

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Sérgio Hémerson de Moraes Mittri

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS
TRATADO TERMICAMENTE EM RELAÇÃO AOS
ASPECTOS MECÂNICOS E DE DURABILIDADE**

Vitória
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Sérgio Hémerson de Moraes Mittri

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS
TRATADO TERMICAMENTE EM RELAÇÃO AOS
ASPECTOS MECÂNICOS E DE DURABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Vitória
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M685c Mittri, Sérgio Hémerson de Moraes, 1990-
Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade / Sérgio Hémerson de Moraes Mittri. – 2016.
168 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais – Resíduos industriais. 2. Pozolanas. 3. Cloretos. 4. Durabilidade (Engenharia). 5. Resistência de materiais. 6. Concreto – Tratamento térmico. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

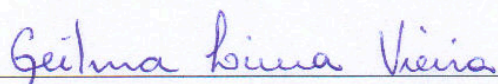
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE EM RELAÇÃO AOS ASPECTOS MECÂNICOS E DE DURABILIDADE

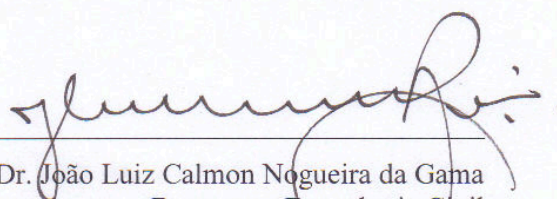
Sérgio Hémerson de Moraes Mittri

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

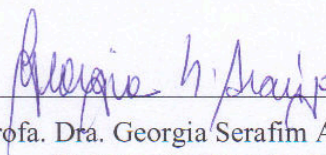
Aprovada no dia **31 de agosto de 2016** por:



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo
Doutora em Engenharia Civil
Membro Externo - IFES

Vitória – ES, agosto de 2016

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha orientadora Geilma Lima Vieira por estar presente durante toda a pesquisa, ajudando na tomada das decisões e principalmente por sempre estimular e incentivar a realização dos ensaios tão importantes para o presente estudo.

A pós-doutoranda Cláudia Teles também me ajudou muito na compra dos materiais para realização dos ensaios e também nas correções preliminares do presente trabalho.

Um dos pontos mais importantes para o desenvolvimento de um trabalho é o nosso estado de espírito. Por isso, gostaria de agradecer aos amigos Maxwell, Clarisse, Janaina e Thaís por estarem presentes no meu dia-a-dia no LEMAC, sempre com bom humor e dispostos a conversar e ajudar sempre que requisitados.

Gostaria de agradecer em especial ao amigo Maxwell por ajudar na maioria dos ensaios, e agradecer também ao amigo Guilherme Guignone que também ajudou muito na realização dos ensaios, sempre disposto a emprestar alguns materiais (fonte de 60V, verniz poliuretânico,...) e também a discutir sobre a realização da maioria dos ensaios.

Não seria possível o desenvolvimento desse trabalho (principalmente em relação à confecção dos concretos) sem o auxílio dos técnicos do LEMAC, Loreato, Márcio e Henrique.

Gostaria de agradecer à empresa Concrevit pela doação da areia e a empresa Lafarge/Holcim pela doação do cimento. Em especial, gostaria de agradecer ao técnico Raimundo da Lafarge/Holcim pela disposição em realizar o ensaio de finura Blaine. Gostaria de agradecer também aos técnicos do laboratório de materiais cerâmicos do IFES - Campus Vitória que realizaram o ensaio de granulometria a laser no RBROTT.

Agradeço também à minha mãe Lenira e minha irmã Ana Caroline pela motivação e pelo apoio financeiro em todo esse trajeto. Agradeço também a minha namorada Raiane pelo apoio e motivação durante essa trajetória.

Não seria possível o desenvolvimento desse projeto sem o amparo financeiro fornecido pela CAPES. Então, gostaria de deixar também meus agradecimentos a essa fundação.

Agradeço a Deus por mais essa conquista.

RESUMO

MITTRI, Sérgio Hémerson de Moraes. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE EM RELAÇÃO AOS ASPECTOS MECÂNICOS E DE DURABILIDADE. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

O Brasil é um grande produtor de rochas ornamentais, tendo como principal estado produtor o Espírito Santo. No processo de beneficiamento das rochas cerca de 30% do volume total do bloco se transforma em resíduo. Muitos trabalhos já utilizaram esse resíduo em matrizes cimentícias, aplicando-o como um material capaz de preencher parcialmente os poros da matriz cimentícia (efeito fíler). Porém, esses estudos vêm sendo desenvolvidos há duas décadas e até o presente momento a indústria da construção civil não absorveu o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), que continua a ser um passivo ambiental. Visando melhorar as propriedades desse material, o presente estudo tratou-o termicamente a 1200°C. O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) foi submetido a diversos ensaios de caracterização, dentre eles foram realizados ensaios para determinação da atividade pozolânica segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015). Foram confeccionados concretos com 0%, 5% e 10% de adição do RBROTT com o objetivo de avaliar a influência dessa adição sobre a resistência mecânica dos concretos e também avaliar a durabilidade dos mesmos, tendo como foco a penetração de íons cloreto.

Em relação à atividade pozolânica, os resultados mostraram que o RBROTT atendeu a todos os critérios exigidos por norma, sendo considerado um material pozolânico. Além disso, os concretos produzidos com adição do RBROTT apresentaram aumento significativo na resistência à compressão. Quanto à penetração dos íons cloreto, os concretos com adição mostraram maior resistência ao ingresso desses íons quando comparados aos concretos referência.

Palavras-chave: Resíduos de rochas ornamentais, resistência mecânica, durabilidade, penetração de cloretos, pozolanicidade.

ABSTRACT

MITTRI, Sérgio Hémerson de Moraes. CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE CONCRETE BEHAVIOR PRODUCED WITH ORNAMENTAL STONE WASTE AFTER THERMAL TREATMENT IN RELATION TO THE MECHANICS AND DURABILITY ASPECTS. 2016. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2016.

