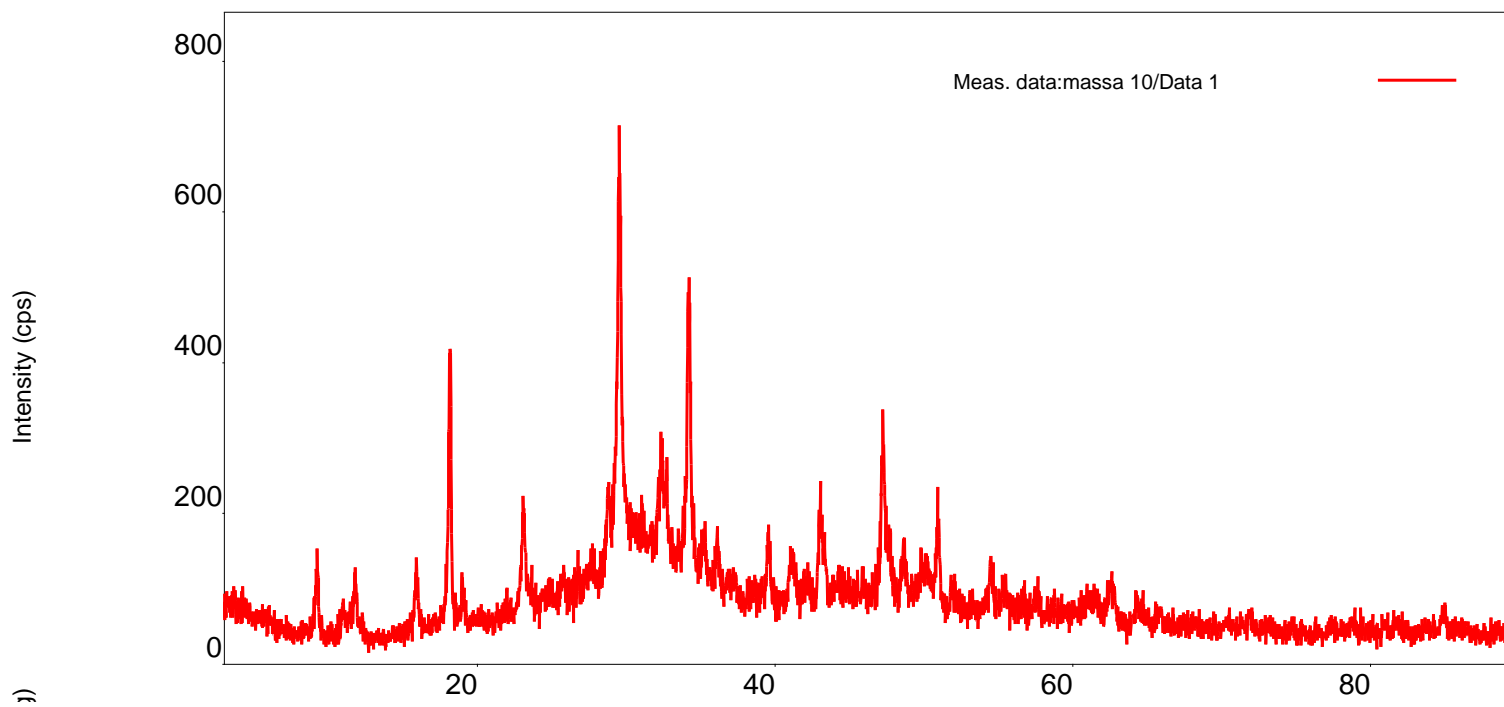


Figura III.4 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

Tabela III.4 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPIII-40-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.28(3)	9.52(3)	61(10)	0.24(2)	18.1(13)	4(3)	347(35)
2	15.918(16)	5.563(6)	49(9)	0.30(3)	20.6(14)	1.5(4)	276(27)
3	18.164(13)	4.880(4)	267(21)	0.178(12)	70.9(19)	1.7(6)	472(32)
4	19.01(4)	4.665(9)	27(7)	0.28(5)	10.2(16)	0.8(4)	302(50)
5	23.09(3)	3.849(5)	91(12)	0.29(4)	42(2)	1.1(6)	292(38)
6	29.52(2)	3.023(2)	360(24)	0.28(3)	173(5)	1.1(5)	311(35)
7	32.366(17)	2.7638(15)	65(10)	0.50(5)	35(4)	0.8(4)	173(16)
8	34.146(11)	2.6237(8)	265(21)	0.213(13)	73(3)	0.46(9)	408(26)
9	41.04(7)	2.198(4)	36(8)	0.39(6)	15(3)	0.4(4)	227(34)
10	42.992(11)	2.1021(5)	69(11)	0.37(3)	27(3)	0.5(2)	240(21)
11	47.16(3)	1.9254(11)	159(16)	0.24(6)	69(4)	0.4(3)	380(98)
12	50.93(13)	1.791(4)	29(7)	1.07(13)	36(5)	5.0(12)	86(11)

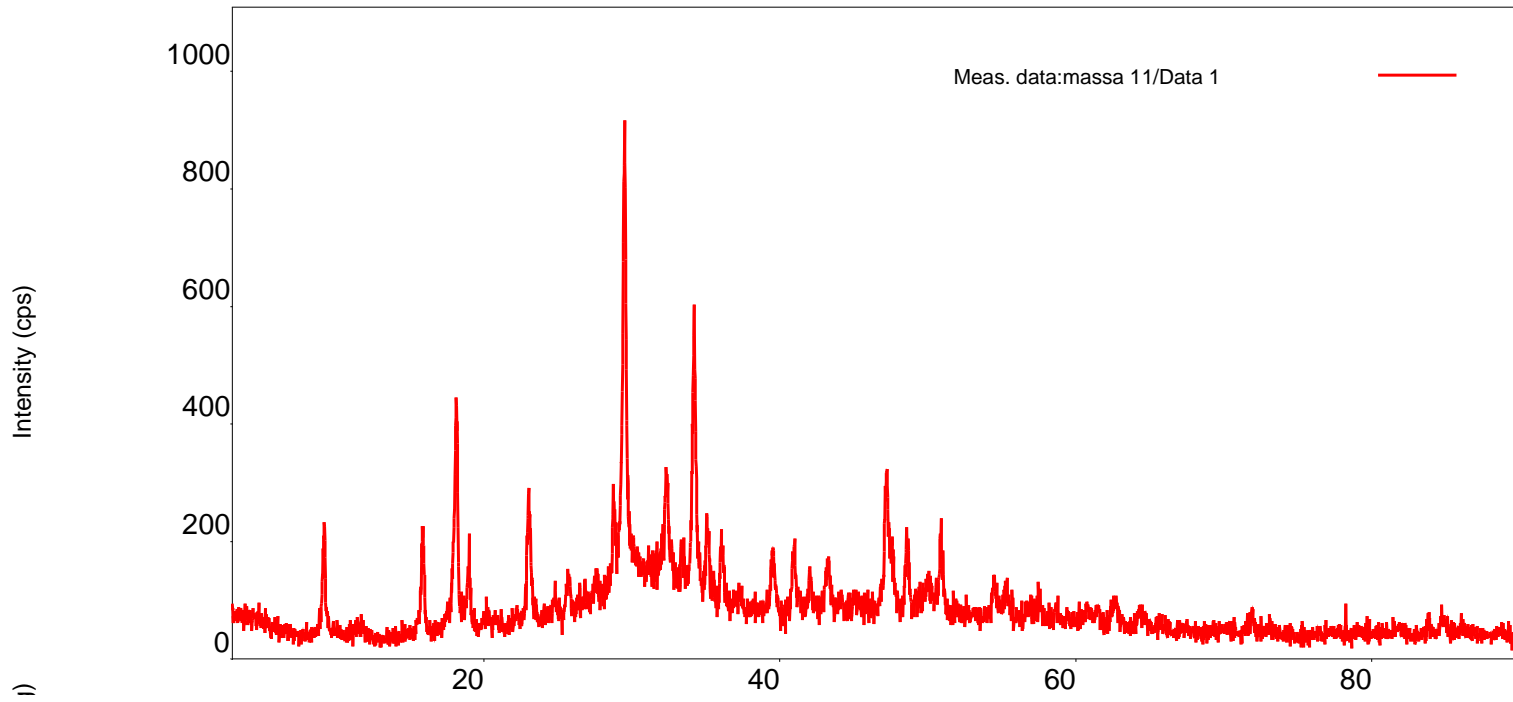


Figura III.5 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

Tabela III.5 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.217(15)	9.587(16)	124(14)	0.208(19)	40.7(14)	1.6(6)	401(36)
2	15.852(8)	5.586(3)	118(14)	0.209(13)	32.8(13)	0.69(12)	400(24)
3	18.125(8)	4.890(2)	287(22)	0.187(11)	91(2)	0.90(16)	448(26)
4	18.97(2)	4.675(5)	74(11)	0.24(3)	29(2)	1.1(3)	357(43)
5	22.98(2)	3.867(4)	135(15)	0.29(2)	46(2)	0.43(19)	297(21)
6	28.760(8)	3.1016(9)	115(14)	0.09(2)	18(2)	0.9(5)	912(219)
7	29.471(13)	3.0283(13)	548(30)	0.214(18)	195(4)	0.8(3)	401(35)
8	32.32(4)	2.767(3)	125(14)	0.29(7)	65(4)	1.0(7)	301(72)
9	34.220(12)	2.6182(9)	335(24)	0.20(2)	102(3)	2.0(8)	425(41)
10	35.08(4)	2.556(3)	77(11)	0.21(3)	17(2)	0.8(6)	410(57)
11	36.036(13)	2.4903(9)	61(10)	0.20(4)	13(2)	0.6(7)	428(82)
12	40.96(6)	2.202(3)	75(11)	0.22(7)	22(3)	2(2)	398(133)
13	42.01(2)	2.1488(11)	69(11)	0.09(3)	11.2(12)	0.8(10)	962(297)
14	43.303(12)	2.0877(5)	62(10)	0.28(3)	22(2)	5(4)	314(35)
15	47.224(18)	1.9231(7)	163(16)	0.29(2)	73(3)	1.3(2)	311(24)
16	48.50(3)	1.8754(10)	76(11)	0.22(3)	18(2)	0.4(2)	411(53)
17	49.95(7)	1.824(2)	26(7)	0.38(9)	14(2)	0.5(3)	239(57)
18	50.873(19)	1.7934(6)	93(12)	0.18(3)	25(2)	0.7(2)	522(78)

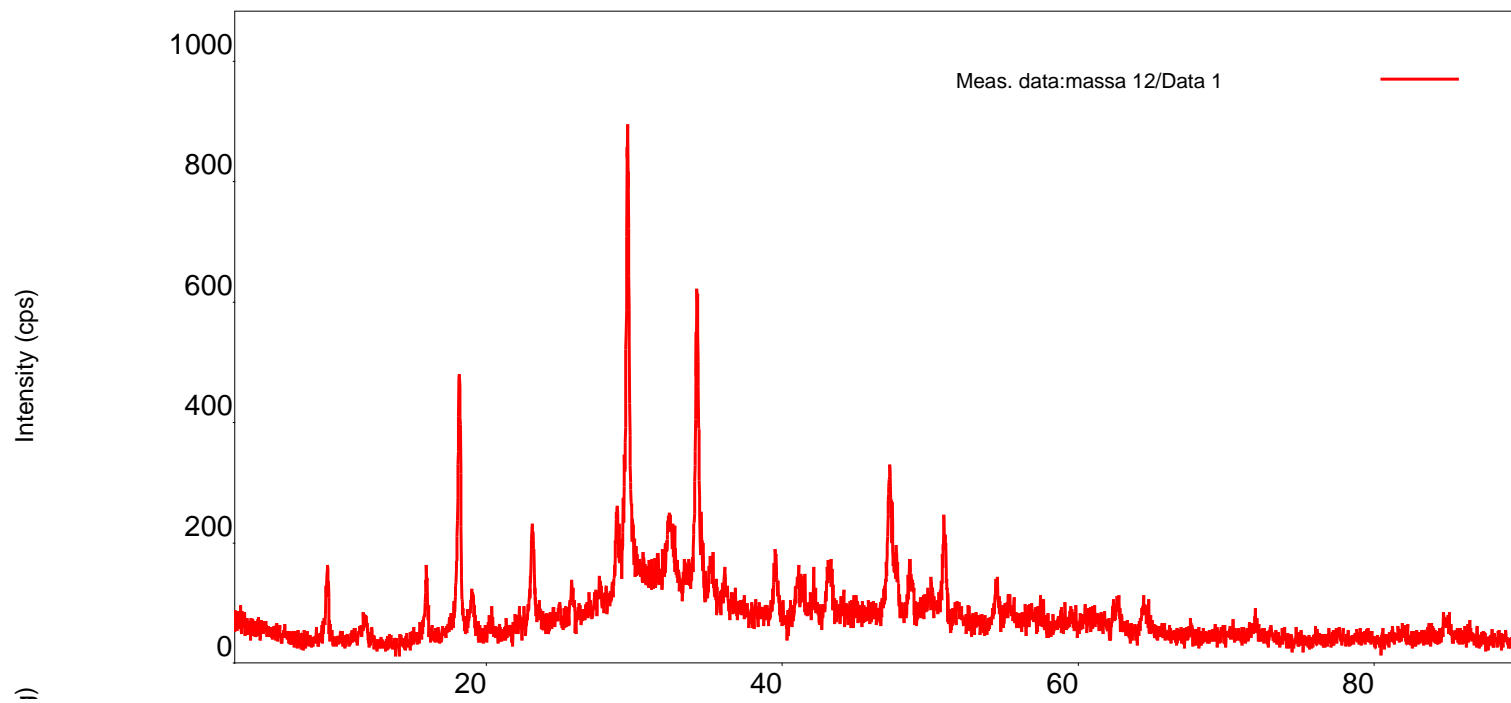


Figura III.6 Espectro dos CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

Tabela III.6 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.30(2)	9.50(2)	82(12)	0.195(19)	21.3(13)	4(2)	427(41)
2	15.95(2)	5.552(7)	78(11)	0.17(3)	22.2(12)	1.0(8)	491(85)
3	18.199(10)	4.871(3)	310(23)	0.200(8)	90.2(16)	2.0(5)	420(17)
4	19.08(3)	4.648(8)	44(9)	0.29(3)	15.4(16)	2.1(11)	291(30)
5	23.13(3)	3.843(5)	113(14)	0.27(3)	43(2)	1.4(7)	317(33)
6	29.55(2)	3.020(2)	547(30)	0.19(3)	185(6)	1.4(7)	444(71)
7	32.41(6)	2.760(5)	56(10)	0.47(5)	28(4)	1.0(5)	184(18)
8	34.247(18)	2.6162(13)	359(24)	0.20(2)	104(4)	1.6(7)	430(48)
9	39.598(11)	2.2741(6)	67(11)	0.22(3)	17(2)	5(7)	400(51)
10	47.278(19)	1.9210(7)	153(16)	0.34(2)	77(4)	1.5(3)	267(19)
11	49.95(8)	1.824(3)	24(6)	0.46(10)	15(2)	0.7(5)	199(44)
12	50.921(19)	1.7918(6)	122(14)	0.18(3)	31(2)	0.8(4)	503(73)
13	64.45(6)	1.4446(13)	34(7)	0.27(7)	10.7(17)	1.5(16)	363(95)



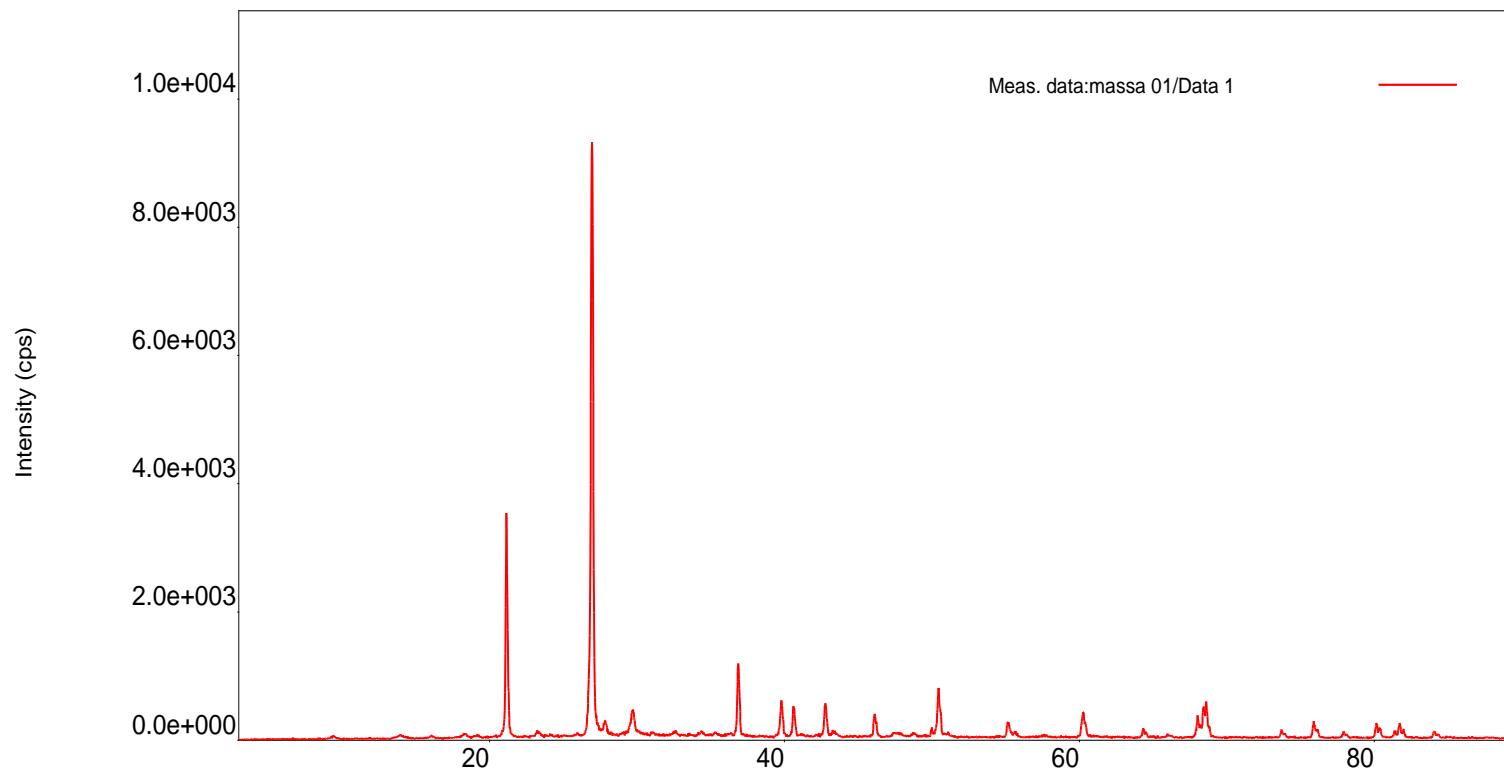


Figura III.7 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

(continua)

Tabela III.7 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPII-F-32, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.40(5)	9.40(5)	24(6)	0.44(4)	11.6(13)	1.1(5)	190(19)
2	13.92(6)	6.36(3)	28(7)	0.60(5)	18(2)	0.8(3)	140(12)
3	18.37(5)	4.826(12)	38(8)	0.38(4)	15.7(18)	2.3(13)	220(23)
4	19.25(6)	4.607(15)	20(6)	0.36(8)	7.8(14)	4(5)	235(53)
5	21.127(3)	4.2017(7)	2511(65)	0.129(3)	410(4)	0.48(6)	652(14)
6	23.27(3)	3.820(5)	52(9)	0.29(4)	22(2)	1.0(4)	288(36)
7	26.960(6)	3.3044(8)	6844(107)	0.160(5)	1347(19)	1.9(3)	532(16)
8	27.83(3)	3.204(4)	140(15)	0.21(3)	40(3)	0.9(7)	403(62)
9	29.711(12)	3.0044(12)	261(21)	0.281(18)	107(3)	1.5(3)	305(19)
10	36.862(5)	2.4363(3)	993(41)	0.126(5)	149(3)	1.31(19)	693(26)
11	39.810(8)	2.2625(4)	435(27)	0.165(8)	81(3)	2.6(6)	535(26)
12	40.615(8)	2.2195(4)	435(27)	0.122(10)	69(2)	0.9(3)	722(57)
13	42.756(8)	2.1132(4)	441(27)	0.149(8)	78(2)	0.95(19)	597(32)
14	43.31(5)	2.088(2)	46(9)	0.38(4)	20.6(18)	0.8(5)	233(25)
15	46.117(6)	1.9667(3)	332(24)	0.131(7)	49.2(17)	1.3(2)	691(35)
16	47.58(7)	1.910(2)	36(8)	0.57(6)	23(2)	0.8(4)	160(16)
17	48.73(6)	1.867(2)	35(8)	0.25(5)	9.7(12)	0.9(8)	363(75)