Brazil is a significant producer of ornamental stones, having Espírito Santo as the main producing state. In the stone beneficiation process about 30% of the total volume of the block becomes waste. Many studies have used this waste in cementitious matrices, using it as a material capable of partially fill the pores of the cement matrix (filler effect). However, these studies have been conducted for two decades and until now the construction industry did not absorb the ornamental stone waste, which remains an environmental liability. To improve the properties of this material, this study treated it thermally at 1200°C. The ornamental stone waste after thermal treatment (OSWTT) was subjected to various characterization tests, including tests to determine the pozzolanic activity according to NBR 12653 (ABNT, 2015). Concrete were made with 0%, 5% and 10% addition of OSWTT with the objective of evaluating the influence of this addition on the mechanical strength of concrete and also to evaluate the durability of them, with a focus on penetration of chloride ions.

In relation to the pozzolanicity, the results showed that the OSWTT met all the criteria required by the standard, then it is considered a pozzolanic material. Furthermore, the concretes produced with the addition of OSWTT showed a significant increase in compressive strength. Concerning the penetration of chloride ions, the concrete with OSWTT addition showed greater resistance when compared to the reference concrete.

Keywords: Ornamental stone waste, mechanical strength, durability, chloride penetration, pozzolanicity.

Lista de Figuras

Figura 1: Resíduo gerado na extração das rochas.....	20
Figura 2: Detalhe das lâminas de corte – tear tradicional	22
Figura 3: Tanque de bombeamento	23
Figura 4: Tear com fios diamantados	23
Figura 5: Processo de descarte do RBRO. (a) Canaleta. (b) Poço de bombeamento. (c) Poço final de coleta	24
Figura 6: Principais adições minerais utilizadas em concretos	27
Figura 7: Resistência à compressão dos corpos de prova da argamassa referência e da argamassa com diferentes teores de substituição.....	30
Figura 8: Corpos de provas da argamassa referência (A) e argamassa contendo adição de RBRO tratado a 900°C (B)	32
Figura 9: Resistência à compressão da argamassa referência (A) e da argamassa contendo adição de RBRO tratado a 900°C (B)	32
Figura 10: Difratoograma de raios X do LBRO D sem tratamento térmico.....	34
Figura 11: Difratoograma de raios X do LBRO D após tratamento térmico a 1200°C.....	34
Figura 12: Mecanismo de corrosão na armadura do concreto	37
Figura 13: Tipos de corrosão	37
Figura 14: Equipamento para ensaio de migração de cloretos.....	42
Figura 15: Concentração de cloretos versus tempo.....	43
Figura 16: Determinação do intervalo não estacionário.....	45
Figura 17: Aparato para ensaio de migração de cloretos	46
Figura 18: Programa Experimental.....	50
Figura 19: Distribuição granulométrica do agregado miúdo	54
Figura 20: Distribuição granulométrica do agregado graúdo	55
Figura 21 – Cimentos utilizados na pesquisa (a) determinação do IAP (b) confecção dos concretos	56
Figura 22: Processo de secagem do RBRO	57
Figura 23: Forno tipo mufla	59
Figura 24: Resído tratado termicamente em recipiente cerâmico, (a) início e (b) final	59
Figura 25: Recipiente contendo o resíduo (a) antes do tratamento térmico (b) depois do tratamento	60
Figura 26: Recipiente de gesso com o resíduo (a) antes do tratamento térmico (b) depois do tratamento.....	61
Figura 27: Resíduo após o tratamento térmico.....	61
Figura 28: Processo de moagem (a) moinho de argolas (b) RBROTT após a moagem ..	62
Figura 29: Caracterização do RBROTT	62
Figura 30: Aparelho para ensaio de granulometria a laser	63
Figura 31: Ensaio de massa específica do RBROTT.....	64
Figura 32: Ensaio finura (a) Peneira #200. (b) Peneira #325.....	65

Figura 33: Equipamento utilizado para determinação da finura pelo método de Blaine	65
Figura 34: Ensaio de pozolanicidade pelo método de Luxán	66
Figura 35: Ensaio de índice de consistência	68
Figura 36: Corpos de prova para determinação do IAP-CAL	68
Figura 37: Corpos de prova de argamassa para avaliação do IAP	70
Figura 38: Diagrama de dosagem obtido a partir do método IPT/USP	71
Figura 39: Corpo-de-prova em ensaio de resistência à compressão axial	73
Figura 40: Corpos de prova para ensaio de migração de cloretos – UNE	73
Figura 41: Teste de estanqueidade	74
Figura 42: Ensaio em andamento – UNE 83987-14	75
Figura 43: Diagrama do ensaio de migração segundo a UNE 83987-14	76
Figura 44: Procedimento para leitura da tensão	76
Figura 45: Corrosão anodo e catodo	77
Figura 46: Corpo de prova após aspersão de nitrato de prata	78
Figura 47: Cloreto de sódio e Hidróxido de sódio utilizados no ensaio segundo a ASTM C1202-12	78
Figura 48: Corpos de prova com as laterais seladas	79
Figura 49: Corpos de prova em processo de saturação	80
Figura 50: Ensaio de penetração de cloretos segundo a ASTM C1202-12	80
Figura 51: Diagrama do circuito utilizado no ensaio de migração segundo a ASTM 1202-12	81
Figura 52: Corpos de prova impermeabilizados	82
Figura 53: Corpos de prova imersos em solução salina	82
Figura 54: Ilustração da medição de profundidade de penetração de cloretos	83
Figura 55: Distribuição granulométrica do RBROTT	86
Figura 56: Porcentagem retida acumulada	87
Figura 57: Resultado do ensaio de atividade pozolânica pelo método de Luxán	88
Figura 58: Resultado da Resistência à compressão axial média para determinação do IAP-CAL	90
Figura 59: Atividade pozolânica com cal para diferentes adições minerais	91
Figura 60: Resultado da Resistência à compressão axial média para determinação do IAP-Cimento	92
Figura 61: Influência do percentual de adição sobre a consistência do concreto	93
Figura 62: Resistência à compressão axial dos concretos aos 28, 56 e 91 dias	96
Figura 63: Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência do concreto	98
Figura 64: Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão do concreto	99
Figura 65: Efeito interação da relação a/c e idade sobre a resistência à compressão do concreto	100
Figura 66: Efeito isolado do teor de adição sobre a resistência mecânica do concreto	100
Figura 67: Efeito isolado do teor de adição e relação a/c sobre a resistência mecânica do concreto	101

Figura 68: Efeito da idade e porcentagem de adição sobre a resistência à compressão do concreto.....	102
Figura 69: Efeito da interação entre idade, relação a/c e percentual de adição sobre a resistência do concreto	103
Figura 70: Carga passante nas idades de 28 e 91 dias	105
Figura 71: Efeito isolado da idade sobre a carga total passante.....	107
Figura 72: Efeito isolado do percentual de adição sobre a carga total passante	108
Figura 73: Efeito da interação entre idade e teor de adição sobre a carga total passante	109
Figura 74: Efeito conjunto do teor de adição e relação a/c sobre a carga total passante	110
Figura 75: Evolução da concentração de cloretos com o tempo	111
Figura 76: Gráficos utilizados para obtenção dos coeficientes de difusão.	112
Figura 77: Coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário	113
Figura 78: Efeito isolado da relação a/c sobre o coeficiente de difusão (Dns)	115
Figura 79: Efeito isolado do percentual de adição sobre o coeficiente de difusão (Dns)	116
Figura 80: Efeito isolado da relação a/c sobre o coeficiente de difusão (Ds)	117
Figura 81: Efeito isolado do teor de adição sobre o coeficiente de difusão (Ds).....	118
Figura 82: Efeito conjunto da relação a/c e teor de adição sobre o coeficiente de difusão (Ds).....	119
Figura 83: Vida útil do concreto	121
Figura 84: Corpos de prova após aspersão de nitrato de prata.....	122
Figura 85: Profundidade de penetração de cloretos.....	123
Figura 86: Efeito isolado da relação a/c sobre a profundidade de penetração.....	125
Figura 87: Efeito isolado da idade sobre a profundidade de penetração.....	126
Figura 88: Efeito isolado do teor de adição sobre a profundidade de penetração	126
Figura 89: Efeito conjunto da relação a/c e teor de adição sobre a profundidade de penetração.....	127
Figura 90: Efeito conjunto da idade e teor de adição sobre a profundidade de penetração.....	128
Figura 91: Influência da alumina na carga total passante.....	131

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Produção mundial de rochas ornamentais: Perfil histórico	19
Tabela 2: Distribuição Regional da produção de Rochas Ornamentais no Brasil em 2012.	19
Tabela 3: Distribuição por Estados dos Teares Multilâmina de Aço e Multifio Diamantado no ano de 2012	21
Tabela 4: Estudos desenvolvidos com aplicação do RBRO sem tratamento térmico em matrizes cimentícias	28
Tabela 5: Composição química do resíduo tratado termicamente a 700°C	29
Tabela 6: Composição química do RBRO obtido de diferentes rochas graníticas	31
Tabela 7: Traços de argamassa utilizados no trabalho de Mármore (2010)	31
Tabela 8: Composição química LBRO G e LBRO D	33
Tabela 9: Resultados de ensaio de atividade pozolânica – método de Luxán	33
Tabela 10: Classificação dos concretos de acordo com a carga passante	47
Tabela 11: Programa Experimental - Ensaios	52
Tabela 12: Propriedades físicas do agregado miúdo	53
Tabela 13: Ensaio a serem realizados no agregado graúdo	54
Tabela 14: Caracterização do cimento CPV-ARI.	56
Tabela 15: Caracterização dos resíduos RBRO G e RBROD	58
Tabela 16: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade	67
Tabela 17: Composição das argamassas	69
Tabela 18: Traço unitário dos concretos	72
Tabela 19: Caracterização química do RBROTT	84
Tabela 20: Requisitos químicos	85
Tabela 21: Caracterização física do RBROTT	86
Tabela 22: Resultados do ensaio de atividade pozolânica pelo método de Luxán	88
Tabela 23: Massa específica dos concretos	94
Tabela 24: Resistência à compressão média	96
Tabela 25: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão	97
Tabela 26: Carga total passante média	105
Tabela 27: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na carga total passante	107
Tabela 28: Coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário	113
Tabela 29: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão (D_{ns})	115
Tabela 30: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão (D_s)	117
Tabela 31: Profundidade de penetração	123
Tabela 32: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na profundidade de penetração	124
Tabela 33: Influência dos percentuais de adição nas propriedades dos concretos	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ACI - *American Concrete Institute*
ANOVA – Análise de Variância
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
C – Carga total passante
CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento
Cl⁻ - Íon cloreto
C₃A- Aluminato Tricálcico
CP II-F-32 – Cimento Portland composto com fíler
CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
CV – Coeficiente de variação
Ds – Coeficiente de Difusão no Estado Estacionário
Dns – Coeficiente de Difusão no estado não Estacionário
ES – Espírito Santo
GL – Graus de liberdade
IAP – Índice de Atividade Pozolânica
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LBRO D – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais sem Granalha
LBRO G – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais com Granalha
LEMAC – Laboratório de ensaios em materiais de construção
LTG-ER – Laboratório de Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis
MPa – Mega Pascal
MQ – Média Quadrática
NBR – Norma Brasileira
NE – Não especificado
NT - Nordtest
PA – Para Análise
PF – Perda ao Fogo
ph- potencial hidrogeniônico
RBRO D – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais sem Granalha
RBRO G – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais com Granalha
RBROTT – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais Tratado Termicamente
SQ – Soma quadrática
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
UNE - *Una Norma Española*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO).	18
2.1.1	Panorama geral do setor de rochas ornamentais	18
2.1.2	Extração dos blocos nas pedreiras	20
2.1.3	Processo de beneficiamento e geração do RBRO	21
2.2	Tipos de adições.....	24
2.3	Aplicações do RBRO em matrizes cimentícias	27
2.3.1	Aplicação do RBRO sem tratamento térmico.....	27
2.3.2	Aplicação do RBRO após tratamento térmico.....	29
2.4	Durabilidade.....	35
2.4.1	Causas da corrosão das armaduras	37
2.4.2	Mecanismos de penetração de cloretos no concreto.....	39
2.4.3	Ensaio de resistência à penetração de cloretos	41
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	Planejamento dos experimentos	48
3.1.1	Variáveis dependentes	48
3.1.2	Variáveis independentes	48
3.1.3	Variáveis de controle	49
3.2	Programa experimental	49
3.3	Materiais	53
3.3.1	Agregado miúdo	53
3.3.2	Agregado graúdo	54
3.3.3	Água	55
3.3.4	Cimento	55
3.3.5	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)	57
3.4	Métodos.....	58