(continuação)

18	49.999(12)	1.8227(4)	97(13)	0.070(18)	9.5(18)	3(2)	1314(331)
19	50.450(9)	1.8074(3)	672(33)	0.145(10)	139(4)	1.4(5)	631(43)
20	55.111(15)	1.6651(4)	182(17)	0.190(19)	54(3)	0.42(14)	493(49)
21	60.266(9)	1.5344(2)	352(24)	0.183(9)	77(2)	2.2(6)	525(26)
22	64.361(18)	1.4463(4)	127(15)	0.135(15)	20.7(16)	2.4(18)	723(82)
23	68.022(9)	1.37710(16)	287(22)	0.174(10)	60(2)	0.92(19)	575(33)
24	68.404(8)	1.37033(14)	441(27)	0.249(9)	127(3)	0.28(5)	402(14)
25	73.694(5)	1.28449(8)	113(14)	0.131(11)	20.9(12)	0.31(6)	791(69)
26	75.900(7)	1.25254(10)	232(20)	0.176(6)	45.1(15)	0.95(15)	599(21)
27	77.928(15)	1.2249(2)	83(12)	0.166(13)	16.1(12)	1.5(6)	643(49)
28	80.167(5)	1.19627(6)	229(20)	0.156(8)	46.8(15)	1.9(3)	695(35)
29	81.389(17)	1.1814(2)	81(12)	0.17(2)	17.8(17)	0.9(4)	644(74)
30	81.733(10)	1.17727(12)	190(18)	0.160(9)	39(2)	1.1(3)	684(40)
31	84.073(16)	1.15035(18)	101(13)	0.179(13)	21.1(14)	1.2(5)	624(46)

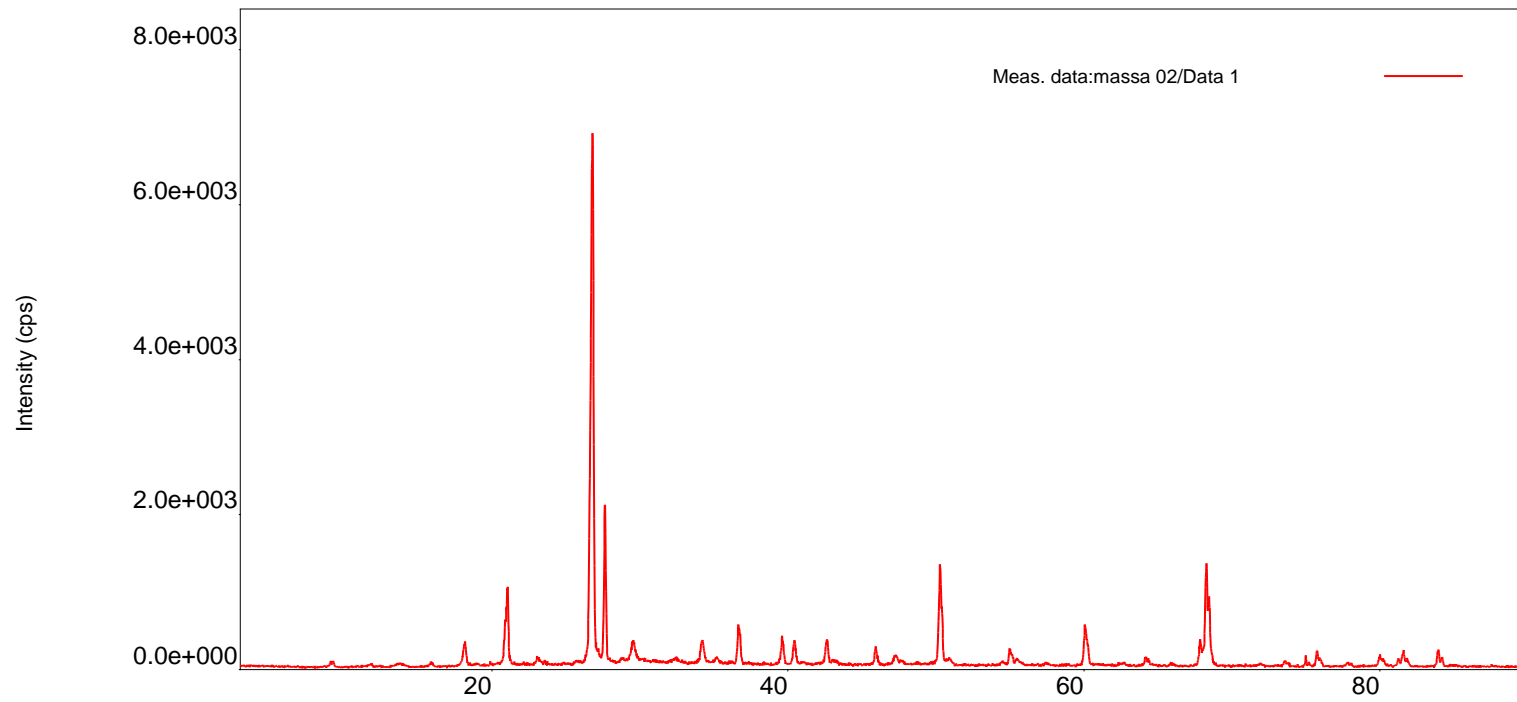


Figura III.8 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.

Tabela III.8 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPII-F-32, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.15(4)	9.65(5)	36(8)	0.33(4)	13.2(16)	0.7(4)	254(27)
2	11.85(6)	7.46(4)	25(6)	0.27(8)	11.3(13)	2(3)	308(88)
3	13.80(8)	6.41(3)	25(6)	0.64(6)	17(2)	1.2(6)	131(13)
4	18.197(14)	4.871(4)	192(18)	0.238(11)	53(2)	2.5(7)	353(16)
5	20.895(15)	4.248(3)	284(22)	0.15(2)	63(14)	1.0(5)	578(90)
6	21.075(5)	4.2119(11)	672(33)	0.121(16)	114(13)	4.0(15)	696(91)
7	23.07(3)	3.852(5)	62(10)	0.25(6)	26(2)	0.4(3)	338(78)
8	26.660(19)	3.341(2)	2231(61)	0.20(6)	544(228)	0.8(4)	418(131)
9	26.804(5)	3.3233(6)	4211(84)	0.126(16)	627(225)	1.4(3)	678(84)
10	27.643(4)	3.2243(4)	1618(52)	0.115(3)	216(4)	2.0(3)	745(22)
11	29.55(3)	3.021(3)	183(17)	0.28(3)	77(3)	1.2(5)	306(28)
12	34.204(19)	2.6193(14)	212(19)	0.224(15)	57(2)	1.2(4)	388(26)
13	35.21(3)	2.547(2)	50(9)	0.21(4)	13.9(18)	2.3(13)	419(76)
14	36.657(11)	2.4495(7)	390(25)	0.177(8)	78(2)	0.83(19)	493(22)
15	39.641(10)	2.2717(6)	240(20)	0.186(10)	49.1(18)	2.6(7)	475(25)
16	40.431(14)	2.2291(7)	239(20)	0.168(15)	49(2)	1.6(6)	526(46)
17	42.620(14)	2.1196(7)	248(20)	0.176(13)	51(3)	1.5(5)	506(38)
18	43.01(7)	2.101(3)	35(8)	0.37(7)	14.8(18)	0.4(4)	238(47)

(continuação)

19	45.927(12)	1.9744(5)	179(17)	0.146(13)	28.9(17)	1.2(4)	619(55)
20	47.27(3)	1.9212(11)	95(13)	0.24(3)	29(3)	1.8(10)	370(46)
21	47.603(16)	1.9087(6)	40(8)	0.16(6)	9.3(19)	0.3(4)	583(225)
22	50.284(3)	1.81300(11)	1138(44)	0.156(4)	210(8)	1.44(12)	589(14)
23	50.95(3)	1.7907(8)	50(9)	0.65(16)	39(8)	4(2)	142(34)
24	54.968(3)	1.66908(8)	189(18)	0.112(11)	27(3)	0.21(12)	834(78)
25	55.49(6)	1.6546(16)	47(9)	0.56(7)	46(3)	1.6(6)	169(22)
26	60.087(6)	1.53854(14)	486(28)	0.172(6)	98(2)	1.23(16)	556(20)
27	64.164(19)	1.4503(4)	107(13)	0.15(2)	23.2(16)	0.7(5)	659(89)
28	67.872(8)	1.37977(15)	294(22)	0.175(10)	63(3)	1.4(3)	573(34)
29	68.268(4)	1.37273(7)	1283(46)	0.166(4)	264(4)	0.85(8)	605(15)
30	73.62(2)	1.2856(3)	67(11)	0.16(2)	14.5(13)	3(3)	630(89)
31	75.010(6)	1.26518(8)	112(14)	0.085(9)	12.1(12)	2.7(9)	1225(136)
32	75.739(8)	1.25480(12)	189(18)	0.169(7)	35.2(14)	0.64(14)	623(27)
33	77.82(2)	1.2263(3)	48(9)	0.17(2)	8.8(12)	1.3(8)	624(72)
34	79.993(14)	1.19843(18)	120(14)	0.214(15)	34.6(14)	0.9(3)	505(36)
35	81.247(12)	1.18307(14)	95(13)	0.143(14)	16.3(13)	0.8(3)	767(75)
36	81.594(9)	1.17892(11)	163(16)	0.178(8)	34.9(17)	0.9(2)	616(29)
37	83.955(9)	1.15167(10)	210(19)	0.164(7)	38.8(15)	1.5(3)	679(28)

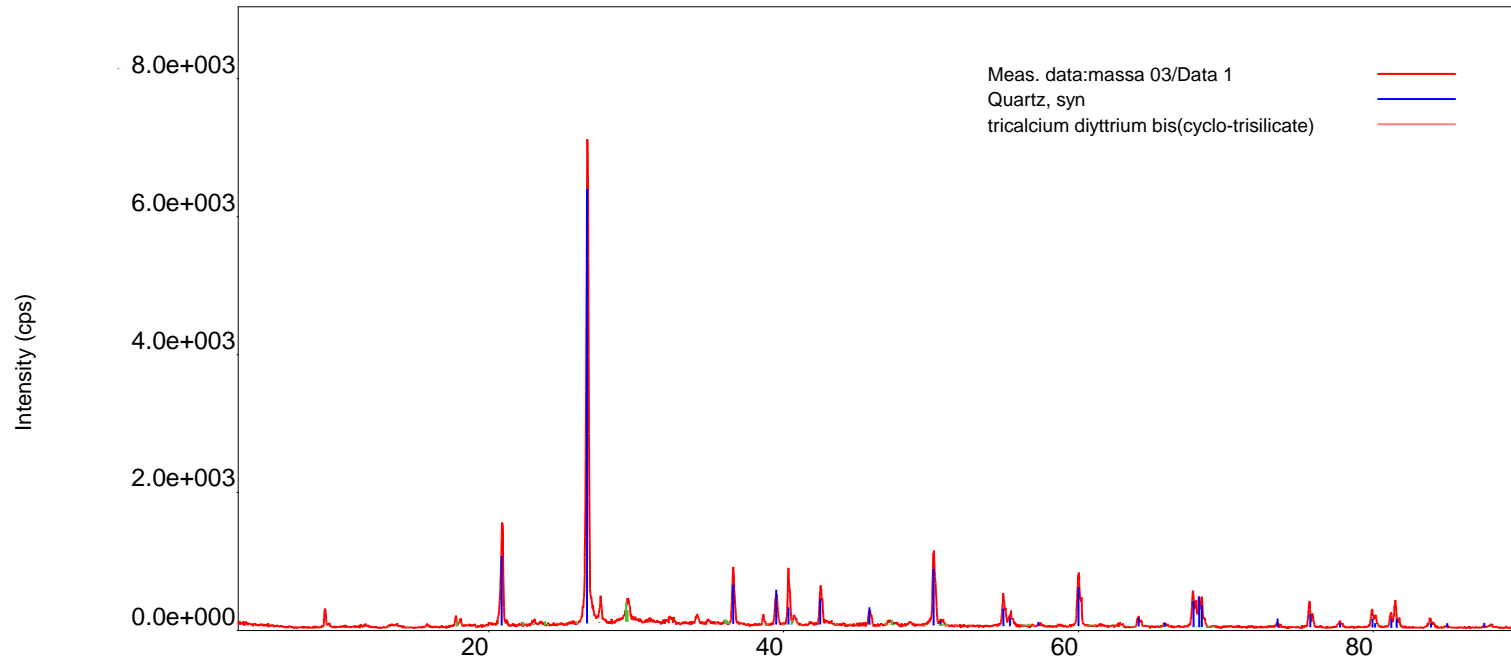


Figura III.9 Espectro dos CP`s de argamassa moldados com CPIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

(continua)

Tabela III.9 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPlII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	8.882(13)	9.948(14)	193(18)	0.104(14)	28.0(17)	0.7(4)	802(110)
2	13.53(9)	6.54(4)	24(6)	0.66(8)	17(3)	0.6(4)	126(14)
3	17.741(16)	4.995(4)	109(13)	0.093(17)	13(2)	0.5(4)	906(164)
4	18.105(5)	4.8956(14)	73(11)	0.13(3)	14(2)	5(4)	628(143)
5	20.942(7)	4.2383(15)	1049(42)	0.173(7)	223(4)	4.2(13)	489(18)
6	22.99(3)	3.866(5)	22(6)	0.58(11)	14(4)	0.2(3)	146(28)
7	26.694(5)	3.3367(6)	5398(95)	0.155(4)	1049(12)	1.8(3)	552(15)
8	27.593(16)	3.2300(18)	263(21)	0.12(3)	52(3)	2.1(14)	721(191)
9	29.43(3)	3.032(3)	236(20)	0.26(2)	95(3)	1.4(7)	326(30)
10	36.574(7)	2.4549(4)	677(34)	0.136(6)	110(2)	1.1(2)	645(29)
11	38.620(10)	2.3294(6)	121(14)	0.093(10)	12.0(13)	1.2(5)	942(100)
12	39.480(10)	2.2806(6)	337(24)	0.176(7)	64(2)	1.1(2)	500(21)
13	40.319(4)	2.2351(2)	770(36)	0.107(4)	99(3)	0.85(13)	825(34)
14	40.70(2)	2.2152(12)	103(13)	0.18(3)	22.0(19)	0.6(3)	494(76)
15	42.507(9)	2.1250(4)	542(30)	0.125(11)	89(3)	1.3(4)	710(60)
16	45.820(13)	1.9787(5)	203(18)	0.141(14)	31(2)	0.9(3)	637(63)
17	47.08(2)	1.9287(8)	38(8)	0.39(7)	17(3)	0.2(2)	232(43)



## ANEXO III

(continuação)

18	50.173(4)	1.81676(13)	1003(41)	0.138(4)	173(3)	0.85(9)	663(21)
19	50.71(4)	1.7987(14)	64(10)	0.29(4)	24(2)	1.6(9)	322(43)
20	54.907(6)	1.67079(18)	430(27)	0.141(7)	75(3)	1.2(2)	665(34)
21	55.30(2)	1.6598(7)	128(15)	0.27(3)	43(2)	0.44(17)	341(35)
22	60.021(4)	1.54008(10)	728(35)	0.162(4)	141(2)	1.8(2)	592(15)
23	62.829(13)	1.4778(3)	46(9)	0.12(3)	8.3(14)	1.0(7)	830(225)
24	64.035(10)	1.45288(19)	141(15)	0.145(13)	25.0(17)	0.51(14)	676(59)
25	65.81(3)	1.4180(5)	52(9)	0.13(3)	8.9(13)	0.5(5)	741(143)
26	67.779(5)	1.38144(9)	524(30)	0.150(5)	104(4)	1.3(2)	667(23)
27	68.189(6)	1.37413(11)	292(22)	0.101(13)	38(9)	2.0(6)	990(126)
28	68.381(10)	1.37073(18)	211(19)	0.25(5)	66(12)	5.0(15)	402(76)
29	73.49(3)	1.2876(4)	68(11)	0.14(3)	12.5(15)	1.3(11)	749(151)
30	75.665(7)	1.25585(10)	362(25)	0.139(5)	59.6(18)	0.89(18)	758(28)
31	77.708(19)	1.2279(3)	76(11)	0.219(19)	17.8(16)	1.3(5)	486(43)
32	79.912(9)	1.19945(11)	249(20)	0.188(9)	62.6(17)	0.67(16)	577(27)
33	81.192(10)	1.18373(12)	204(18)	0.160(10)	40(2)	0.9(2)	684(42)
34	81.518(8)	1.17983(9)	276(21)	0.147(8)	51(2)	1.4(3)	744(40)
35	83.831(11)	1.15306(13)	134(15)	0.152(16)	28.3(19)	0.5(2)	735(79)

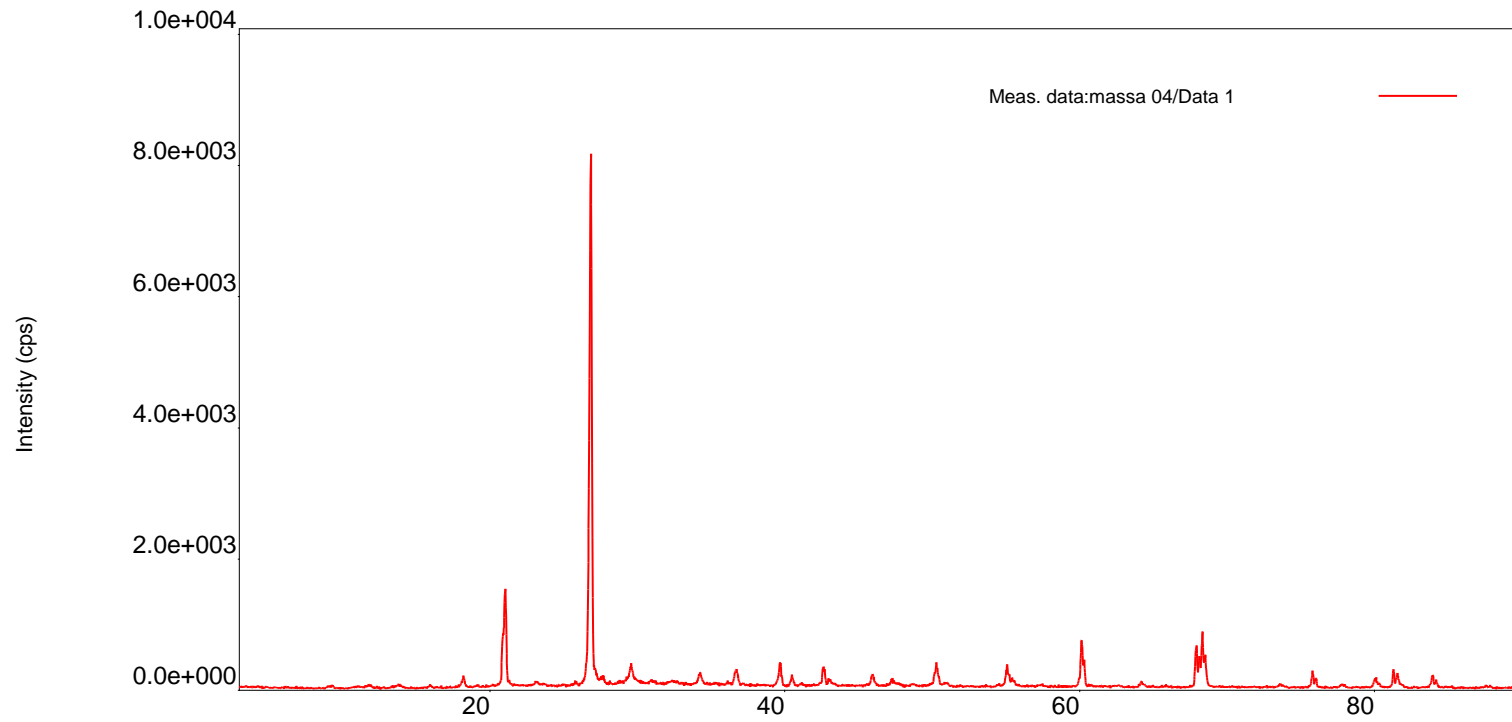


Figura III.10 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPIII-40-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

Tabela III.10 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPIII-40-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	11.87(3)	7.45(2)	18(6)	0.86(11)	17(3)	5(4)	97(13)
2	13.77(4)	6.42(2)	30(7)	0.40(6)	16(2)	0.7(3)	211(30)
3	18.176(11)	4.877(3)	112(14)	0.162(15)	27.2(16)	0.57(12)	518(46)
4	20.842(7)	4.2584(14)	450(27)	0.16(2)	94(15)	0.40(19)	542(75)
5	21.045(7)	4.2179(13)	996(41)	0.131(9)	174(15)	1.6(4)	643(44)
6	23.15(4)	3.839(7)	41(8)	0.34(7)	24(2)	0.8(5)	252(53)
7	26.858(4)	3.3167(5)	5850(99)	0.170(3)	1180(12)	3.1(4)	503(10)
8	27.66(2)	3.222(2)	68(11)	0.28(9)	36(6)	3(3)	301(99)
9	29.56(2)	3.019(2)	190(18)	0.24(4)	85(3)	1.2(5)	356(52)
10	34.20(3)	2.620(2)	110(14)	0.241(19)	28(2)	0.6(3)	360(29)
11	36.66(2)	2.4494(15)	173(17)	0.224(17)	47(2)	0.7(3)	391(30)
12	39.706(3)	2.26815(18)	258(21)	0.181(10)	54(2)	3.6(10)	487(27)
13	40.49(2)	2.2260(10)	114(14)	0.15(2)	19.5(18)	1.8(9)	572(75)
14	42.603(9)	2.1204(4)	257(21)	0.134(11)	44(2)	0.7(2)	662(54)
15	42.96(2)	2.1035(11)	63(10)	0.27(3)	19.6(15)	0.23(14)	332(39)
16	45.899(14)	1.9755(6)	125(14)	0.20(2)	29.4(19)	0.53(16)	459(48)
17	47.19(5)	1.924(2)	48(9)	0.42(5)	23(3)	0.2(2)	215(26)
18	50.298(11)	1.8125(4)	242(20)	0.226(12)	64(2)	2.1(4)	405(21)

(continuação)

19	50.984(16)	1.7898(5)	35(8)	0.43(7)	17.8(18)	4(3)	213(33)
20	55.103(7)	1.66531(19)	302(22)	0.141(10)	62(2)	3.3(12)	661(48)
21	55.419(12)	1.6566(3)	110(14)	0.131(18)	23.1(18)	0.8(4)	714(98)
22	60.122(4)	1.53773(9)	714(34)	0.116(5)	122(3)	0.49(8)	824(39)
23	67.933(5)	1.37868(8)	670(33)	0.138(5)	116(3)	1.8(3)	725(25)
24	68.341(6)	1.37144(10)	753(35)	0.159(6)	151(3)	1.6(3)	631(23)
25	73.638(16)	1.2853(2)	48(9)	0.18(3)	11.8(13)	3.3(17)	589(105)
26	75.822(9)	1.25364(13)	229(20)	0.143(8)	40.2(16)	1.8(5)	738(39)
27	77.78(3)	1.2269(4)	43(8)	0.21(3)	9.4(13)	1.2(7)	517(66)
28	80.066(14)	1.19752(18)	116(14)	0.231(14)	29.7(15)	1.6(4)	469(28)
29	81.300(7)	1.18244(8)	253(21)	0.126(6)	37(3)	1.3(3)	866(44)
30	81.623(19)	1.1786(2)	88(12)	0.26(3)	27(2)	1.8(6)	414(49)
31	83.929(9)	1.15196(10)	197(18)	0.133(12)	40.9(16)	0.6(2)	839(77)

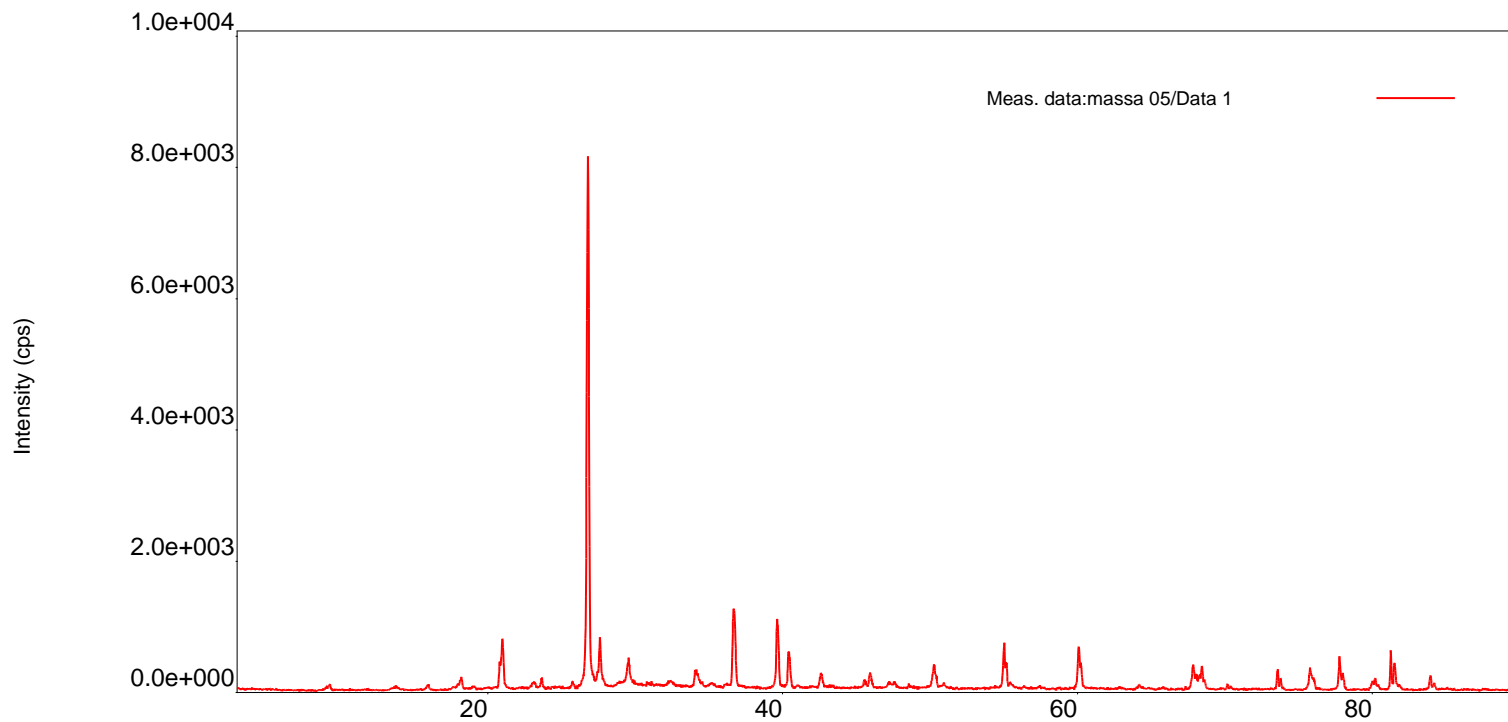


Figura III.11 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

(continua)

Tabela III.11 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.29(3)	9.51(3)	45(9)	0.32(3)	15.2(17)	3.4(17)	263(23)
2	13.75(3)	6.435(13)	27(7)	0.58(4)	17.2(13)	1.1(2)	145(11)
3	15.94(3)	5.555(9)	49(9)	0.19(2)	10.9(13)	1.4(8)	435(51)
4	18.21(2)	4.868(6)	118(14)	0.19(3)	41(2)	2.3(13)	442(77)
5	20.985(4)	4.2298(8)	616(32)	0.128(8)	138(5)	1.1(4)	661(43)
6	23.13(3)	3.843(5)	64(10)	0.27(3)	22.8(18)	1.5(6)	308(35)
7	23.683(14)	3.754(2)	108(13)	0.114(17)	15.6(15)	4(2)	743(112)
8	25.76(2)	3.455(3)	69(11)	0.11(3)	9.9(18)	2.0(15)	746(181)
9	26.795(4)	3.3244(5)	6175(101)	0.142(3)	1074(11)	1.56(17)	599(12)
10	27.604(9)	3.2287(11)	567(31)	0.12(2)	118(4)	1.3(6)	733(125)
11	29.54(2)	3.022(2)	252(21)	0.23(3)	98(3)	1.4(7)	370(53)
12	32.380(18)	2.7626(15)	43(8)	0.32(5)	15(3)	1.0(7)	269(41)
13	34.08(2)	2.6288(18)	151(16)	0.295(19)	50(3)	0.37(14)	294(19)
14	35.19(7)	2.548(5)	32(7)	0.25(6)	8.8(17)	1.4(16)	351(85)
15	36.660(6)	2.4493(4)	1020(41)	0.160(5)	192(3)	0.66(10)	546(16)
16	39.625(5)	2.2726(3)	934(39)	0.126(5)	144(3)	1.02(15)	699(28)
17	40.403(8)	2.2306(4)	529(30)	0.118(8)	79(3)	0.65(18)	748(51)
18	42.592(19)	2.1209(9)	171(17)	0.17(2)	38(2)	1.2(6)	528(75)

## ANEXO III

(continuação)

19	45.552(10)	1.9897(4)	107(13)	0.110(12)	13.6(10)	1.3(5)	820(87)
20	45.929(10)	1.9742(4)	189(18)	0.142(11)	30.8(14)	1.1(3)	633(49)
21	47.40(6)	1.916(2)	46(9)	0.54(5)	26(3)	1.2(5)	167(15)
22	50.285(11)	1.8130(4)	296(22)	0.183(14)	72(3)	1.9(5)	500(37)
23	50.95(5)	1.7907(17)	43(8)	0.29(8)	16(2)	3.0(17)	319(83)
24	55.027(10)	1.6674(3)	614(32)	0.131(11)	120(4)	1.1(5)	716(61)
25	60.097(6)	1.53830(13)	628(32)	0.141(5)	112(2)	1.6(3)	679(25)
26	64.21(2)	1.4492(5)	48(9)	0.19(4)	11.0(16)	2.6(14)	513(99)
27	67.869(7)	1.37982(13)	314(23)	0.190(7)	65(3)	2.2(4)	527(20)
28	68.29(3)	1.3723(6)	166(17)	0.31(5)	57(8)	1.3(6)	324(58)
29	68.437(9)	1.36975(16)	180(17)	0.103(19)	21(7)	0.5(2)	975(176)
30	70.178(16)	1.3400(3)	81(12)	0.101(16)	10.0(11)	0.8(5)	1003(154)
31	73.586(7)	1.28610(10)	305(23)	0.107(7)	42.7(15)	1.4(4)	969(60)
32	75.799(8)	1.25396(12)	283(22)	0.208(9)	69.8(19)	1.3(2)	504(21)
33	77.770(5)	1.22703(7)	450(27)	0.156(4)	82.3(18)	0.69(10)	682(19)
34	79.98(2)	1.1985(3)	105(13)	0.32(2)	37(2)	0.34(11)	334(23)
35	81.257(4)	1.18295(5)	593(31)	0.101(4)	70(4)	0.85(13)	1084(42)
36	81.585(14)	1.17902(17)	133(15)	0.22(2)	35(3)	1.6(5)	500(52)
37	83.954(9)	1.15168(10)	206(19)	0.137(9)	36.2(14)	1.5(4)	813(51)

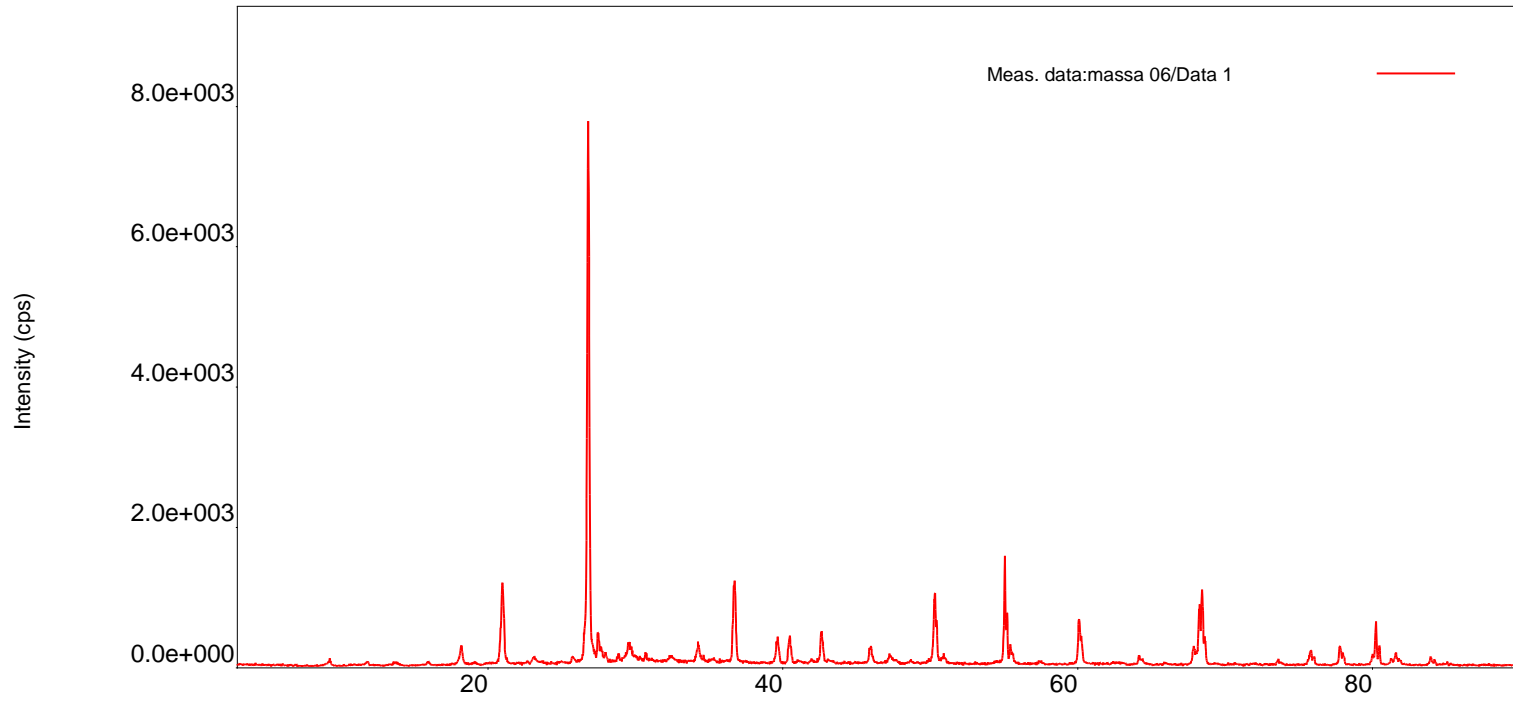


Figura III.12 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H<sub>2</sub>O.



Tabela III.12 Resultados dos picos obtidos para os CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em H<sub>2</sub>O.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.263(18)	9.539(19)	53(9)	0.19(3)	16.8(13)	1.1(5)	430(57)
2	13.70(6)	6.46(3)	22(6)	0.36(6)	9.4(15)	0.7(5)	232(36)
3	15.97(3)	5.546(12)	36(8)	0.20(4)	10.8(9)	1.6(10)	425(78)
4	18.166(10)	4.879(3)	192(18)	0.165(15)	51(2)	0.63(19)	508(48)
5	20.988(6)	4.2292(11)	780(36)	0.215(4)	199(3)	1.35(13)	393(8)
6	23.11(4)	3.846(7)	65(10)	0.23(5)	25(2)	0.9(8)	367(84)
7	26.795(6)	3.3244(8)	5752(98)	0.140(4)	1035(15)	1.2(2)	610(19)
8	27.430(14)	3.2489(16)	295(22)	0.13(3)	76(5)	0.3(2)	665(155)
9	29.53(2)	3.022(2)	166(17)	0.30(5)	84(5)	0.51(14)	291(49)
10	34.24(3)	2.617(3)	155(16)	0.21(4)	43(3)	1.1(9)	422(85)
11	36.706(7)	2.4464(5)	905(39)	0.170(5)	177(3)	1.4(2)	513(16)
12	39.650(12)	2.2712(6)	252(20)	0.196(10)	52(2)	2.3(6)	451(23)
13	40.461(11)	2.2276(6)	305(23)	0.153(11)	53(2)	1.8(5)	578(40)
14	42.608(10)	2.1202(5)	398(26)	0.126(13)	73(3)	0.9(4)	705(73)
15	45.881(11)	1.9762(4)	186(18)	0.177(11)	37.2(16)	0.38(11)	509(30)
16	47.26(2)	1.9218(9)	87(12)	0.21(4)	30(2)	1.2(6)	421(80)
17	50.312(4)	1.81206(14)	937(40)	0.140(4)	169(3)	1.7(2)	655(20)

(continuação)

18	50.89(4)	1.7929(12)	68(11)	0.29(4)	26(2)	1.4(6)	314(48)
19	55.072(3)	1.66619(7)	1473(50)	0.098(2)	190(3)	1.6(2)	952(23)
20	55.430(7)	1.65625(18)	244(20)	0.129(9)	41.3(16)	0.64(13)	724(50)
21	60.096(3)	1.53832(8)	637(33)	0.146(3)	116.8(17)	1.08(11)	655(16)
22	64.173(15)	1.4501(3)	108(13)	0.156(18)	22.0(15)	0.8(4)	629(72)
23	67.874(9)	1.37974(15)	231(20)	0.193(10)	50.9(18)	1.01(15)	518(28)
24	68.268(4)	1.37273(8)	792(36)	0.135(7)	121(6)	1.3(2)	745(41)
25	68.430(5)	1.36988(9)	660(33)	0.132(8)	100(6)	0.72(16)	760(46)
26	73.57(2)	1.2863(3)	61(10)	0.163(17)	10.7(13)	0.8(4)	635(66)
27	75.838(3)	1.25342(5)	181(17)	0.200(10)	41.2(16)	4.3(17)	526(25)
28	77.769(7)	1.22705(9)	280(22)	0.159(6)	52.7(15)	0.51(11)	669(24)
29	80.010(16)	1.1982(2)	111(14)	0.18(2)	26(3)	1.0(5)	594(78)
30	80.233(4)	1.19545(5)	523(30)	0.103(4)	69(3)	1.3(2)	1049(43)
31	81.629(8)	1.17850(9)	95(13)	0.39(2)	43(2)	4.8(11)	281(18)
32	83.938(10)	1.15186(11)	123(14)	0.116(14)	22.1(13)	0.5(2)	965(121)



## Anexo IV MATERIAIS, RESULTADOS E DISCUSSÃO DA SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste anexo IV serão apresentados materiais utilizados e os resultados obtidos da segunda campanha experimental.

### 1 Materiais

A Tabela IV.1 apresenta a composição química dos cimentos utilizados na campanha experimental e a Tabela IV.2 a quantificação do traço de argamassa utilizado.

Tabela IV.1 Composição química dos cimentos utilizados no segundo estudo.

Cimento Portland	Componentes (% em massa)			
	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória Granulada de Alto-Forno	Material Carbonático	Material Pozolânico
CPH-E-32 R	56 – 94	6 – 34	0 – 10	---
CPH-40-RS	25 – 65	35 – 70	0 – 5	---
CPH-32-RS	45 – 85	---	0 – 5	15 – 50
CPV-ARI-RS	100 – 95	---	0 – 5	---

Fonte: adaptado da NBR 5733/1991 e NBR 11578/1991.

Tabela IV.2 Quantificação do traço de argamassa do segundo estudo.

<b>Componentes</b>	<b>CPII-E-32</b>	<b>CPIII-40-RS</b>	<b>CPIV-32-RS</b>	<b>CPV-ARI-RS</b>
Cimento (g)	700	700	700	700
Areia Média Fina Quartzosa + Areia Quartzosa Rosa (g)	2100	2100	2100	2100
Água (g)	364	364	364	364
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2073	2042	1714	2120

## 2 Resultados e discussão

Nesta seção serão analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados nos CP's de pasta de cimento e argamassa. Para este estudo somente foi realizado o ensaio complementar de DRX.