3.4.1	Produção do RBROTT.....	58
3.4.2	Caracterização do RBROTT	62
3.4.3	Caracterização quanto à atividade pozolânica.....	66
3.4.4	Método de dosagem dos concretos.....	70
3.4.5	Determinação da massa específica no estado fresco	72
3.4.6	Resistência à compressão axial	72
3.4.7	Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987-14	73
3.4.8	Ensaio acelerado de migração de cloretos – ASTM C1202-12.....	78
3.4.9	Ensaio de penetração de cloretos por imersão - NT BUILD 443-95	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
4.1	Caracterização do RBROTT.....	84
4.1.1	Caracterização química do RBROTT	84
4.1.2	Caracterização física do RBROTT	85
4.1.3	Atividade Pozolânica do RBROTT	87
4.2	Resultados dos ensaios em concretos.....	92
4.2.1	Concreto no estado fresco	92
4.2.2	Concreto no estado endurecido.....	95
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5.1	Conclusão geral.....	132
5.2	Conclusões específicas.....	132
5.2.1	Atividade pozolânica	132
5.2.2	Concreto no estado fresco	133
5.2.3	Concreto no estado endurecido.....	133
5.3	Sugestões para trabalhos futuros.....	135

REFERÊNCIAS

APÊNDICES

1 INTRODUÇÃO

A extração de matérias-primas da natureza e o beneficiamento resultam na formação de resíduos. Estes resíduos são responsáveis pela origem de impactos ambientais de diversas naturezas, como alteração das propriedades do solo e da água na região. Atualmente, a consciência em relação à utilização de recursos naturais tem mudado, visto que tais recursos, na maioria das vezes não são sustentáveis. Frente a essa problemática, muitos estudos já conseguiram comprovar a aplicabilidade de diversos resíduos, fazendo com que estes deixem de ser um material descartável e adquiram uma finalidade nobre. Como exemplo, pode-se citar a cinza volante, que segundo Neville e Brooks (2013) é o tipo mais comum de pozolana utilizada na fabricação de cimentos, que normalmente são utilizados para fabricação de concretos com requisitos de baixo calor de hidratação e concretos com exigências de boa resistência química.

Um ramo que tem absorvido diferentes tipos de resíduos é a construção civil, que já emprega alguns materiais, como a escória de alto forno, por exemplo. Pode-se afirmar que a construção civil ainda tem grande potencial para incorporar novos resíduos devido ao fato de possuir uma gama enorme de materiais. Para isso, torna-se necessário a realização de novos estudos em tecnologia de materiais com o objetivo de comprovar a viabilidade técnica e econômica dessas aplicações.

Dentre os possíveis resíduos que podem ser empregados na construção civil tem-se o resíduo gerado no processo de beneficiamento de rochas ornamentais. Sabe-se que o Brasil é um grande produtor de rochas ornamentais, tendo em 2014 uma produção estimada de 10,13 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2015). Segundo Freire e Motta (1995) apud Calmon *et al.* (1997), no processo de beneficiamento das rochas ornamentais, cerca de 20 a 25% do bloco é transformado em resíduo, logo é possível estimar que em 2014, cerca de 3,38 milhões de toneladas de resíduos foram gerados durante o beneficiamento das rochas, o que é um volume considerável.

Frente a essa quantidade de resíduo produzido no Brasil e sabendo que o estado do Espírito Santo, onde o presente estudo foi realizado, é responsável

pela maior parte da produção nacional de rochas ornamentais, torna-se interessante o desenvolvimento de pesquisas com foco na utilização desse material na construção civil.

Diversas pesquisas já foram realizadas em diversos países de forma a utilizar o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em matrizes cimentícias tanto em concretos como em argamassas. Uma das pesquisas mais recentes e que se mostrou muito promissora foi desenvolvida por Uliana (2014), na qual o resíduo foi tratado termicamente, moído e aplicado em matrizes cimentícias. Em seu trabalho, foi comprovado que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) adquiriu propriedades semelhantes às propriedades de uma pozolana, que são minerais comumente empregados na produção de concretos e cimentos. Porém, novos estudos ainda devem ser realizados para comprovar a real eficiência da aplicação desse resíduo tratado termicamente, analisando se o mesmo atende a critérios de resistência mecânica e durabilidade.

A partir do trabalho desenvolvido por Uliana (2014), decidiu-se estudar a influência da aplicação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) em concretos, tendo como foco a avaliação da atividade pozolânica desse resíduo assim como a influência desse composto nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência da adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) em concretos, tendo como foco as características mecânicas e de durabilidade desses concretos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a atividade pozolânica do resíduo após o tratamento térmico;

- Avaliar a influência dos diferentes percentuais de adição do RBROTT sobre a consistência do concreto no estado fresco;
- Avaliar a influência dos diferentes percentuais de adição do RBROTT sobre a resistência à compressão no estado endurecido em diferentes idades e com diferentes relações a/c;
- Avaliar a influência da adição do RBROTT na capacidade dos concretos em resistirem à penetração de íons cloretos por diferentes métodos internacionais de avaliação;
- Avaliar o efeito do percentual de RBROTT sobre o coeficiente de difusão dos cloretos através do ensaio acelerado de migração de cloretos para diferentes relações a/c;
- Estimar a previsão de vida útil para concretos produzidos com diferentes percentuais de adição e diferentes relações a/c.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo oferecer a base teórica para a realização desta pesquisa, servindo de apoio para o aprimoramento e compreensão dos métodos utilizados. Será possível entender de maneira ampla as questões que envolvem a geração do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), assim como a sua aplicação em matrizes cimentícias. Esse embasamento foi realizado a partir da revisão bibliográfica acerca do tema, sendo apresentando os pontos mais importantes relacionados ao resíduo e também às suas aplicações.

2.1 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

2.1.1 Panorama geral do setor de rochas ornamentais

Segundo Soares (2014), as rochas ornamentais são divididas basicamente em granitos e mármore, sendo os granitos geralmente rochas silicáticas enquanto os mármore são carbonáticas. Além do mármore e granito, outros tipos também são importantes para o setor, como os quartzitos, serpentinitos, travertinos e ardósias.

No ano de 2013, a produção mundial de rochas ornamentais somou quase 130 milhões de toneladas correspondentes a cerca de 48 milhões de metros cúbicos ou 1,42 bilhões de metros quadrados equivalentes de chapas com dois centímetros de espessura. Na Tabela 1 pode ser visto a produção mundial desde o ano de 1926, de acordo com os tipos de rochas produzidos (ABIROCHAS, 2014).

Tabela 1 - Produção mundial de rochas ornamentais: Perfil histórico.