## 2.1 Ensaios em Pasta de cimento

Tabela IV.3 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de massa dos CP's de pasta de cimento.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Varição Mínima (g)	Varição Máxima (g)
CPII-E-32 R	1		2,3	15,3
	2		4,1	14,3
	3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,6	13,4
	4		5,0	11,9
	5		2,7	9,1
	6		1,0	14,2
	7		0,1	11,9
	8	H <sub>2</sub> O	1,0	15,7
	9		1,6	9,5
	10		1,6	10,6
CPIII-40-RS	11		- 1,4	3,9
	12		- 1,8	2,6
	13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,8	4,7
	14		- 0,2	1,5
	15		- 2,5	4,4
	16		1,6	4,3
	17		1,5	4,2
	18	H <sub>2</sub> O	2,2	4,1
	19		1,8	3,4
	20		1,8	3,7
CPV-ARI-RS	21		2,2	15,8
	22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5,6	10,6
	23		2,5	12,3
	24		5,9	9,9
	25		2,6	10,5
	26	H <sub>2</sub> O	3,1	18,5
	27		3,1	20,2
	28		2,8	18,5
CPIV-32-RS	29		- 5,2	0,8
	30		- 2,7	- 0,1
	31	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1,5	- 0,1
	32		- 3,9	- 0,1
	33		1,1	2,9
	34		- 0,6	1,9
	35	H <sub>2</sub> O	- 0,9	2,2
	36		- 0,5	1,9
	37		- 0,6	3,6

Tabela IV.4 Resultados dos valores máximos e mínimos para a variação de comprimento dos CP's de pasta de cimento.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Variação Mínima (mm)	Variação Máxima (mm)
CPII-E-32 R	1		- 0,24	1,78
	2		- 0,58	1,51
	3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,07	0,50
	4		- 0,50	1,46
	5		0,05	1,28
	6		- 0,01	0,20
	7		- 0,02	0,30
	8	H <sub>2</sub> O	- 0,54	0,47
	9		- 0,97	0,16
	10		- 0,08	0,46
CPIII-40-RS	11		- 0,12	1,87
	12		- 0,03	0,95
	13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,07	0,06
	14		- 0,32	0,27
	15		- 0,05	0,16
	16		- 0,40	0,28
	17		- 0,42	0,32
	18	H <sub>2</sub> O	- 0,01	0,30
	19		- 0,45	0,16
	20		- 0,48	- 0,03
CPV-ARI-RS	21		- 0,31	0,52
	22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,51	0,35
	23		- 0,10	0,44
	24		0,16	0,73
	25		0,03	0,38
	26	H <sub>2</sub> O	- 0,29	0,34
	27		- 0,14	0,42
	28		0,01	0,39
CPIV-32-RS	29		- 0,34	0,53
	30		- 0,41	0,14
	31	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 0,06	0,13
	32		- 0,23	0,38
	33		- 0,71	0,97
	34		- 0,14	0,17
	35	H <sub>2</sub> O	- 0,48	0,03
	36		- 0,12	0,44
	37		- 0,69	0,62

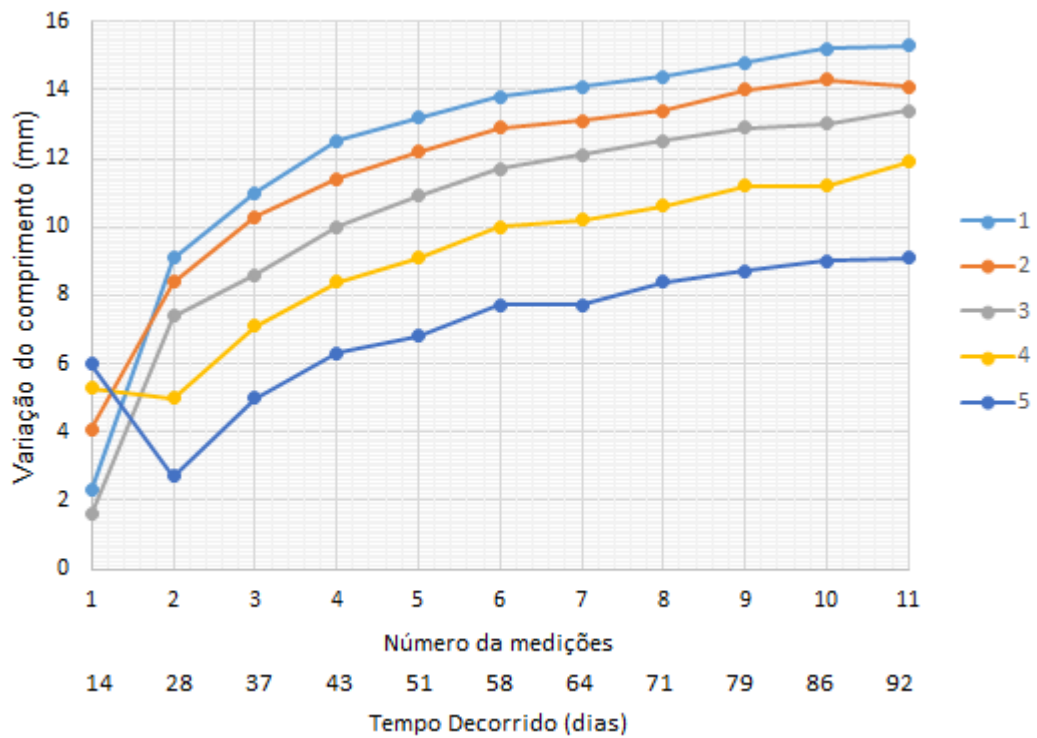


Figura IV.1 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

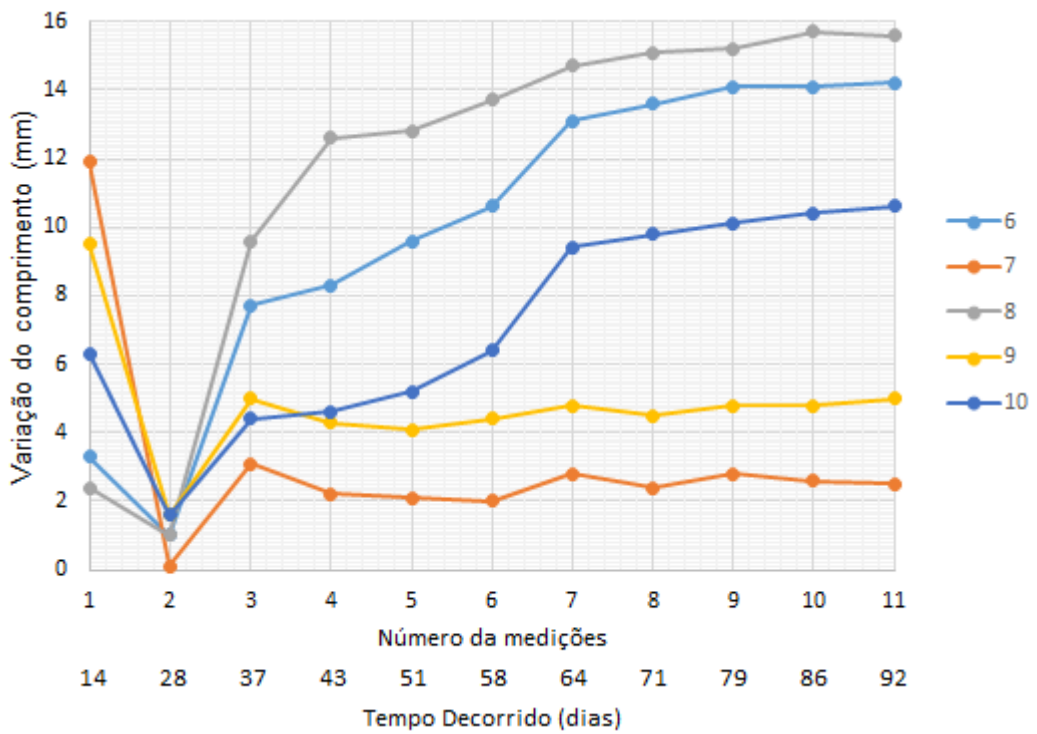


Figura IV.2 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em H<sub>2</sub>O.



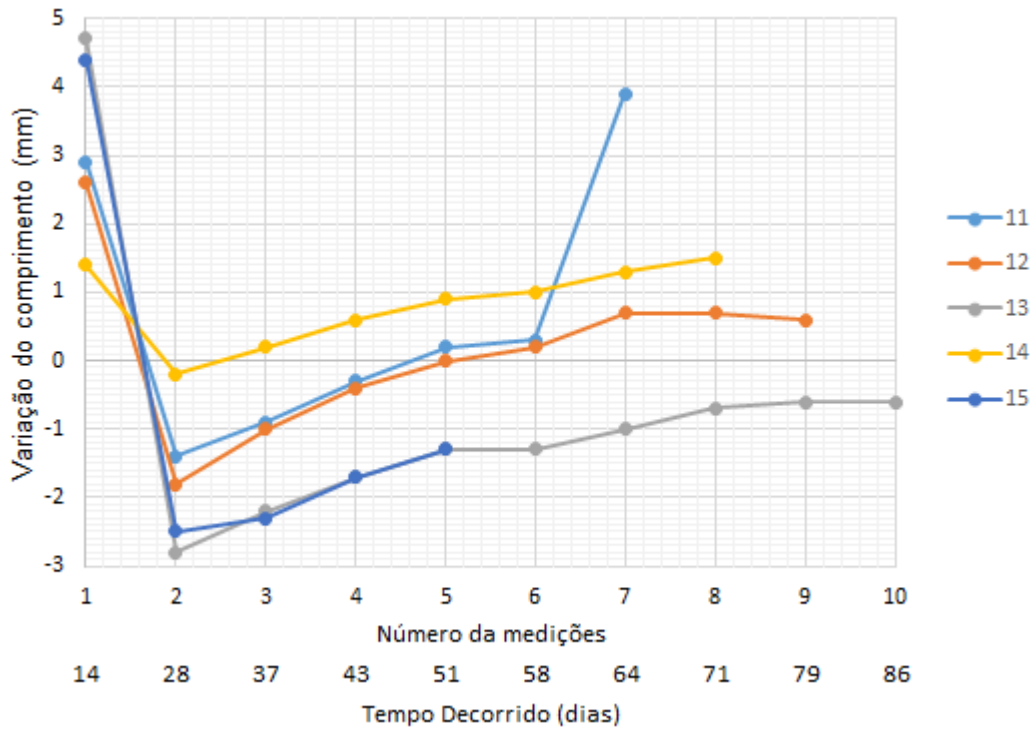


Figura IV.3 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para C-III-40-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

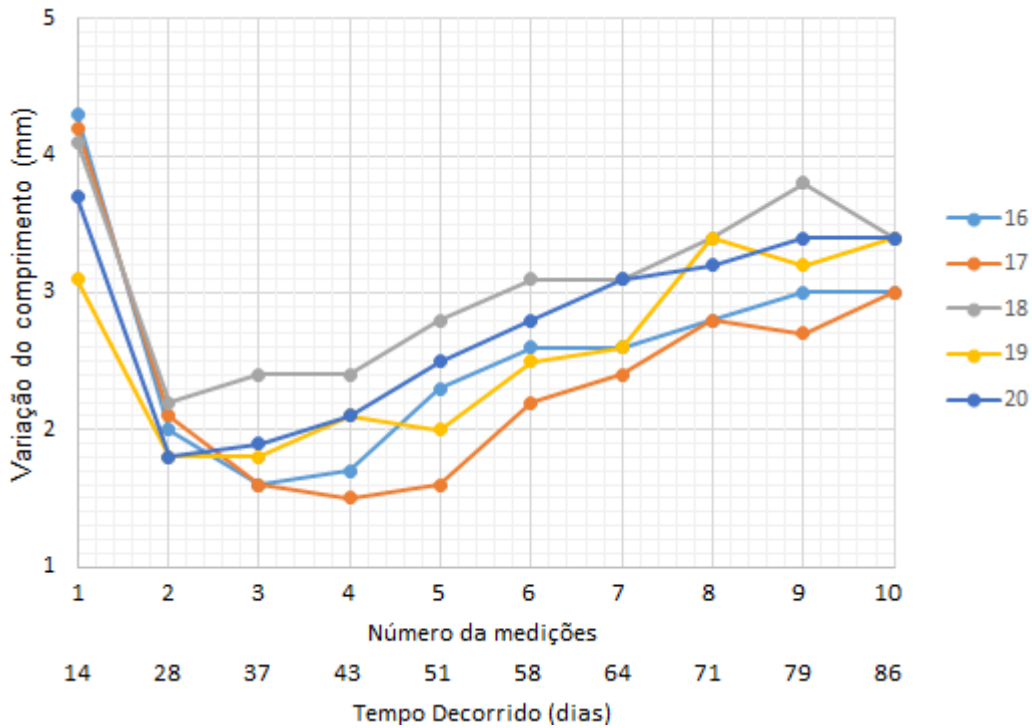


Figura IV.4 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para C-III-40-RS em H<sub>2</sub>O.

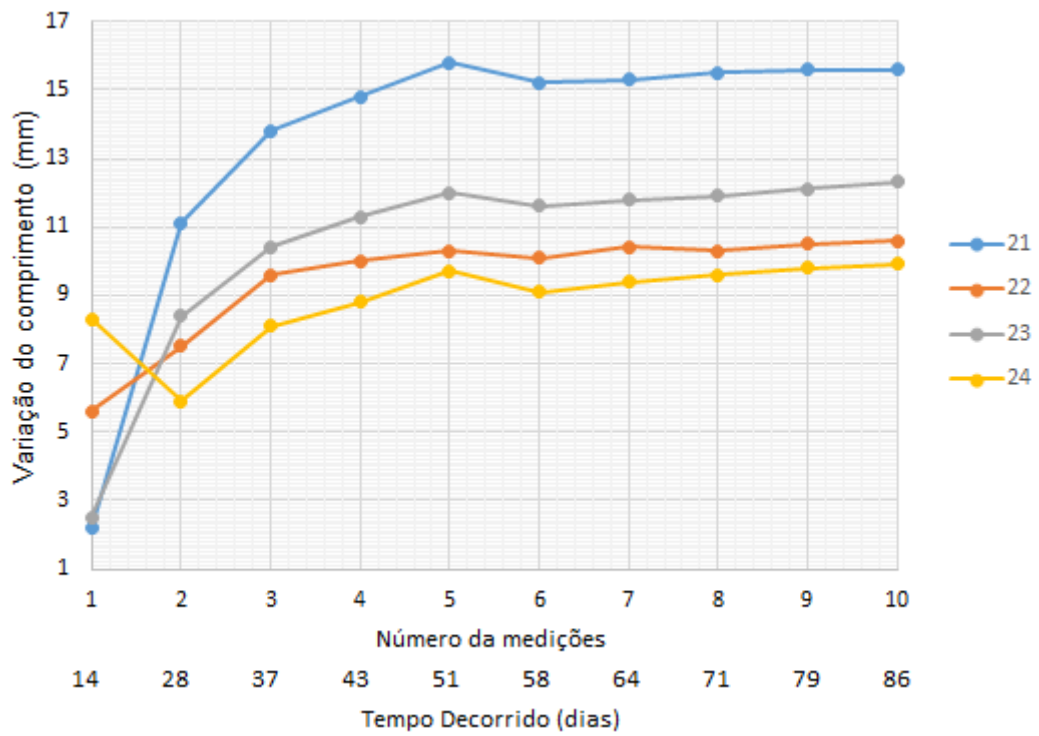


Figura IV.5 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

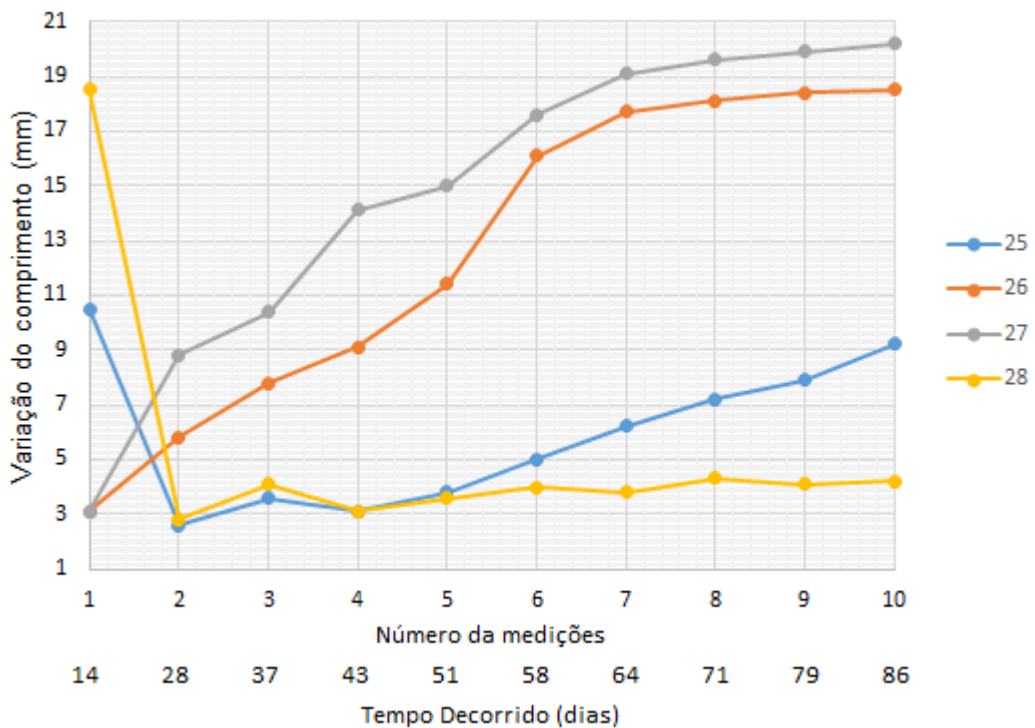


Figura IV.6 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em H<sub>2</sub>O.

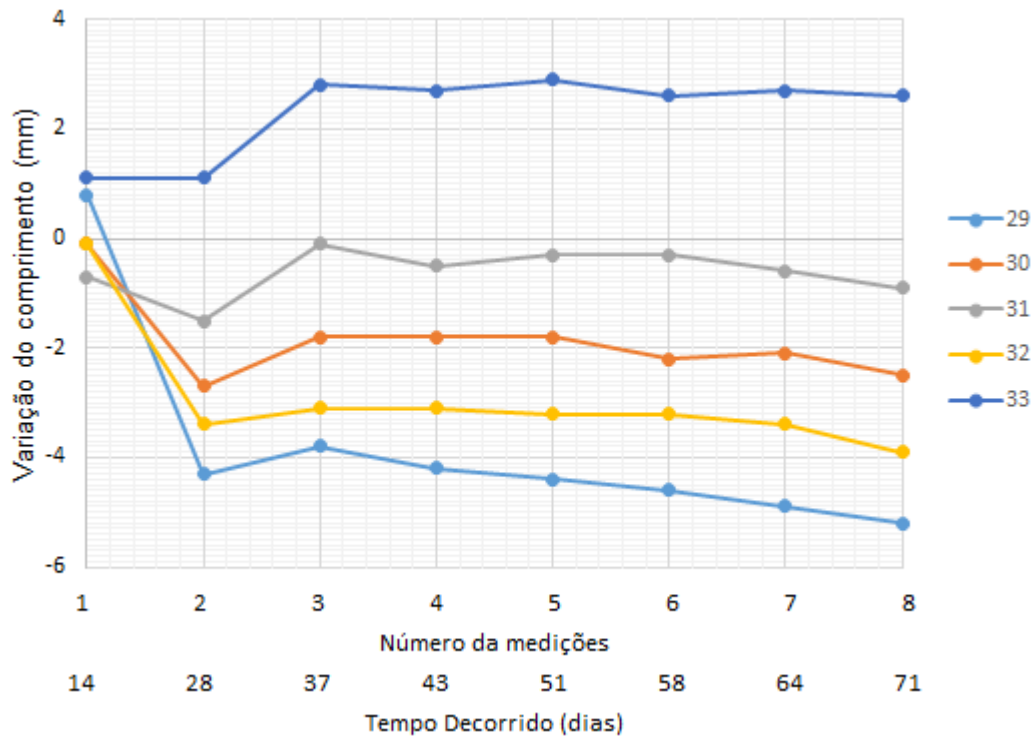


Figura IV.7 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPIV-32-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

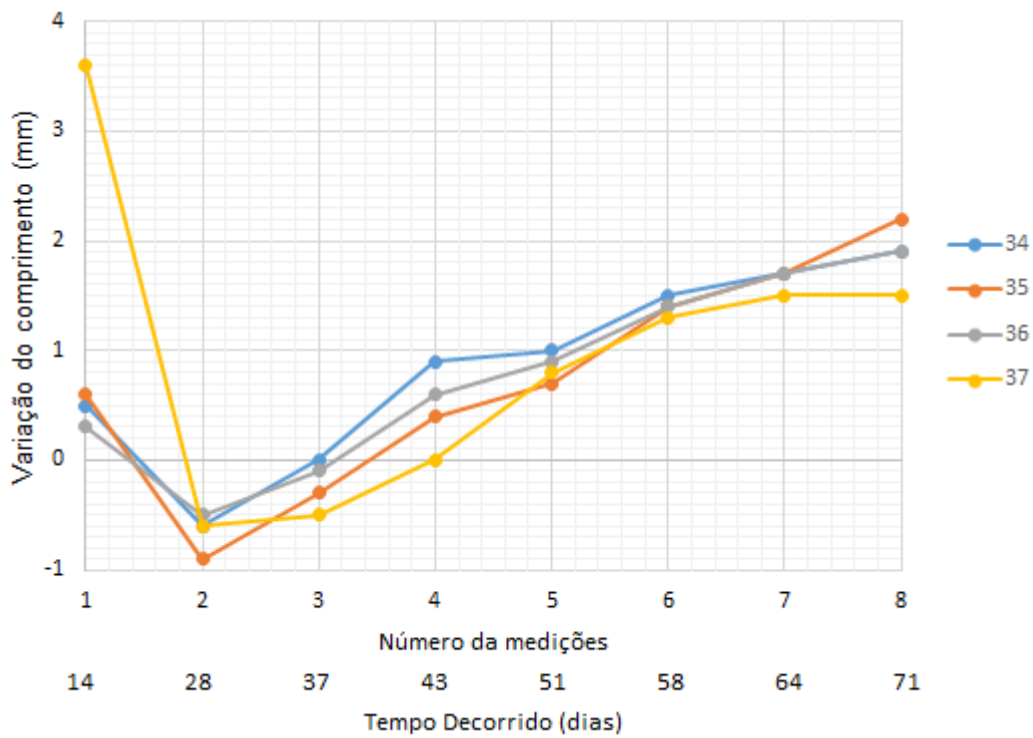


Figura IV.8 Variação de massa nos CP's de pasta de cimento para CPIV-32-RS em H<sub>2</sub>O.