Ano	Mármore		Granito		Outros*		Total
	1.000 t	%	1.000 t	%	1.000 t	%	1.000 t
1926	1.175	65,6	175	9,8	440	24,6	1.790
1976	13.600	76,4	3.400	19,1	800	4,5	17.800
1986	13.130	60,5	7.385	34,0	1.195	5,5	21.710
1996	26.450	56,9	17.625	37,9	2.425	5,2	46.500
1998	29.400	57,6	19.000	37,3	2.600	5,1	51.000
2000	34.500	57,8	21.700	36,3	3.450	5,9	59.650
2002	39.000	57,8	25.000	37,0	3.500	5,2	67.500
2004	43.750	53,9	33.000	40,6	4.500	5,5	81.250
2006	53.350	57,5	34.800	37,5	4.600	5,0	92.750
2008	61.000	58,0	38.300	36,5	5.700	5,5	105.000
2010	65.230	58,5	40.500	36,3	5.750	5,2	111.500
2012	72.250	58,5	45.750	37,0	5.500	4,5	123.500
2013	76.750	59,0	47.500	36,5	5.750	4,5	130.000

Fonte: Montani (2014) *apud* Abirochas (2014, p. 3).

No ano de 2014, as exportações brasileiras de rochas ornamentais igualaram-se às exportações de 2013, atendendo mais de cem países em todos os continentes. O Brasil é o terceiro maior exportador de ardósia do mundo (perde para Espanha e China) e o segundo maior exportador de blocos de granito (depois da Índia), sendo o primeiro maior fornecedor de rochas para os Estados Unidos (ABIROCHAS, 2015). Essa capacidade de exportação no qual o Brasil se encontra atualmente se deve principalmente à região sudeste do país, sendo responsável por cerca de 65% da produção nacional no ano de 2012, como pode ser visto na Tabela 2 (CHIODI FILHO e KISTEMANN, 2014).

Tabela 2: Distribuição Regional da produção de Rochas Ornamentais no Brasil em 2012.

Região	Produção (10 ⁶ t)	Participação (%)
Sudeste	6,0	65,0
Nordeste	2,4	26,0
Sul	0,4	4,0
Centro-Oeste	0,4	4,0
Norte	0,1	1,0
Total estimado	9,3	100

Fonte: Chiodi Filho (2013) *apud* Chiodi Filho e Kistemann (2014, p. 509).

2.1.2 Extração dos blocos nas pedreiras

Segundo Gonçalves (2000), as principais técnicas utilizadas no processo de extração das rochas nas pedreiras são as seguintes:

- Corte com fio helicoidal: é um processo no qual arames de aço fazem cortes verticais, horizontais ou inclinados nas rochas;
- Corte com fio diamantado: cabo de aço com 16 metros, onde são distribuídas pérolas diamantadas responsáveis pelo corte da rocha. Método semelhante é utilizado no desdobramento das rochas em chapas e será melhor explicado nos capítulos posteriores.
- Corte contínuo: é utilizada uma perfuratriz hidráulica ou pneumática, montada sobre trilhos reguláveis ou sobre plataforma móveis;
- Jet flame: é realizado a partir do aquecimento e brusco resfriamento da zona de corte. Nesse caso são desmontados grandes volumes com explosivos.

No processo de extração são gerados resíduos, que são pedaços de rochas que não foram aproveitados ou de rochas que fissuraram (GONÇALVES, 2000). Essas rochas podem ser vistas na Figura 1, mas não serão o foco do presente estudo, que visa a utilização do resíduo gerado no processo de beneficiamento das rochas ornamentais. Caso decida-se empregar esses pedaços de rochas como adição à alguma matriz, deve-se incluir no processo a redução desse material em partículas menores.

Figura 1: Resíduo gerado na extração das rochas



Fonte: Gonçalves (2000, p. 21).

2.1.3 Processo de beneficiamento e geração do RBRO

O processo de beneficiamento dos blocos tem início com o desdobramento, que é um processo no qual os blocos são cortados em chapas com dimensões variadas. Esse processo de corte é feito através de máquinas chamadas teares, que podem ser constituídos de lâminas metálicas ou fios diamantados, sendo o primeiro um processo mais tradicional.

Os teares com fios diamantados têm uma tendência natural a substituir os teares tradicionais com o passar dos anos. Segundo Chiodi Filho e Kistemann (2014), até o ano de 2020, acredita-se que a capacidade brasileira de serragem de chapas poderá superar 100 milhões de metros quadrados por ano, com cerca de 80% dessa capacidade representada por teares multifio diamantados.

Atualmente, há cerca 1200 teares multilâmina, contra pouco mais de 150 teares multifio diamantados no Brasil, sendo o Espírito Santo o estado com a maior quantidade de teares, seja multilâmina de aço, seja multifio diamantados (CHIODI FILHO e KISTEMANN, 2014). Na Tabela 3, pode ser observada a distribuição dos teares de acordo com as regiões brasileiras.

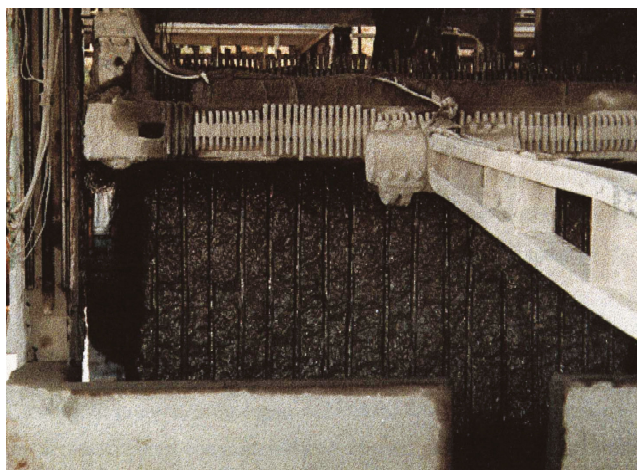
Tabela 3: Distribuição por Estados dos Teares Multilâmina de Aço e Multifio Diamantado no ano de 2012

Estados	Teares Multilâmina de Aço	Teares Multifio Diamantados
Esprito Santo	1.020	150
São Paulo	15	4
Rio de Janeiro	8	3
Paraná	8	2
Minas Gerais	22	-
Rio Grande do Sul	16	2
Bahia	18	-
Ceará	25	-
Pernambuco	6	1
Santa Catarina	8	5
Alagoas	9	-
Pará	4	-
Paraíba	9	1
Goiás	8	-
Rio Grande do Norte	2	-
Sergipe	6	-
Mato Grosso	5	-
Rondônia	5	-
Roraima	2	-
Total	1.196	168

Fonte: Adaptado de Chiodi Filho e Kistemann (2014).

Segundo Souza (2007) os teares tradicionais são equipamentos robustos, dotados de quatro colunas que sustentam um quadro que realiza movimento pendular. Esse quadro é dotado de múltiplas lâminas de aço carbono (alta dureza), dispostas longitudinalmente, umas paralelas as outras, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Detalhe das lâminas de corte – tear tradicional



Fonte: Calmon e Silva (2006, p. 204).

No processo de desdobramento das rochas por teares tradicionais, gera-se uma lama proveniente de uma polpa abrasiva utilizada para atender à necessidade de lubrificar, resfriar e evitar a oxidação das lâminas, além de servir como abrasivo, facilitando a serragem dos blocos. Essa polpa é composta basicamente de água, granalha, cal e pó da rocha moída (GONÇALVES, 2000).

A poupa abrasiva é utilizada por diversas vezes durante o processo, no qual a lama passa por um tanque de bombeamento (Figura 3), sendo em seguida aspergida sobre o bloco. Porém, à medida que a lama é utilizada, seus grãos vão sendo desgastados até o momento em que perde sua serventia, sendo então descartada (CALMON e SILVA, 2006). É nesse momento que é gerado o Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO). Para o caso do resíduo proveniente do corte por teares tradicionais, decidiu-se por classificá-lo como RBRO G, pelo fato de possuir granalha em sua composição.

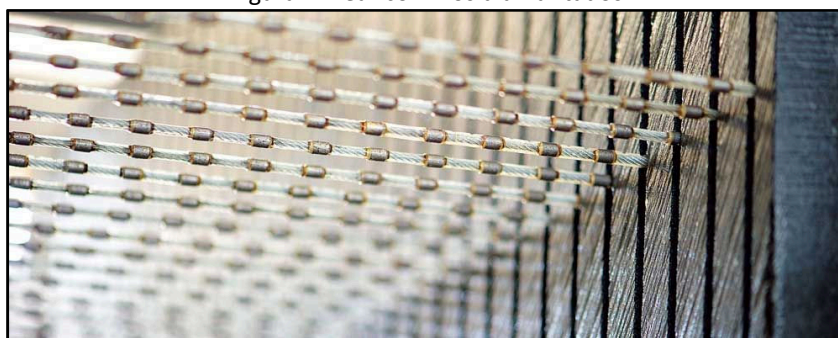
Figura 3: Tanque de bombeamento



Fonte: Babisk (2009, p. 26).

Como exposto anteriormente, além dos teares tradicionais, existem também os teares com fios diamantados. O processo de corte com esses teares utiliza um chuveiro de água (sem gralha) para promover a limpeza, a lubrificação e o resfriamento dos fios. O rejeito gerado nestes teares pode ser considerado o de menor impacto ao meio ambiente, pois não utiliza mistura abrasiva de forma que a quantidade de rejeito gerado pode ser consideravelmente menor (CALMON e SILVA, 2006). Na Figura 4 pode ser observado com maior detalhe os fios diamantados utilizados nesse processo.

Figura 4: Tear com fios diamantados



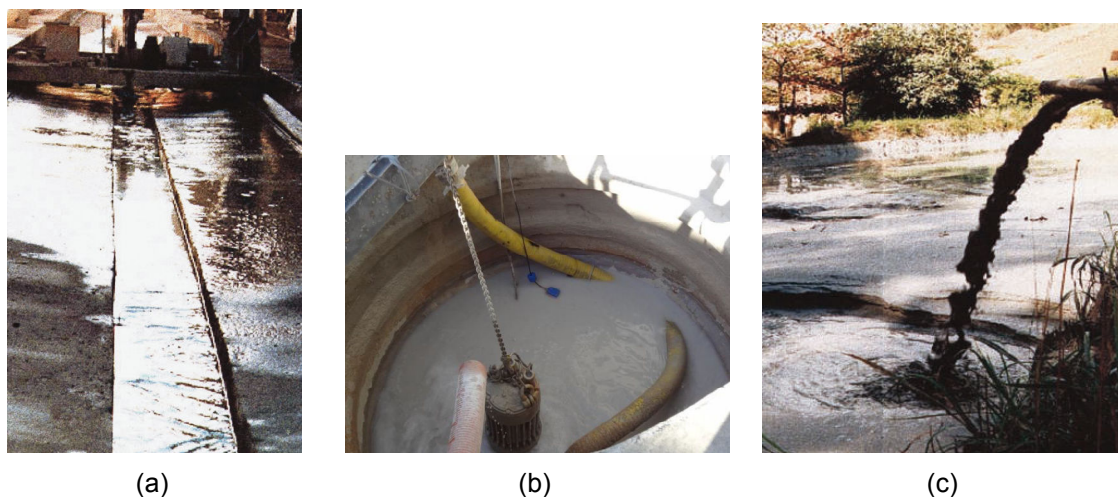
Fonte: Breton (2016).

O resíduo proveniente do corte por fios diamantados será classificado como RBRO D. Tanto a classificação do RBRO G como RBRO D são atribuições inspiradas na classificação do Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito

Santo (IEMA-ES), que os chama de LBRO G e LBRO D, por se tratarem de uma lama do beneficiamento de rochas ornamentais (ULIANA, 2014).

Por muitos anos, a lama do beneficiamento das rochas era depositada em lagoas de sedimentação diretamente no solo, o que representava um impacto ambiental significativo. Porém, atualmente a lama é transportada através de uma canaleta (Figura 5a) até um poço de bombeamento (Figura 5b) (ULIANA, 2014). A partir do poço de bombeamento o resíduo é lançado para o poço final de coleta (Figura 5c). Uma vez que os taques estão cheios, são esvaziados para então poderem receber mais rejeito (CALMON e SILVA, 2006).

Figura 5: Processo de descarte do RBRO. (a) Canaleta. (b) Poço de bombeamento. (c) Poço final de coleta



Fonte: Adaptado de Calmon e Silva (2006) e Uliana (2014).

Após a coleta, o resíduo é transportado para aterros industriais, que geram gastos para a empresa e prejuízos ao meio ambiente, pois, sua disposição final sob a forma de aterros provoca a formação de grandes ambientes desérticos, não sendo a melhor solução para o problema (CALMON e SILVA, 2006). A partir disso, torna-se interessante tanto para as empresas quanto para os órgãos ambientais o aproveitamento desse resíduo.