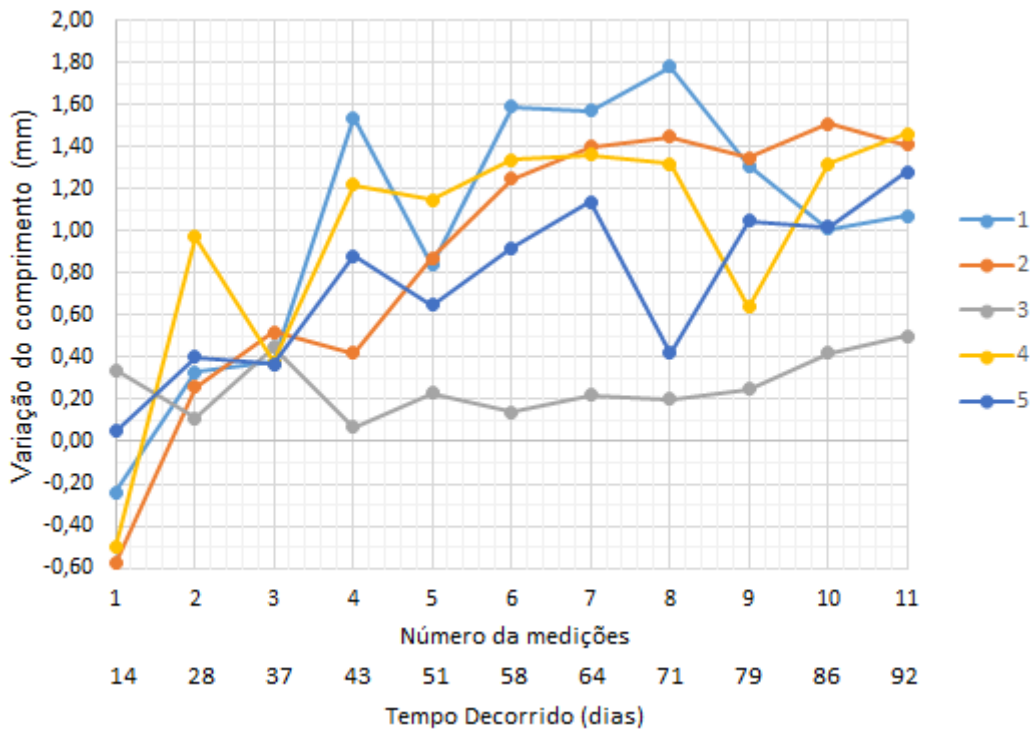


Figura IV.9 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

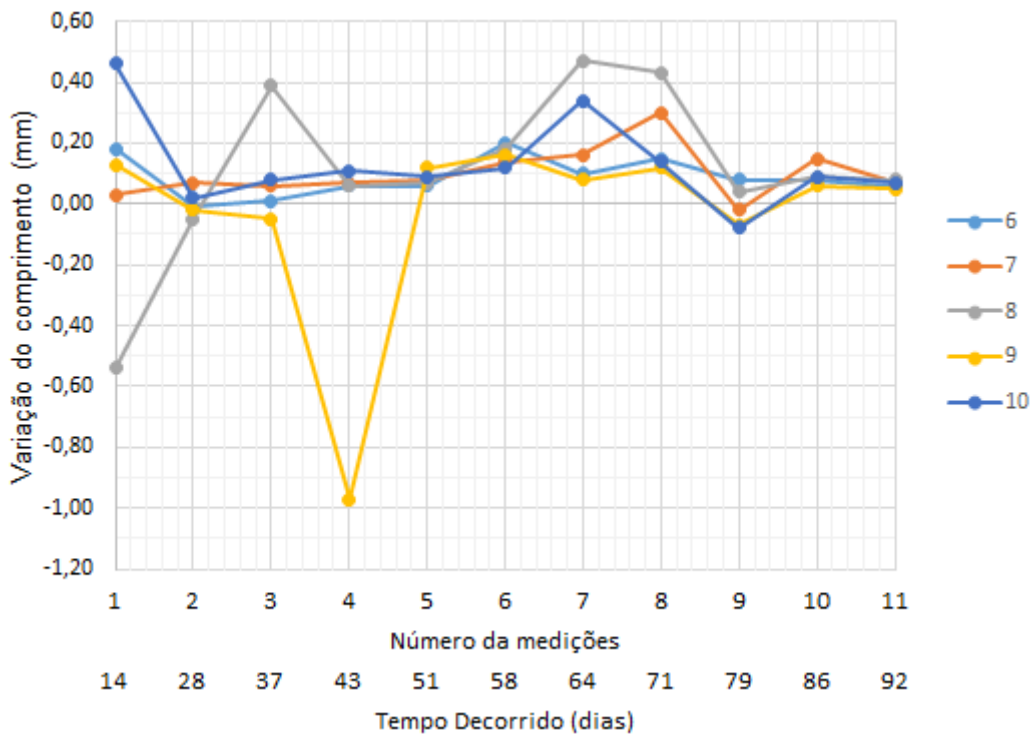


Figura IV.10 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CII-E-32 R em H<sub>2</sub>O.

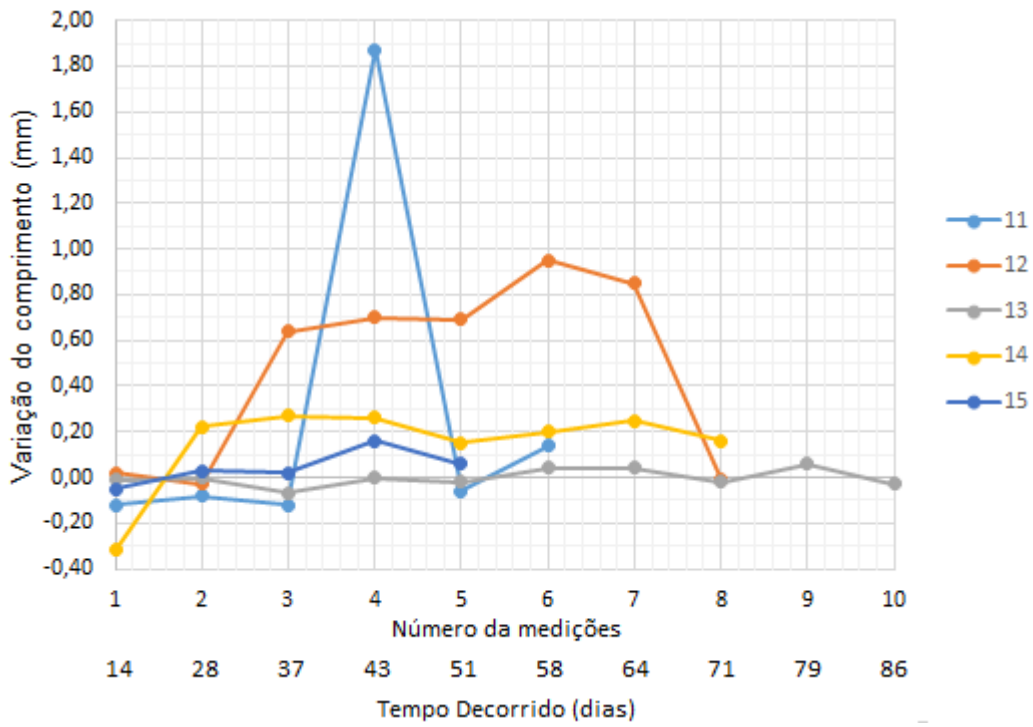


Figura IV.11 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CIII-40-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

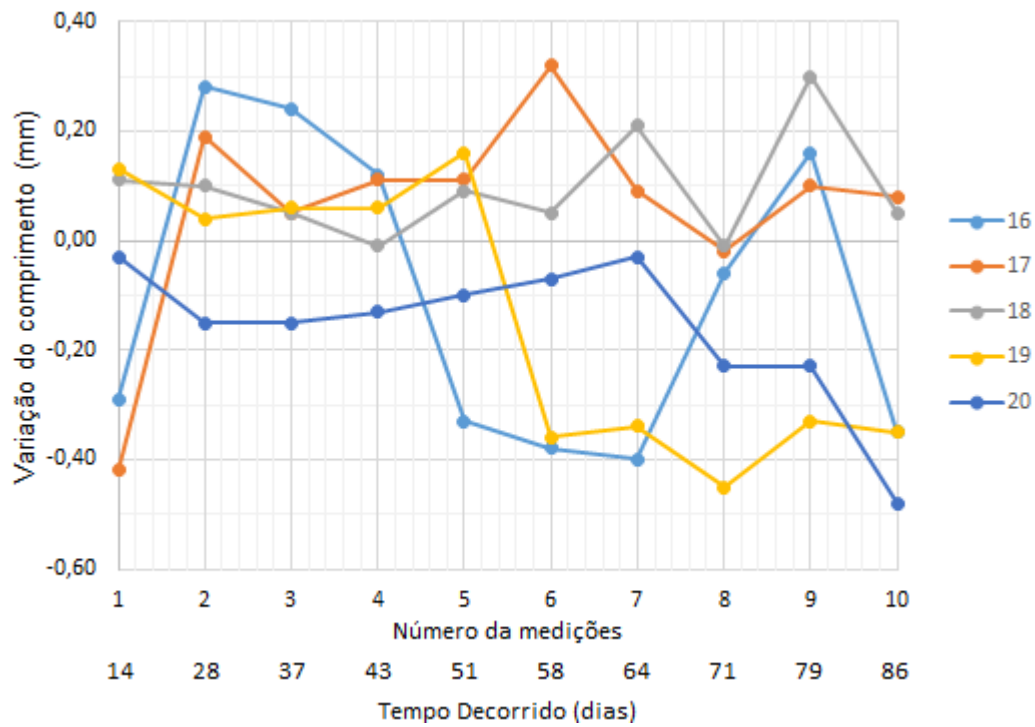


Figura IV.12 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CIII-40-RS em H<sub>2</sub>O.

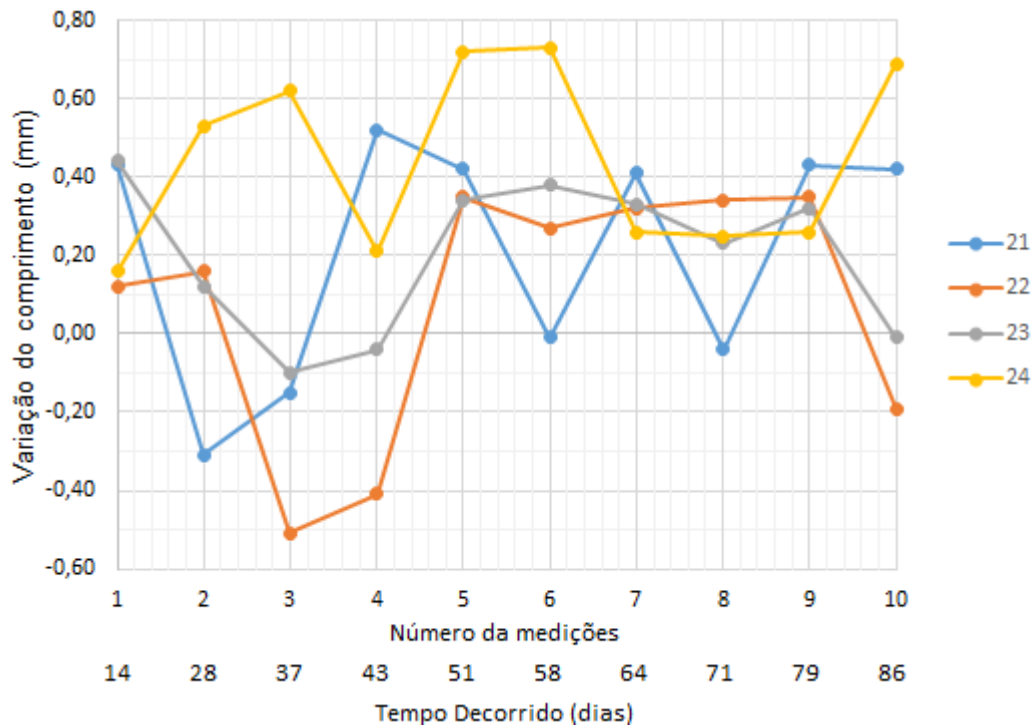


Figura IV.13 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

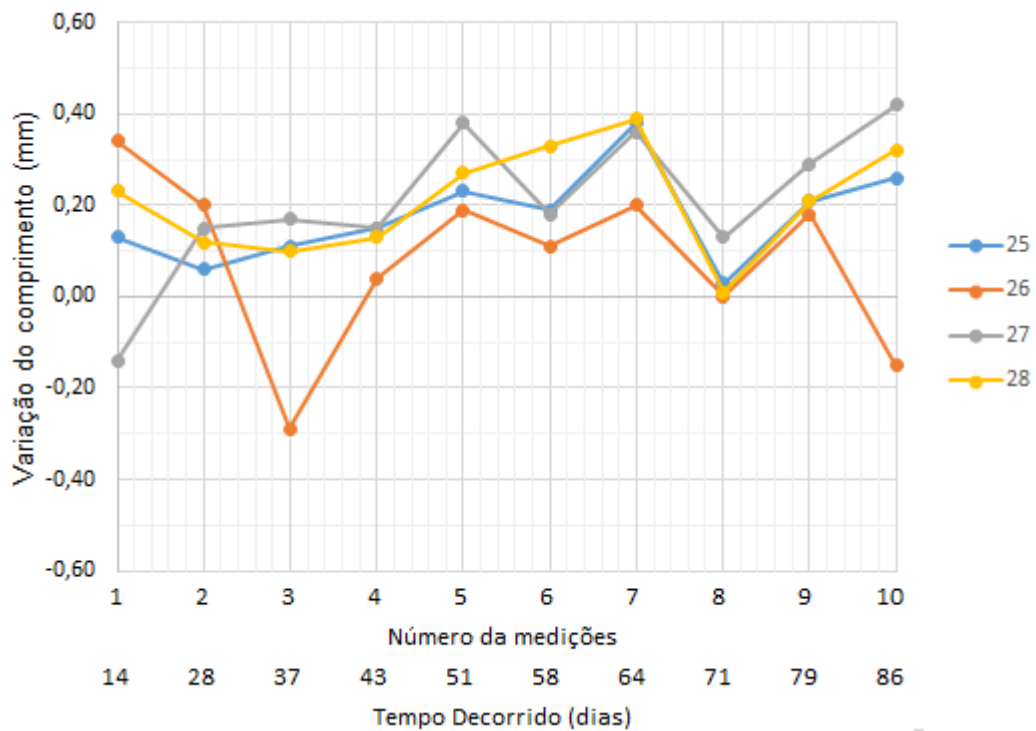


Figura IV.14 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CPV-ARI-RS em H<sub>2</sub>O.

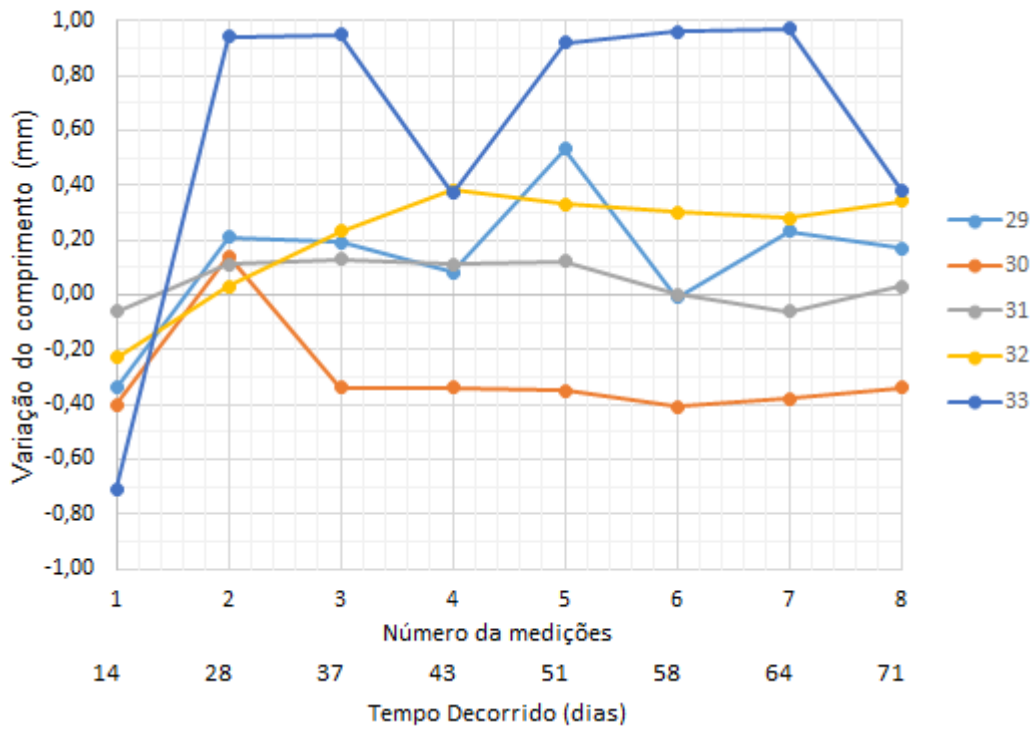


Figura IV.15 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CPIV-32-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

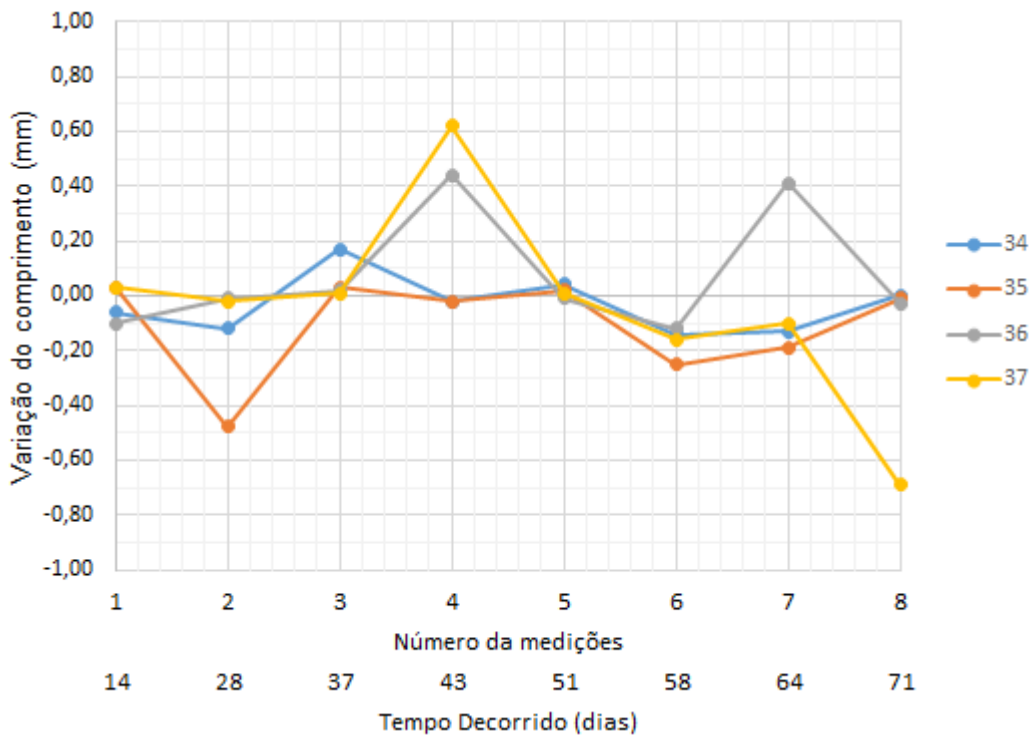


Figura IV.16 Variação de comprimento nos CP's de pasta de cimento para CPIV-32-RS em H<sub>2</sub>O.