2.2 Tipos de adições

Este trabalho visa a aplicação do RBRO em matrizes cimentícias, por isso torna-se fundamental entender quais são os diferentes tipos de adições que podem ser utilizadas em matrizes cimentícias. A partir disso, será possível

compreender quais as possíveis aplicações que podem ser dadas a esse resíduo e suas vantagens.

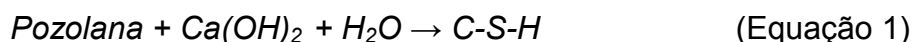
Segundo Alves (2008), as adições minerais podem ser classificadas em três grupos, de acordo com suas propriedades físico-químicas. Tais adições são:

- Adições pozolânicas;
- Adições cimentantes;
- Fíler.

Segundo Bauer (2000), pozolanas são substâncias silicosas e aluminosas que, embora não tendo qualidades aglomerantes próprias, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na presença de água, formando compostos cimentícios (C-S-H). A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é conhecida como reação pozolânica.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a importância técnica do uso de cimentos contendo pozolanas resulta principalmente de três aspectos da reação pozolânica. O primeiro aspecto é que a reação é lenta, fazendo com que o ganho de resistência mecânica e liberação de calor também sejam lentos. Segundo, a reação consome hidróxido de cálcio (Equação 1), em vez de produzi-lo, diferente do que ocorre com a hidratação do cimento Portland (Equação 2):

Cimento Portland Pozolânico:



Cimento Portland:



O fato de consumir hidróxido de cálcio confere um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos. O terceiro aspecto importante é que a reação pozolânica gera produtos eficientes em preencher espaços capilares da pasta, melhorando a resistência e impermeabilidade do sistema.

A norma NBR 12653 (ABNT, 2015) classifica as pozolanas em relação à sua origem, podendo ser:

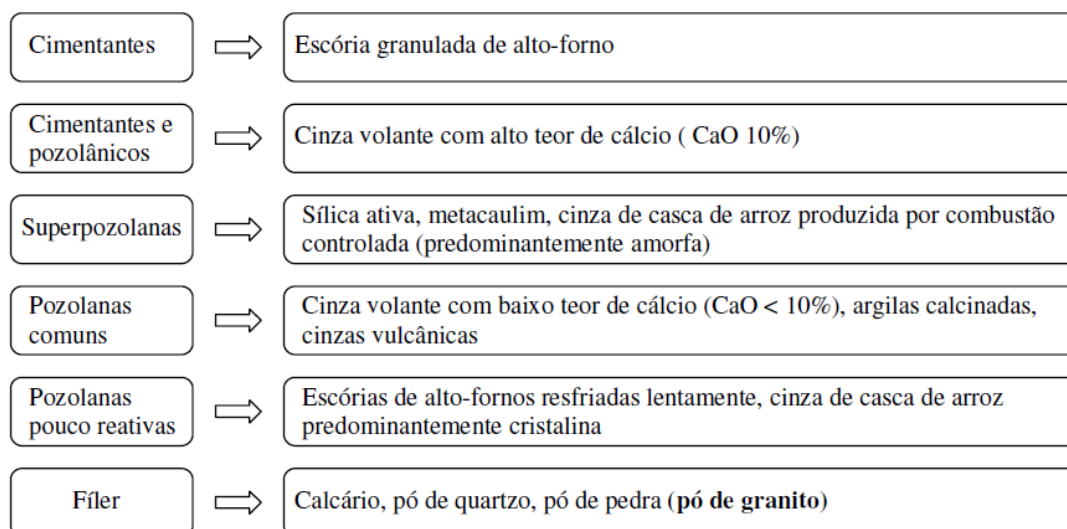
- a) Classe N - Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), como é o caso de certos materiais vulcânicos, argilas calcinadas, cherts silicosos e terras diatomáceas;
- b) Classe C – Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas, que obedecem aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015);
- c) Classe E: Qualquer pozolana que não se enquadre nas classificações anteriores, devendo também atender aos critérios da NBR 12653 (ABNT, 2015).

Os materiais cimentantes são aqueles que necessitam apenas de água para realizar seu processo de hidratação, porém, quando na presença de hidróxido de cálcio aceleram suas reações (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Um exemplo clássico é a escória de alto-forno que é amplamente aplicada na fabricação de cimentos.

Por último, o fíler, que é um material fino, com diâmetro médio próximo ao do cimento e que não possui atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como ponto de nucleação para a hidratação do cimento. Devido à sua ação física é capaz de trazer melhorias para algumas propriedades do concreto, quando presente em pequenas quantidades, sendo normalmente empregados em quantidades inferiores a 15% da massa de cimento (DAL MOLIN, 2005).

As adições minerais mais utilizadas em concretos são apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Principais adições minerais utilizadas em concretos



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994) e RILEM (1998) *apud* Dal Molin (2005, p. 348).

2.3 Aplicações do RBRO em matrizes cimentícias

Existem diversos estudos de aplicação do RBRO incorporado em outros materiais, seja em matrizes cerâmicas, betuminosas ou cimentícias. Porém, no presente estudo será abordada somente a aplicação em matrizes cimentícias.

2.3.1 Aplicação do RBRO sem tratamento térmico.

No caso das aplicações em matrizes cimentícias, a maioria dos estudos utilizou o resíduo em sua forma natural, atuando como adição mineral, substituto do agregado miúdo e também do cimento. Bastos (2013) realizou uma vasta pesquisa com o intuito de abordar os trabalhos desenvolvidos no Brasil com maior relevância à cerca do tema. Além dessa autora, Rana *et al.* (2016) também realizaram um trabalho de revisão bibliográfica à cerca do tema, englobando diversos trabalhos internacionais em que o resíduo foi utilizado em matrizes cimentícias.

Na Tabela 4 estão apresentados alguns dos trabalhos utilizados como fonte de consulta para o desenvolvimento do presente trabalho. É possível observar que as pesquisas sobre a utilização do resíduo em matrizes cimentícias já vêm sendo desenvolvidas há cerca de duas décadas, seja aplicadas em argamassas ou concretos.