A Tabela IV.5 apresenta a expansão dos corpos de prova de pasta de cimento, com excessão dos CP's de número 13, 16, 19, 20, 30, 31, 34, 35, 36 e 37, os demais apresentaram expansão superior a descrita por Marciano (1993) citado por Souza (2006).

Tabela IV.5 Expansão dos CP's de pasta de cimento expostos a solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5% aos 42 dias.

Cimento Portland	Nº do CP	Cura	Expansão em %
CPII-E-32 R	1		0,560
	2		0,439
	3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,049
	4		0,471
	5		0,323
	6		0,070
	7		0,049
	8	H <sub>2</sub> O	0,063
	9		0,056
	10		0,042
CPIII-40-RS	11		--- <sup>a</sup>
	12		0,300
	13	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,014
	14		0,087
	15		--- <sup>a</sup>
	16		- 0,141
	17		0,032
	18	H <sub>2</sub> O	0,074
	19		- 0,120
	20		- 0,011
CPV-ARI-RS	21		0,144
	22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,113
	23		0,116
	24		0,091
	25		0,134
	26	H <sub>2</sub> O	0,070
	27		0,126
	28		0,137
CPIV-32-RS	29		0,059
	30		- 0,120
	31	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,011
	32		0,119
	33		0,134
	34		0,000
	35	H <sub>2</sub> O	- 0,004
	36		- 0,011
	37		0,243

a. Estes CP's se quebraram antes de atingir a idade de 42 dias.



## 2.2 Ensaio em Argamassa

Tabela IV.6 Resultados obtidos para a variação de massa dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Cura	Varição Média Mínima (g)	Varição Média Máxima (g)	Média ± DP <sup>a</sup> (n)
CPII-E-32 R	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,6	3,5	2,8 ± 3,3 (8)
	H <sub>2</sub> O	- 0,1	3,7	2,8 ± 0,6 (7)
CPIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 3,9	- 3,4	- 3,6 ± 0,4 (8)
	H <sub>2</sub> O	1,1	2,5	1,9 ± 0,4 (7)
CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,4	2,9	2,2 ± 4,1 (8)
	H <sub>2</sub> O	4,9	7,5	6,6 ± 4,3 (7)
CPIV-32-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2,9	- 0,7	- 1,8 ± 2,4 (8)
	H <sub>2</sub> O	- 0,2	4,2	2,7 ± 1,9 (7)

a.Desvio Padrão, n=número de determinações.

Em geral, os CP's submetidos a solução de sulfatos (Figura IV.17, Figura IV.19, Figura IV.21 e Figura IV.23) apresentaram uma variação de massa bem sutil, alguns com acréscimo de massa e outros com perda, enquanto que os corpos de prova submetidos a cura em câmara úmida (Figura IV.18 e Figura IV.20) apresentaram uma maior variação da sua massa.

Os CP's de cimento CPV-ARI-RS (Figura IV.22) e CPIV-32-RS (Figura IV.24) curados em câmara úmida apresentaram resultados mais constantes em relação a variação de massa.

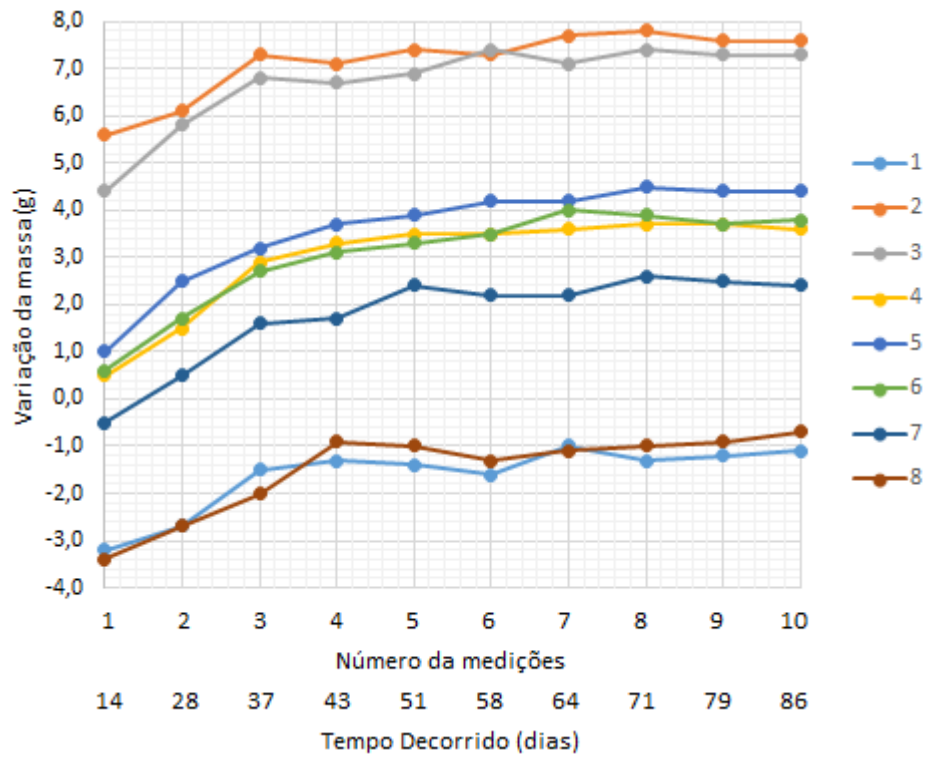


Figura IV.17 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPII-E-32 em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

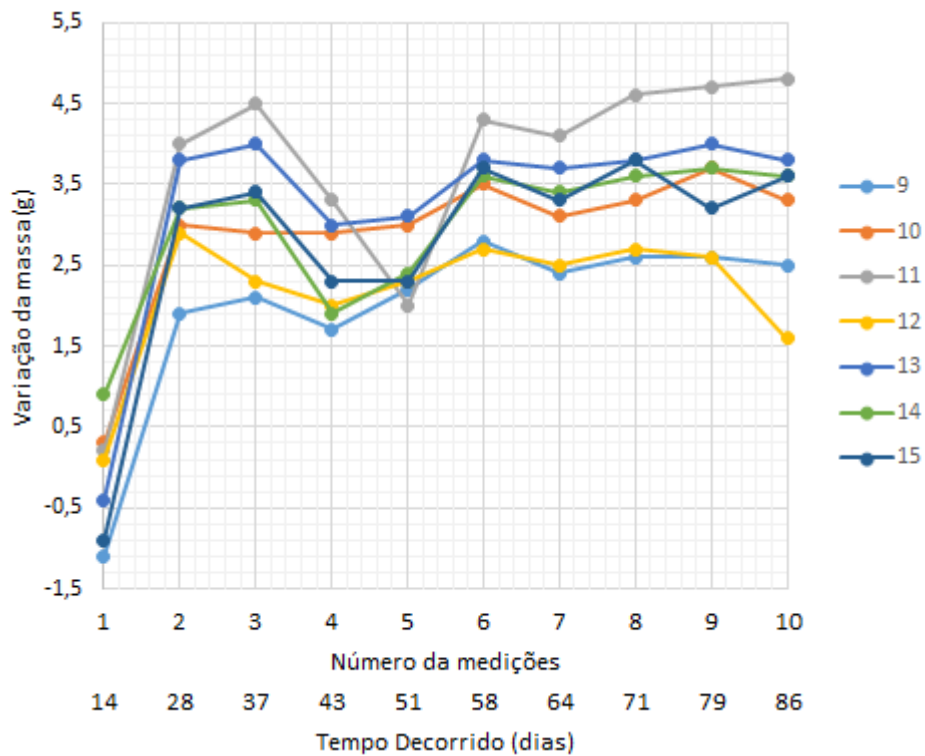


Figura IV.18 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPII-E-32 em H<sub>2</sub>O.

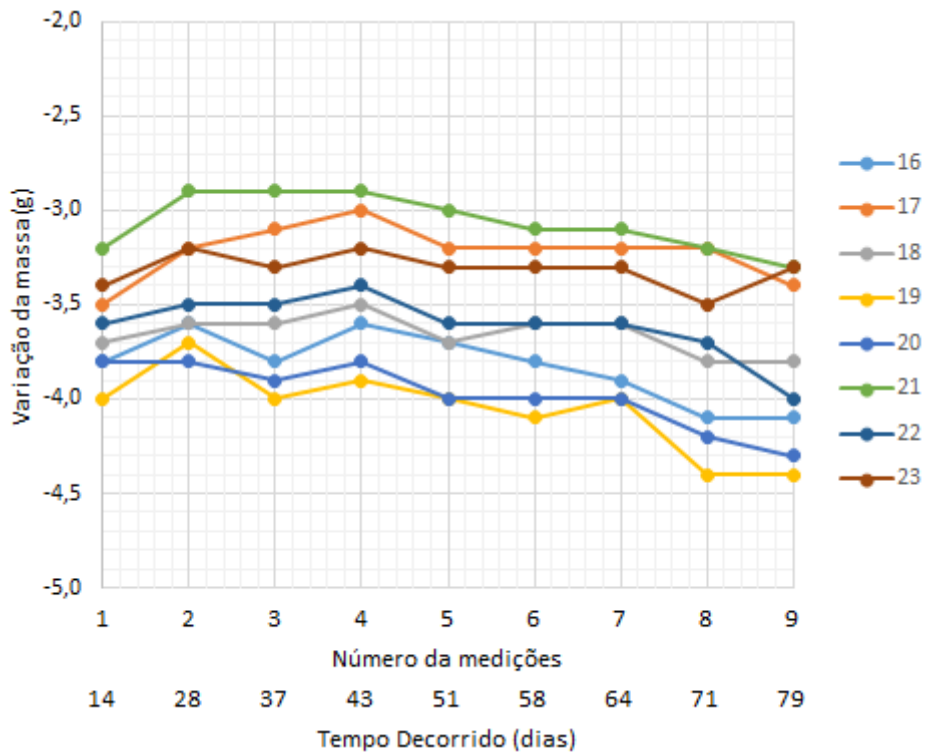


Figura IV.19 Variação de massa nos CP's de argamassa para CIII-40-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

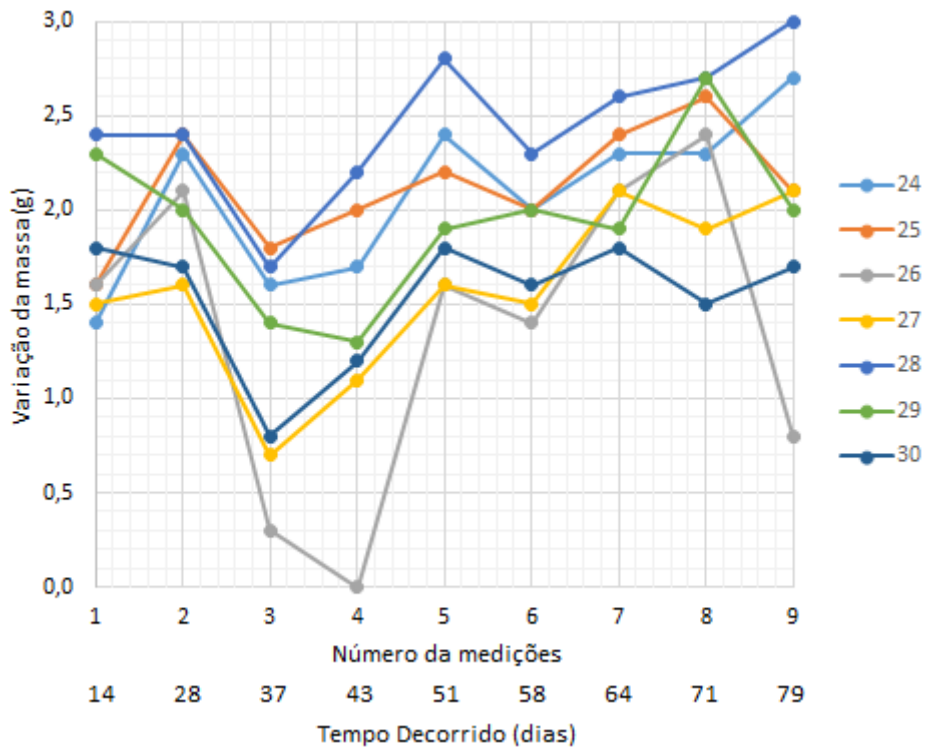


Figura IV.20 Variação de massa nos CP's de argamassa para CIII-40-RS em H<sub>2</sub>O.

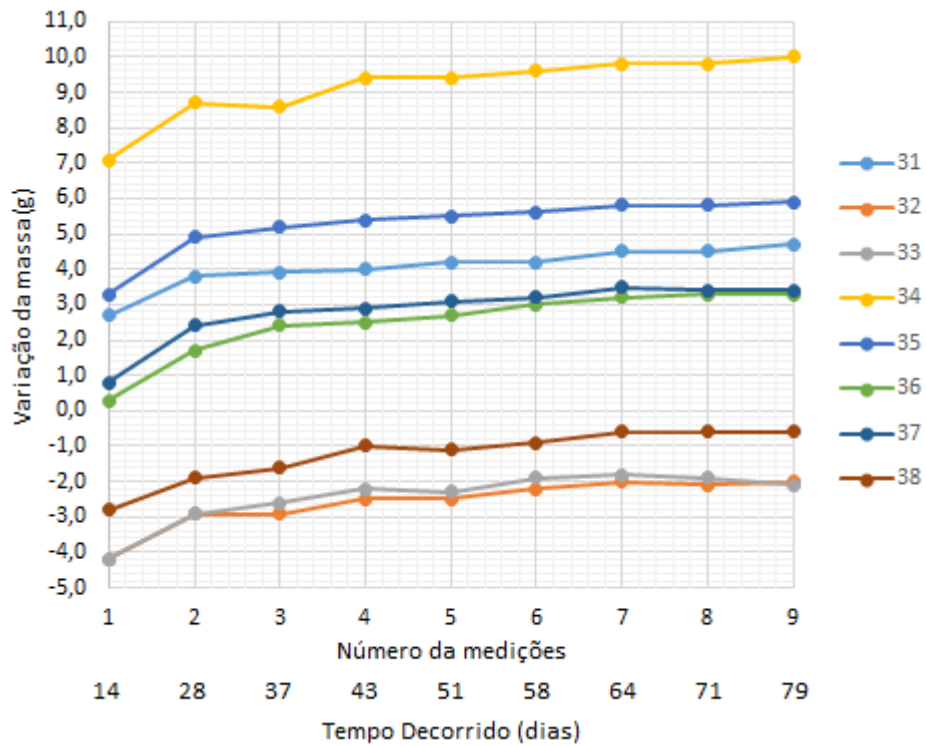


Figura IV.21 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPV-ARI-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

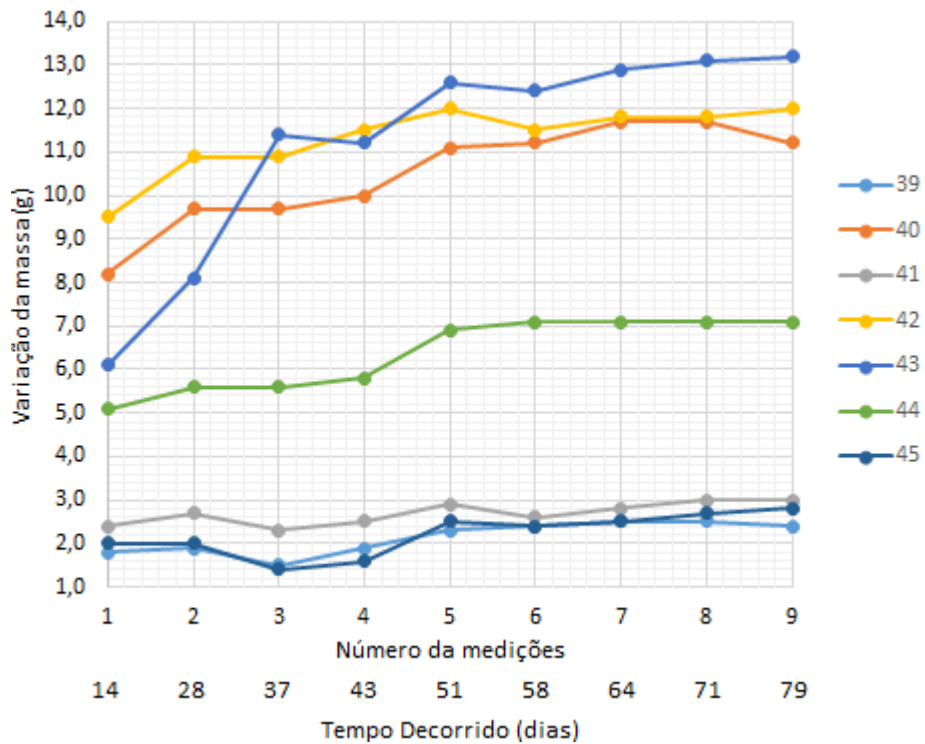


Figura IV.22 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPV-ARI-RS em H<sub>2</sub>O.

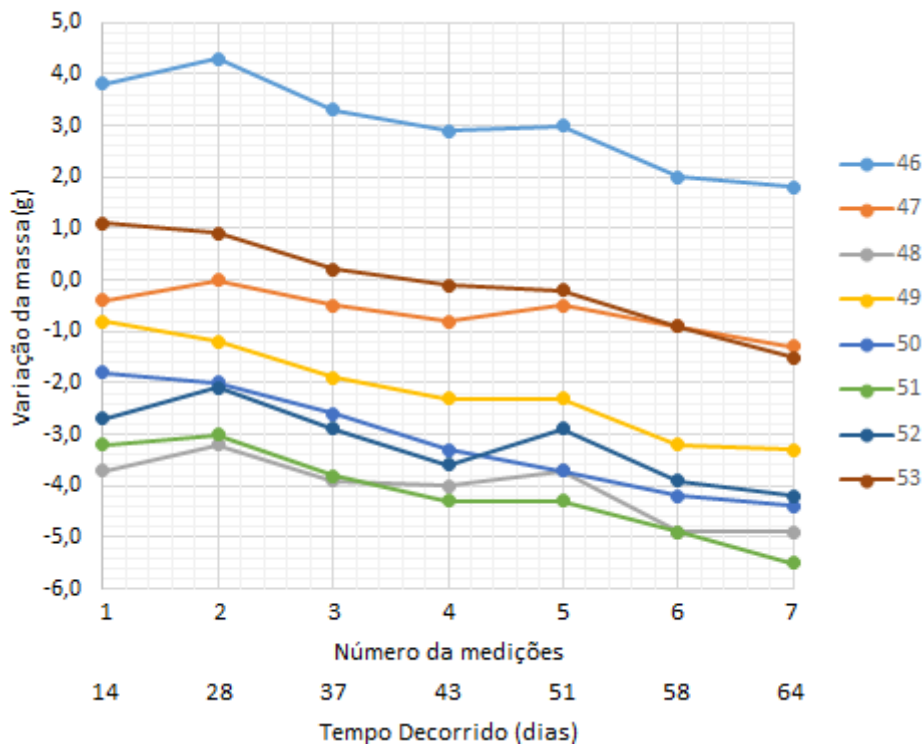


Figura IV.23 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPIV-32-RS em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

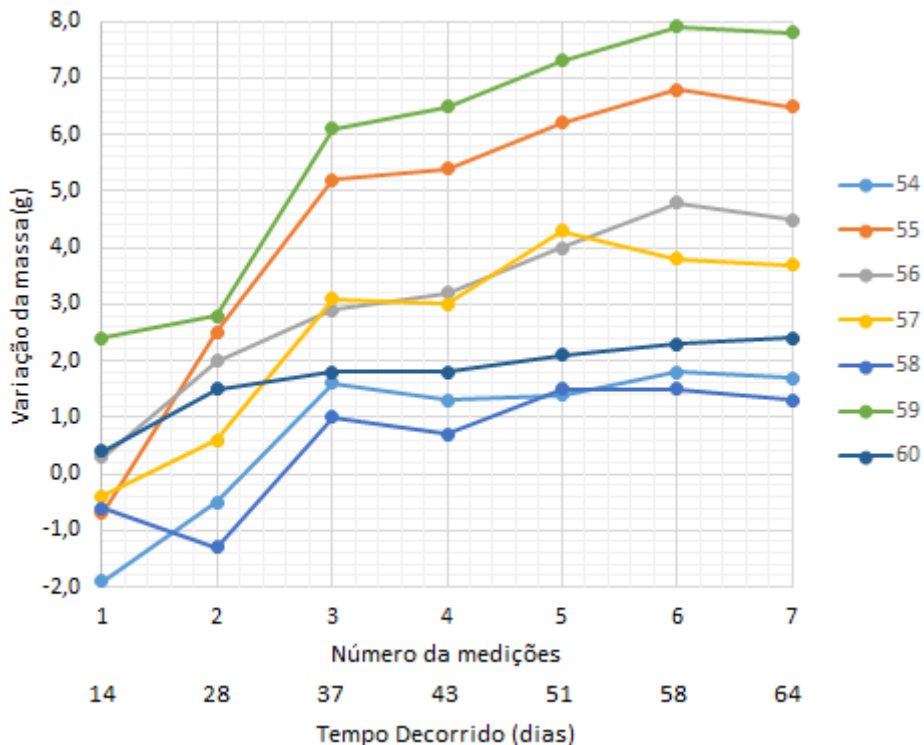


Figura IV.24 Variação de massa nos CP's de argamassa para CPIV-32-RS em H<sub>2</sub>O.

A Tabela IV.7 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de resistência à flexão dos CP's de argamassa. Os resultados para os diferentes grupos mostram que os CP's tratados na solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%, apresentaram valores superiores em relação ao grupo curado em câmara úmida, com exceção do resultado para os CP's de CII-E-32 R.

Tabela IV.7 Resistência à flexão (em MPa) dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Idade (dias)	Cura	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CII-E-32 R	81	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,4 ± 1,3 (8)	17,0
		H <sub>2</sub> O	7,6 ± 1,4 (7)	17,9
CIII-40-RS	67	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,6 ± 0,7 (8)	8,9
		H <sub>2</sub> O	5,9 ± 1,5 (7)	26,0
CPV-ARI-RS	67	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,4 ± 0,7 (8)	7,1
		H <sub>2</sub> O	7,0 ± 1,0 (7)	13,9
CIV-32-RS	52	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6,3 ± 2,2 (8)	35,3
		H <sub>2</sub> O	4,6 ± 1,3 (7)	28,2

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

A Tabela IV.8 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa.

Tabela IV.8 Resistência à compressão (em MPa) dos CP's de argamassa.

Cimento Portland	Idade (dias)	Cura	Média ± DP <sup>a</sup> (n)	DPR <sup>b</sup> %
CII-E-32 R	81	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30,3 ± 2,7 (16)	9,0
		H <sub>2</sub> O	33,1 ± 2,0 (14)	6,1
CIII-40-RS	67	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	41,6 ± 2,6 (16)	6,3
		H <sub>2</sub> O	36,4 ± 2,3 (14)	6,2
CPV-ARI-RS	67	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	47,8 ± 2,7 (16)	5,7
		H <sub>2</sub> O	49,6 ± 2,1 (14)	4,3
CIV-32-RS	52	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	17,4 ± 2,0 (16)	11,2
		H <sub>2</sub> O	17,2 ± 2,2 (14)	13,0

a.Desvio Padrão, b.Desvio Padrão Relativo, n=número de determinações.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão apresentaram valores muito próximos, os CP's de CIII-40-RS e CIV-32-RS tratados em solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5% apresentaram resultados superiores

aqueles do grupo controle. Já para os corpos de prova de CII-E-32 R e CPV-ARI-RS os resultados do ensaio de resistência à compressão foram superiores para os curados em câmara úmida.

Os valores de desvios padrão relativos inferiores 13,0 % indica uma boa reprodutibilidade dos resultados, indicando sua precisão.

### 2.3 Difractometria de Raios-X

Tabela IV.9 Contagem por segundo dos picos da etringita nas amostras de pasta de cimento.

Cimento Portland	Cura	Contagem por segundo nos picos:		
		9º	15,9º	22,9º
CII-E-32 R		164	184	177
CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22	nd	62
CPV-ARI-RS		152	108	148
CPV-32-RS		37	53	68

nd = não detectado.

Tabela IV.10 Contagem por segundo dos picos de gipsita nas amostras de pasta de cimento.

Cimento Portland	Cura	Contagem por segundo nos picos:	
		11,6º	20,8º
CII-E-32 R		nd	nd
CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30	nd
CPV-ARI-RS		nd	nd
CPV-32-RS		nd	nd

nd = não detectado.

**Anexo V    RESULTADO DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CP`s –  
SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL**



Tabela V.1 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CII-E-32 R.

<b>Data da Moldagem</b>	11/07/2016	<b>Idade</b>	81	dias
<b>Data do Ensaio</b>	30/09/2016			
<b>Composição da argamassa</b>	1:3:0,52			
<b>Vão Livre</b>	12	cm		

Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas (cm)			Carga à Flexão (kgf)	Módulo de Ruptura	
			Base	Altura	Comprimento		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
1	CII-E-32 R	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,121	4,012	16,026	310	84,1	8,4
2			4,378	4,020	16,112	270	68,7	6,9
3			4,391	4,022	16,124	330	83,6	8,4
4			4,424	4,028	16,089	300	75,2	7,5
5			4,248	4,014	16,074	300	78,9	7,9
6			4,181	4,018	16,037	310	82,7	8,3
7			4,161	4,031	16,074	260	69,2	6,9
8			4,075	4,016	16,087	170	46,6	4,7
9		H <sub>2</sub> O	4,081	4,003	16,043	230	63,3	6,3
10			4,264	3,991	16,009	250	66,3	6,6
11			4,419	4,012	16,007	280	70,9	7,1
12			4,222	4,012	16,014	350	92,7	9,3
13			4,424	4,010	16,021	340	86,0	8,6
14			4,257	3,999	16,001	230	60,8	6,1
15			4,342	4,003	16,228	350	90,5	9,1

Tabela V.2 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CIII-40-RS.

<b>Data da Moldagem</b>	25/07/2016	<b>Idade</b>	67	dias
<b>Data do Ensaio</b>	30/09/2016			
<b>Composição da argamassa</b>	1:3:0,52			
<b>Vão Livre</b>	12	cm		

Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas (cm)			Carga à Flexão (kgf)	Módulo de Ruptura	
			Base	Altura	Comprimento		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
16	CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,510	4,021	16,025	310	76,5	7,7
17			4,391	4,007	16,106	300	76,6	7,7
18			4,248	4,011	16,082	290	76,4	7,6
19			4,384	4,008	16,047	260	66,5	6,6
20			4,415	4,014	16,027	340	86,0	8,6
21			4,389	4,005	16,026	330	84,4	8,4
22			4,456	4,009	16,036	280	70,4	7,0
23			4,442	4,005	16,031	280	70,7	7,1
24		H <sub>2</sub> O	4,353	4,006	16,001	200	51,5	5,2
25			4,463	4,024	16,011	200	49,8	5,0
26			4,411	4,000	16,055	220	56,1	5,6
27			4,437	4,002	16,030	360	91,2	9,1
28			4,563	4,000	16,016	250	61,6	6,2
29			4,321	4,018	16,067	170	43,9	4,4
30			4,521	4,030	15,991	250	61,3	6,1

Tabela V.3 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CPV-ARI-RS.

<b>Data da Moldagem</b>	25/07/2016	<b>Idade</b>	67	dias
<b>Data do Ensaio</b>	30/09/2016			
<b>Composição da argamassa</b>	1:3:0,52			
<b>Vão Livre</b>	12	cm		

Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas (cm)			Carga à Flexão (kgf)	Módulo de Ruptura	
			Base	Altura	Comprimento		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
31	CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,319	4,019	16,098	350	90,3	9,0
32			4,227	4,012	16,081	380	100,5	10,1
33			4,233	4,004	16,017	430	114,1	11,4
34			4,226	4,020	16,036	410	108,1	10,8
35			4,278	4,006	15,997	400	104,9	10,5
36			4,259	4,008	16,006	370	97,3	9,7
37			4,244	4,013	16,026	400	105,3	10,5
38			4,251	4,010	16,017	410	108,0	10,8
39		H <sub>2</sub> O	4,273	4,017	16,013	230	60,0	6,0
40			4,169	4,004	15,989	250	67,3	6,7
41			4,078	4,005	15,989	260	71,5	7,2
42			4,187	3,991	16,042	270	72,9	7,3
43			4,348	4,011	16,067	350	90,1	9,0
44			4,306	4,011	16,035	250	65,0	6,5
45			4,321	4,006	16,026	250	64,9	6,5

Tabela V.4 Ensaio à flexão em corpos de prova prismáticos de argamassa para CPIV-32-RS.

<b>Data da Moldagem</b>	09/08/2016	<b>Idade</b>	52	dias
<b>Data do Ensaio</b>	30/09/2016			
<b>Composição da argamassa</b>	1:3:0,52			
<b>Vão Livre</b>	12	cm		

Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas (cm)			Carga à Flexão (kgf)	Módulo de Ruptura	
			Base	Altura	Comprimento		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
46	CPIV-32-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,123	4,018	16,052	190	51,4	5,1
47			4,071	4,014	16,067	360	98,8	9,9
48			3,971	4,012	16,076	160	45,1	4,5
49			4,079	4,002	16,026	170	46,8	4,7
50			4,147	3,996	16,010	320	87,0	8,7
51			4,017	4,082	16,012	130	35,0	3,5
52			4,008	3,988	16,054	240	67,8	6,8
53			4,092	4,000	15,961	260	71,5	7,1
54		H <sub>2</sub> O	4,025	4,003	16,041	100	27,9	2,8
55			4,022	4,004	16,083	200	55,8	5,6
56			4,015	3,978	16,048	210	59,5	5,9
57			4,012	4,009	16,011	160	44,7	4,5
58			3,999	3,957	15,999	100	28,7	2,9
59			4,029	4,001	16,030	180	50,2	5,0
60	4,063		4,008	16,073	200	55,2	5,5	

Tabela V.5 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CPII-E-32 R.

Data da Moldagem		11/07/2016	Idade		84 dias			
Data do Ensaio		03/10/2016	OBS.: Aresta a --> Face do prisma metálico					
Composição da argamassa		1:3:0,52	Aresta b --> Face irregular do CP.					
Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas			Carga à Compressão (kgf)	Resistência à Compressão	
			Aresta a (cm)	Aresta b (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
1.1	CPII-E-32 R	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,031	16,277	5520	339,1	33,9
1.2			4,038	4,021	16,237	5500	338,7	33,9
2.1			4,038	4,022	16,241	5080	312,8	31,3
2.2			4,038	4,022	16,241	4980	306,6	30,7
3.1			4,038	4,031	16,277	4900	301,0	30,1
3.2			4,038	4,027	16,261	5100	313,6	31,4
4.1			4,038	4,023	16,245	4620	284,4	28,4
4.2			4,038	4,032	16,281	4880	299,7	30,0
5.1			4,038	4,007	16,180	5600	346,1	34,6
5.2			4,038	4,014	16,209	5200	320,8	32,1
6.1			4,038	4,028	16,265	5040	309,9	31,0
6.2			4,038	4,015	16,213	5000	308,4	30,8
7.1			4,038	4,030	16,273	4400	270,4	27,0
7.2			4,038	4,026	16,257	4200	258,4	25,8
8.1			4,038	4,012	16,200	4140	255,5	25,6
8.2			4,038	4,037	16,301	4620	283,4	28,3
9.1			4,038	4,000	16,152	4740	293,5	29,3
9.2			4,038	4,003	16,164	5100	315,5	31,6
10.1		4,038	3,992	16,120	5620	348,6	34,9	
10.2		4,038	3,998	16,144	5560	344,4	34,4	
11.1		4,038	4,009	16,188	5620	347,2	34,7	
11.2		4,038	4,019	16,229	5360	330,3	33,0	
12.1		4,038	4,011	16,196	5240	323,5	32,4	
12.2		4,038	4,013	16,204	5120	316,0	31,6	
13.1		4,038	4,016	16,217	5060	312,0	31,2	
13.2		4,038	4,010	16,192	5220	322,4	32,2	
14.1		4,038	4,003	16,164	5580	345,2	34,5	
14.2		4,038	4,013	16,204	5340	329,5	33,0	
15.1		4,038	4,001	16,156	5320	329,3	32,9	
15.2		4,038	3,998	16,144	6060	375,4	37,5	
		H <sub>2</sub> O						

Tabela V.6 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CIII-40-RS.

Data da Moldagem		25/07/2016	Idade		70 dias			
Data do Ensaio		03/10/2016	OBS.: Aresta a --> Face do prisma metálico					
Composição da argamassa		1:3:0,52	Aresta b --> Face irregular do CP.					
Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas			Carga à Compressão (kgf)	Resistência à Compressão	
			Aresta a (cm)	Aresta b (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
16.1	CIII-40-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,018	16,225	6560	404,3	40,4
16.2			4,038	4,017	16,221	6940	427,8	42,8
17.1			4,038	4,003	16,164	6020	372,4	37,2
17.2			4,038	4,008	16,184	6580	406,6	40,7
18.1			4,038	4,012	16,200	6860	423,4	42,3
18.2			4,038	4,018	16,225	7000	431,4	43,1
19.1			4,038	4,014	16,209	6940	428,2	42,8
19.2			4,038	4,011	16,196	6860	423,6	42,4
20.1			4,038	4,016	16,217	7160	441,5	44,2
20.2			4,038	4,020	16,233	6600	406,6	40,7
21.1			4,038	4,013	16,204	7380	455,4	45,5
21.2			4,038	4,009	16,188	7560	467,0	46,7
22.1			4,038	4,006	16,176	6180	382,0	38,2
22.2			4,038	4,011	16,196	6400	395,1	39,5
23.1			4,038	4,002	16,160	6420	397,3	39,7
23.2		4,038	4,008	16,184	6280	388,0	38,8	
24.1		H <sub>2</sub> O	4,038	4,014	16,209	5620	346,7	34,7
24.2			4,038	4,010	16,192	6140	379,2	37,9
25.1			4,038	4,012	16,200	6240	385,2	38,5
25.2			4,038	4,013	16,204	6180	381,4	38,1
26.1			4,038	4,007	16,180	5080	314,0	31,4
26.2			4,038	4,002	16,160	5460	337,9	33,8
27.1			4,038	4,017	16,221	6500	400,7	40,1
27.2			4,038	4,008	16,184	5780	357,1	35,7
28.1			4,038	4,008	16,184	5700	352,2	35,2
28.2			4,038	4,003	16,164	5840	361,3	36,1
29.1			4,038	4,019	16,229	5740	353,7	35,4
29.2			4,038	4,109	16,592	6420	386,9	38,7
30.1			4,038	4,031	16,277	6020	369,8	37,0
30.2			4,038	4,041	16,318	6000	367,7	36,8

Tabela V.7 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CPV-ARI-RS.

Data da Moldagem		25/07/2016	Idade		70 dias				
Data do Ensaio		03/10/2016	OBS.: Aresta a --> Face do prisma metálico						
Composição da argamassa		1:3:0,52	Aresta b --> Face irregular do CP.						
Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas			Carga à Compressão (kgf)	Resistência à Compressão		
			Aresta a (cm)	Aresta b (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa	
31.1	CPV-ARI-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,014	16,209	8680	535,5	53,6	
31.2			4,038	4,017	16,221	7240	446,3	44,6	
32.1			4,038	4,012	16,200	8140	502,5	50,2	
32.2			4,038	4,018	16,225	7460	459,8	46,0	
33.1			4,038	4,003	16,164	7860	486,3	48,6	
33.2			4,038	4,010	16,192	7060	436,0	43,6	
34.1			4,038	4,030	16,273	7490	460,3	46,0	
34.2			4,038	4,018	16,225	7420	457,3	45,7	
35.1			4,038	4,010	16,192	8180	505,2	50,5	
35.2			4,038	4,022	16,241	8300	511,1	51,1	
36.1			4,038	4,003	16,164	7380	456,6	45,7	
36.2			4,038	4,006	16,176	8080	499,5	49,9	
37.1			4,038	4,007	16,180	7700	475,9	47,6	
37.2			4,038	4,008	16,184	7760	479,5	47,9	
38.1			4,038	4,009	16,188	7560	467,0	46,7	
38.2			4,038	4,013	16,204	7480	461,6	46,2	
39.1			H <sub>2</sub> O	4,038	4,006	16,176	7860	485,9	48,6
39.2				4,038	4,010	16,192	8300	512,6	51,3
40.1		4,038		4,008	16,184	8280	511,6	51,2	
40.2		4,038		4,002	16,160	8380	518,6	51,9	
41.1		4,038		4,002	16,160	7960	492,6	49,3	
41.2		4,038		4,014	16,209	8360	515,8	51,6	
42.1		4,038		3,999	16,148	8420	521,4	52,1	
42.2		4,038		3,998	16,144	8460	524,0	52,4	
43.1		4,038		4,019	16,229	7700	474,5	47,4	
43.2		4,038		4,016	16,217	7540	465,0	46,5	
44.1		4,038		4,006	16,176	8120	502,0	50,2	
44.2		4,038		4,010	16,192	7780	480,5	48,0	
45.1		4,038		4,003	16,164	7580	468,9	46,9	
45.2		4,038		4,010	16,192	7640	471,8	47,2	

Tabela V.8 Ensaio à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa após ruptura à flexão para CPIV-32-RS.

Data da Moldagem		09/08/2016		Idade		55 dias			
Data do Ensaio		03/10/2016		OBS.: Aresta a --> Face do prisma metálico					
Composição da argamassa		1:3:0,52		Aresta b --> Face irregular do CP.					
Nº do CP	Cimento Portland	Tipo de Cura	Medidas			Carga à Compressão (kgf)	Resistência à Compressão		
			Aresta a (cm)	Aresta b (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		kgf/cm <sup>2</sup>	MPa	
46.1	CPIV-32-RS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,038	4,016	16,217	3160	194,9	19,5	
46.2			4,038	4,022	16,241	3100	190,9	19,1	
47.1			4,038	4,017	16,221	2780	171,4	17,1	
47.2			4,038	4,011	16,196	2700	166,7	16,7	
48.1			4,038	4,023	16,245	2500	153,9	15,4	
48.2			4,038	4,015	16,213	2780	171,5	17,1	
49.1			4,038	4,003	16,164	2740	169,5	17,0	
49.2			4,038	4,006	16,176	2600	160,7	16,1	
50.1			4,038	3,997	16,140	3020	187,1	18,7	
50.2			4,038	3,996	16,136	3400	210,7	21,1	
51.1			4,038	4,088	16,507	2280	138,1	13,8	
51.2			4,038	4,053	16,366	2500	152,8	15,3	
52.1			4,038	3,985	16,091	2780	172,8	17,3	
52.2			4,038	4,029	16,269	2600	159,8	16,0	
53.1			4,038	4,005	16,172	3240	200,3	20,0	
53.2			4,038	4,006	16,176	3060	189,2	18,9	
54.1			H <sub>2</sub> O	4,038	4,011	16,196	2880	177,8	17,8
54.2				4,038	4,004	16,168	3280	202,9	20,3
55.1		4,038		4,064	16,410	2800	170,6	17,1	
55.2		4,038		3,980	16,071	2820	175,5	17,5	
56.1		4,038		3,989	16,108	2780	172,6	17,3	
56.2		4,038		3,953	15,962	2980	186,7	18,7	
57.1		4,038		4,000	16,152	2540	157,3	15,7	
57.2		4,038		4,011	16,196	2700	166,7	16,7	
58.1		4,038		4,008	16,184	2780	171,8	17,2	
58.2		4,038		3,971	16,035	3000	187,1	18,7	
59.1		4,038		4,005	16,172	2060	127,4	12,7	
59.2		4,038		4,005	16,172	2380	147,2	14,7	
60.1		4,038		4,005	16,172	2380	147,2	14,7	
60.2		4,038		4,015	16,213	3420	210,9	21,1	





## **Anexo VI RESULTADO DAS ANÁLISES NO DRX – SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

Neste Anexo VI serão apresentados os espectros e as tabelas dos resultados obtidos das análises do DRX da segunda campanha experimental.

Nas tabelas que se seguem são apresentados os valores dos picos dos elementos encontrados nas amostras. Em amarelo são os picos da etringita, em vermelho os picos da gipsita.

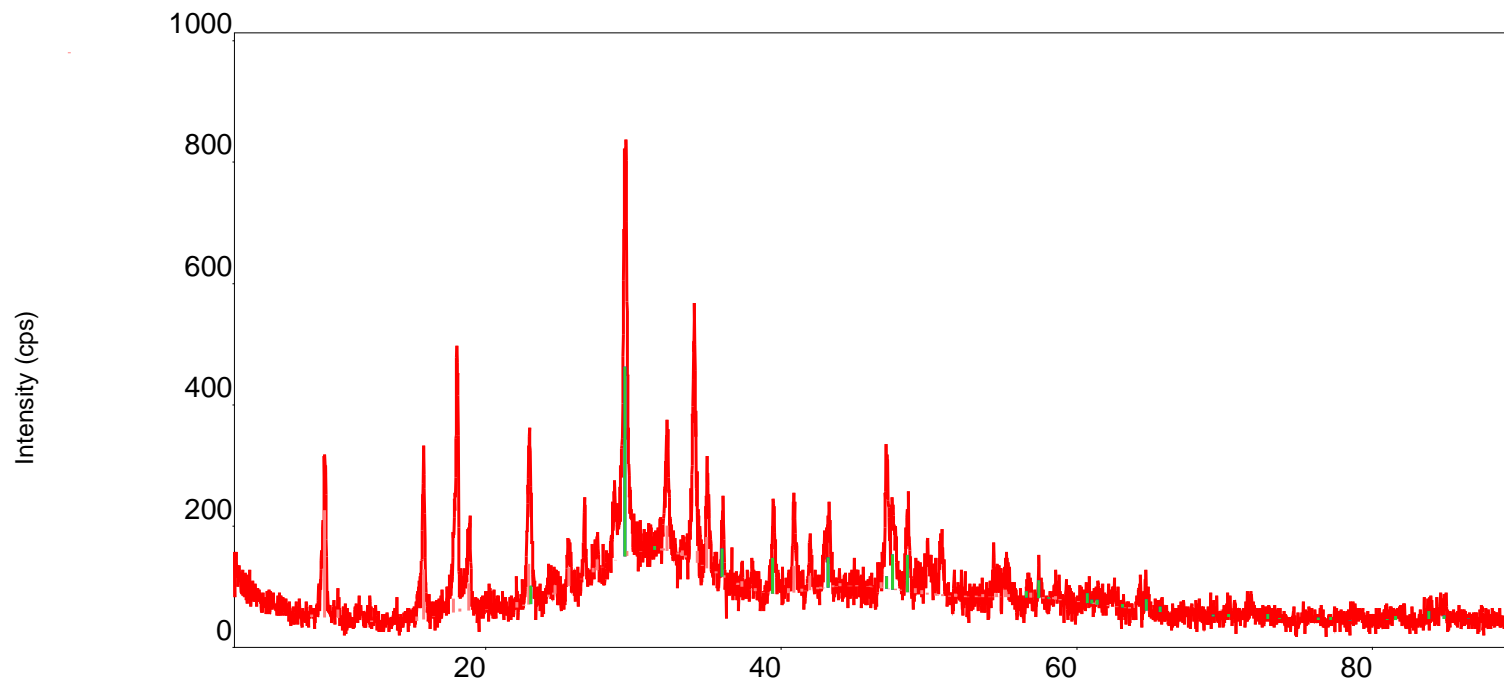


Figura VI.1 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPII-E-32 R, curados em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%.

Tabela VI.1 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CII-E-32 R, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.152(4)	9.655(5)	164(20)	0.254(15)	53(2)	3.0(9)	327(19)
2	15.805(19)	5.603(7)	184(21)	0.17(2)	49(2)	1.2(7)	479(58)
3	18.073(9)	4.904(2)	321(28)	0.151(13)	83(3)	1.4(4)	556(47)
4	18.91(3)	4.688(7)	86(15)	0.26(4)	37(3)	2.1(11)	327(57)
5	22.933(19)	3.875(3)	177(21)	0.295(15)	61(3)	0.8(2)	287(15)
6	25.63(8)	3.473(10)	46(11)	0.22(6)	11(3)	1.2(16)	385(104)
7	29.45(2)	3.031(2)	497(35)	0.25(2)	199(5)	1.3(6)	343(28)
8	32.259(19)	2.7727(16)	115(17)	0.28(3)	42(3)	1.0(3)	303(31)
9	34.141(9)	2.6240(7)	283(27)	0.207(13)	77(4)	3.5(6)	420(27)
10	34.95(4)	2.565(3)	104(16)	0.21(3)	24(3)	0.4(3)	407(59)
11	35.976(8)	2.4943(5)	96(15)	0.11(3)	12(2)	0.21(19)	797(186)
12	39.51(3)	2.2790(17)	95(15)	0.22(4)	25(3)	3(3)	405(70)
13	40.84(3)	2.2079(17)	119(17)	0.16(5)	31(3)	0.6(6)	538(168)
14	43.22(6)	2.092(3)	71(13)	0.39(5)	31(4)	2.5(19)	228(28)
15	47.13(4)	1.9267(15)	138(19)	0.30(3)	45(4)	1.1(5)	299(31)
16	47.462(15)	1.9140(6)	96(16)	0.30(3)	30(3)	0.20(14)	306(34)
17	48.50(4)	1.8753(14)	91(15)	0.21(3)	20.7(19)	0.7(5)	428(66)
18	50.81(4)	1.7955(13)	30(9)	1.31(16)	42(5)	5(3)	70(8)

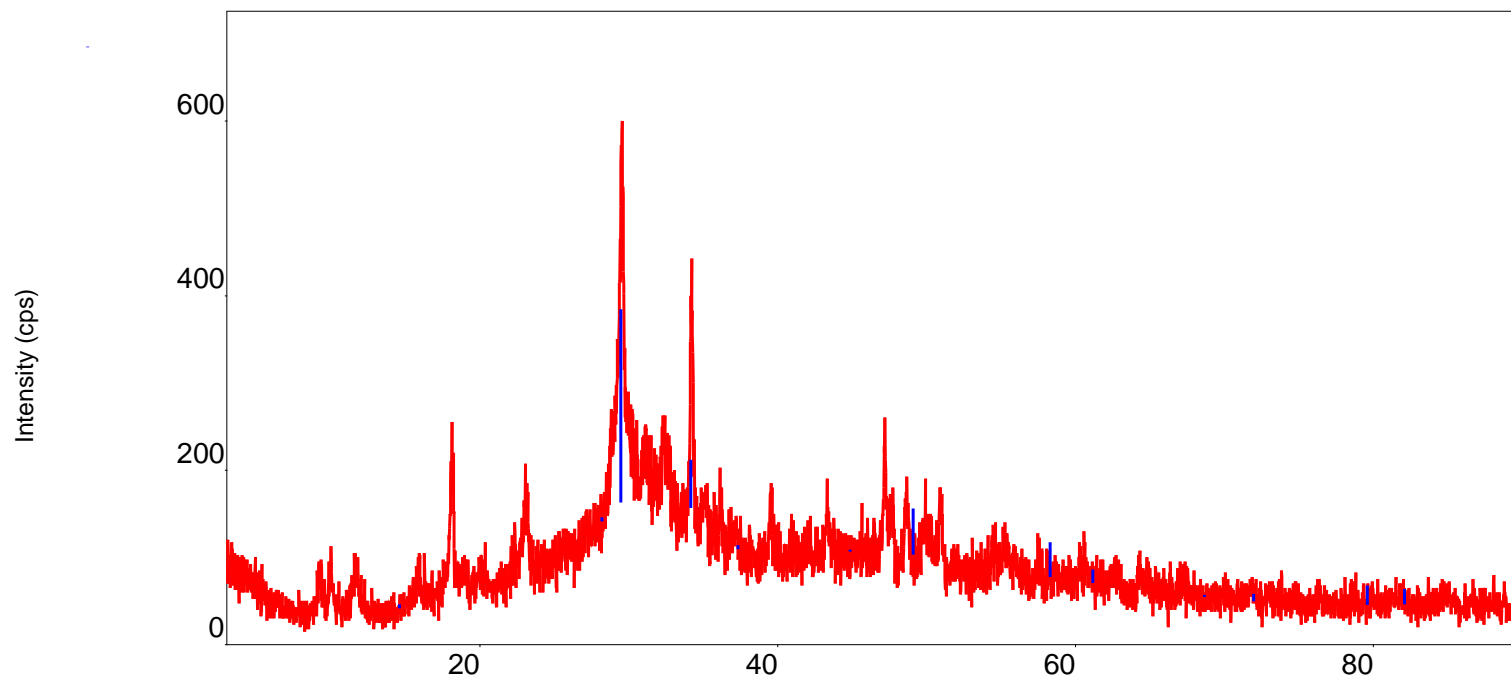


Figura VI.2 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

Tabela VI.2 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CIII-40-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	10.04(4)	8.80(3)	22(7)	0.46(14)	19(3)	3(3)	180(56)
2	11.60(7)	7.63(5)	30(9)	0.49(7)	18(2)	0.5(4)	169(25)
3	18.192(8)	4.873(2)	99(16)	0.28(2)	31(3)	5(4)	304(24)
4	23.04(3)	3.857(5)	62(12)	0.37(5)	38(3)	0.7(2)	228(31)
5	29.49(2)	3.027(2)	259(25)	0.37(4)	187(6)	0.9(3)	234(26)
6	34.18(2)	2.6211(18)	194(22)	0.168(17)	35(3)	0.8(4)	518(54)
7	47.17(6)	1.925(2)	74(14)	0.25(10)	31(4)	0.9(9)	359(140)
8	48.9936	1.8577	79.5216	0.366831	46.4827	0.888152	248.559
9	51.1178	1.78538	68.1005	0.366831	40.1577	0.888152	250.72
10	54.6274	1.67868	43.2235	0.366831	25.8634	0.888152	254.568
11	55.4586	1.65547	47.5663	0.366831	28.561	0.888152	255.531

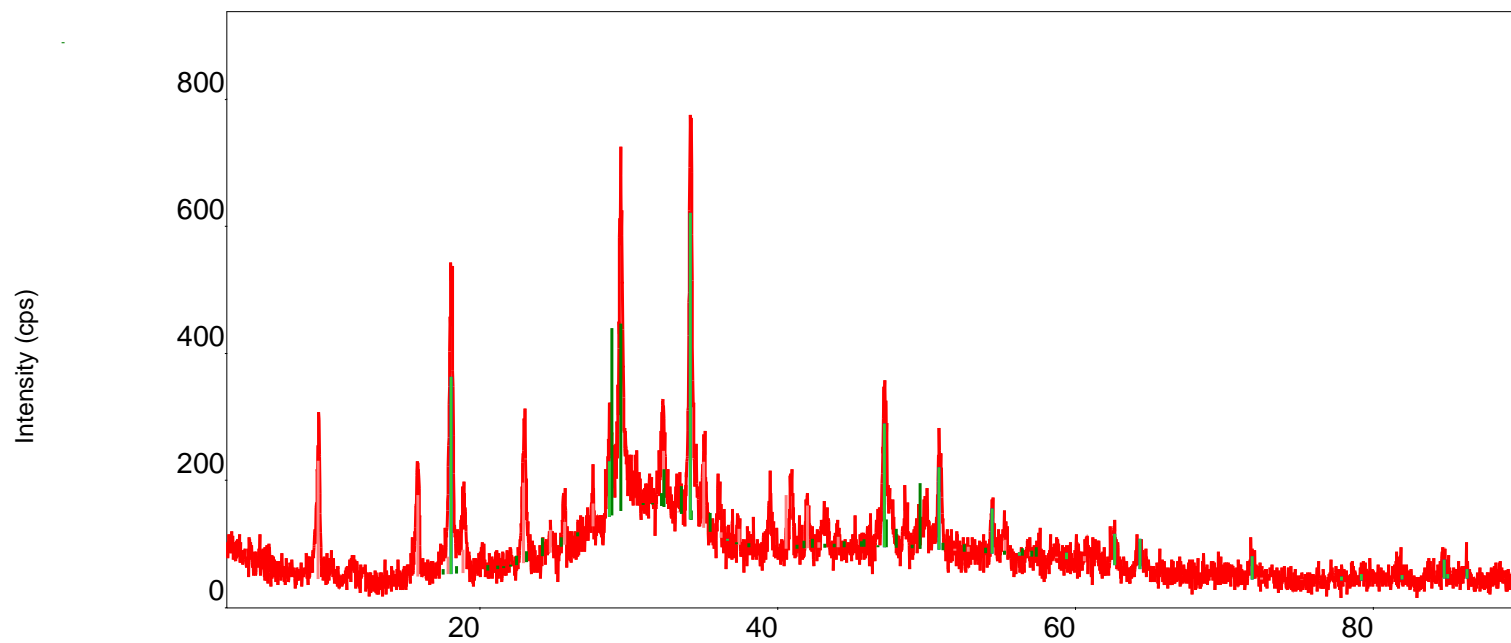


Figura VI.3 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

Tabela VI.3 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPV-ARI-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.199(10)	9.606(10)	152(20)	0.244(17)	54(2)	2.7(6)	341(24)
2	15.884(6)	5.575(2)	108(16)	0.277(18)	33(2)	4(3)	303(19)
3	18.104(11)	4.896(3)	347(29)	0.252(10)	115(3)	2.1(4)	333(13)
4	18.99(2)	4.669(6)	67(13)	0.40(4)	36(3)	4.4(16)	208(21)
5	22.99(2)	3.865(3)	148(19)	0.275(17)	48(3)	1.4(4)	308(19)
6	25.60(6)	3.477(8)	56(12)	0.16(5)	10(3)	0.6(9)	521(147)
7	28.69(4)	3.109(5)	82(14)	0.53(10)	67(12)	0.34(16)	163(29)
8	29.46(2)	3.030(2)	333(29)	0.25(3)	111(11)	1.3(5)	346(36)
9	32.28(3)	2.771(2)	113(17)	0.22(4)	38(3)	1.1(6)	399(82)
10	34.125(18)	2.6252(13)	497(35)	0.189(17)	140(4)	1.0(4)	460(43)
11	35.02(2)	2.5599(15)	107(16)	0.16(3)	23(3)	0.40(19)	554(107)
12	42.1(2)	2.147(11)	12(6)	2.3(4)	36(9)	4(3)	39(7)
13	47.15(2)	1.9261(9)	180(21)	0.25(4)	75(4)	0.9(5)	357(63)
14	50.03(3)	1.8216(9)	48(11)	0.33(9)	28(4)	4(6)	278(73)
15	50.829(18)	1.7948(6)	127(18)	0.20(2)	35(3)	0.57(17)	454(53)



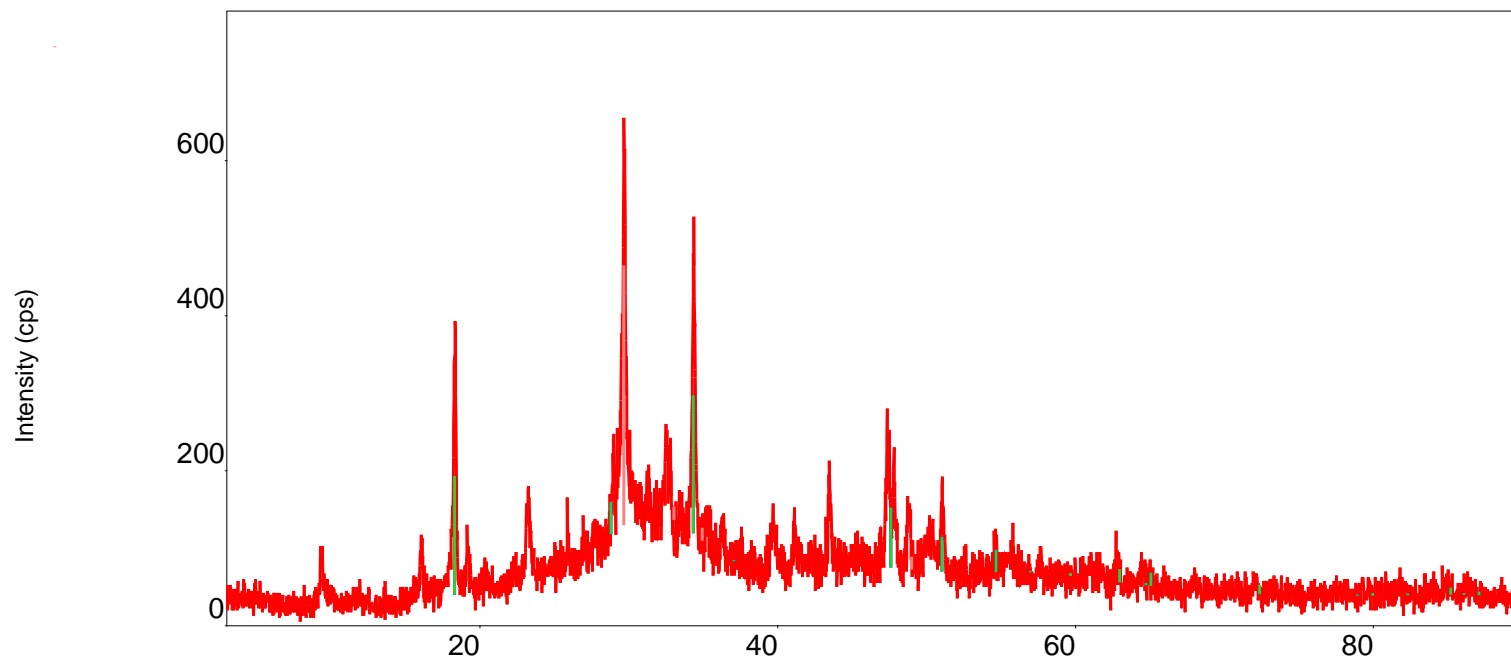


Figura VI.4 Espectro dos CP's de argamassa moldados com CPIV-32-RS, curados em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5%.

Tabela VI.4 Resultados dos picos obtidos para os CP's de pasta de cimento moldados com CPIV-32-RS, curados em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 5%.

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Asym. factor	Size(ang.)
1	9.36(4)	9.44(4)	37(10)	0.33(5)	21(2)	0.7(3)	256(41)
2	16.06(3)	5.514(11)	53(11)	0.18(4)	16.5(17)	1.3(7)	456(98)
3	18.348(5)	4.8313(14)	251(25)	0.162(15)	67.4(18)	3.8(9)	519(48)
4	19.11(3)	4.639(7)	36(9)	0.23(4)	10.2(19)	0.29(16)	372(69)
5	23.17(4)	3.835(6)	68(13)	0.32(3)	27(2)	0.4(3)	263(26)
6	29.677(14)	3.0078(13)	337(29)	0.23(3)	141(5)	1.3(4)	373(50)
7	32.57(2)	2.7469(17)	54(12)	0.37(6)	21(4)	1.3(10)	234(36)
8	34.37(2)	2.6068(18)	242(25)	0.220(19)	60(4)	2.1(10)	394(33)
9	43.468(17)	2.0802(8)	115(17)	0.111(18)	14(2)	1.5(10)	801(126)
10	47.35(4)	1.9182(14)	114(17)	0.29(6)	56(4)	0.8(4)	307(60)
11	48.77(3)	1.8658(12)	72(13)	0.12(4)	11(2)	1.3(16)	730(206)
12	51.10(2)	1.7860(8)	42(10)	0.50(14)	41(5)	5(6)	183(52)