Tabela 4: Estudos desenvolvidos com aplicação do RBRO sem tratamento térmico em matrizes cimentícias

Autores	Pesquisa
Calmon <i>et al.</i> (1997)	Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas
Gonçalves (2000)	Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.
Almeida <i>et al.</i> (2005)	Reciclagem de lama de rocha nas atividades industriais: Aplicação em misturas de concreto - <i>Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures</i>
Alves (2008)	Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduo do polimento de rochas graníticas como adição em concretos.
Barros (2008)	Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito
Sangalli <i>et al.</i> (2013)	Confecção de concreto auto adensável com a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de granito e mármore
Degen <i>et al.</i> (2013)	Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento.
Dietrich (2015)	Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto.

Fonte: Autor.

Dentre as pesquisas mais recentes, temos as desenvolvidas por Soares (2014) e Dietrich (2015), que trabalharam com adição do RBRO em concretos. As autoras chegaram à conclusão de que o RBRO apresenta características físicas (finura) e químicas para ser considerado um material pozolânico. Porém, ao se analisar a atividade pozolânica do RBRO, o mesmo não atendeu aos limites mínimos para ser considerado uma pozolana. Com isso, o RBRO sem tratamento térmico foi considerado como sendo um fíler, exercendo um efeito físico de preenchimento dos poros quando aplicado aos concretos.

Para o concreto no estado fresco, ambas as autoras observaram uma diminuição do abatimento com o aumento do teor de adição, sendo este um comportamento esperado devido ao fato de o RBRO ser um material fino e de superfície específica elevada. Em relação à resistência à compressão, os melhores resultados de resistência foram obtidos para os concretos com 5% de adição, que superaram os concretos referência. Para os maiores teores de adição (10% e 15%) houve redução da resistência mecânica dos concretos quando comparados aos concretos sem adição.

2.3.2 Aplicação do RBRO após tratamento térmico

Al-Akhras e Ababneh (2010) desenvolveram um trabalho em que o resíduo foi tratado termicamente a uma temperatura de 700°C e utilizado como substituição parcial da areia nas proporções de 0, 5, 10 e 15% para confecção de argamassas. Os autores não deixam claro que o tratamento térmico foi aplicado para transformar o resíduo em pozolana, apenas afirmam que nas pesquisas anteriores em que o resíduo não foi tratado termicamente não houve melhoria nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias nas quais foram aplicadas e por isso decidiu-se realizar o tratamento térmico.

O resíduo utilizado por Al-Akhras e Ababneh (2010) se apresentou com finura de 710 m²/Kg obtida via ensaio Blaine, que é um valor alto de finura, sendo superior à finura dos cimentos Portland, inclusive do CPV-ARI (a NBR 5733 exige o mínimo de 300 m²/Kg de finura para o CPV-ARI). Mesmo sendo um material muito fino, o que é característico de materiais pozolânicos, é possível observar na Tabela 5 que esse resíduo não é um material sílico-aluminoso devido ao fato de possuir apenas 5,97% de sílica (SiO₂) e apenas 1,09% de alumina (Al₂O₃). O autor não explicita o tipo de rocha ao qual o resíduo é proveniente, mas, é possível que tenha sido obtido a partir de rochas calcárias, pois apresenta 76,09% de óxido de cálcio (CaO).

Tabela 5: Composição química do resíduo tratado termicamente a 700°C

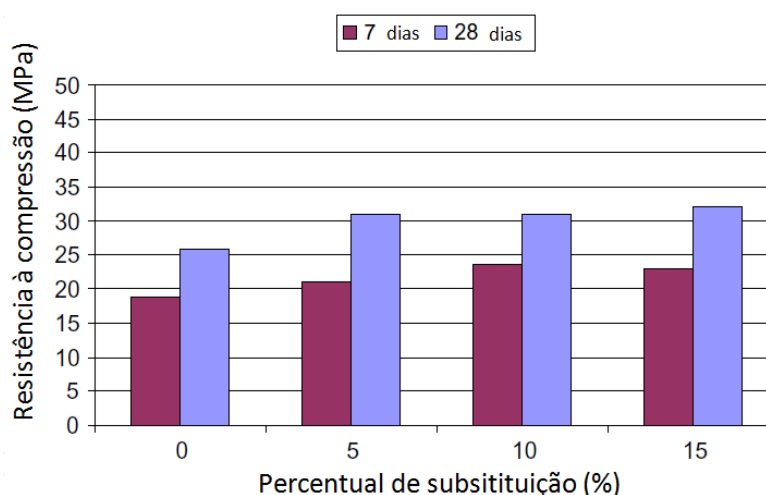
Composição	Valor (%)
SiO ₂	5,97
Al ₂ O ₃	1,09
Fe ₂ O ₃	0,28
CaO	76,09
MgO	0,93
SO ₃	0,67
K ₂ O	0,099
Perda ao fogo	0,0

Fonte: Adaptado de Al-Akhras e Ababneh (2010).

As argamassas confeccionadas apresentaram redução na consistência à medida que se aumentou o teor de adição. O resultado obtido no ensaio Flow Table, reduziu de 216mm na argamassa referência para 196mm na argamassa com 15% de substituição.

Em relação às propriedades mecânicas, na idade de 7 dias o resíduo proporcionou aumento da resistência à compressão de 12%, 26% e 22% para a substituição de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Enquanto para a idade de 28 dias a resistência à compressão aumentou em 19%, 19% e 23% para a substituição de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Na Figura 7 pode ser observado esse comportamento.

Figura 7: Resistência à compressão dos corpos de prova da argamassa referência e da argamassa com diferentes teores de substituição



Fonte: Adaptado de Al-Akhras e Ababneh (2010).

Mármol *et al.* (2010) desenvolveram um trabalho em que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foi tratado termicamente e aplicado na confecção de argamassas. O tratamento térmico teve como foco a mudança na coloração do resíduo para que pudesse ser aplicado como pigmento em argamassas. Os autores explicam que a mudança na coloração do resíduo após o tratamento térmico se deve à cristalização do Fe_2O_3 , que passa a apresentar uma cor alaranjada. Havia 5 tipos de resíduos provenientes do corte de pedras graníticas cuja composição química pode ser observada na Tabela 6. Como a intenção era tratar o resíduo para produzir pigmento, escolheu-se o RBRO-5 que possui o maior percentual de Fe_2O_3 que é o componente responsável por conferir a coloração alaranjada após o processo de tratamento térmico.

Tabela 6: Composição química do RBRO obtido de diferentes rochas graníticas

Composição química	RBRO-1	RBRO-2	RBRO-3	RBRO-4	RBRO-5
SiO ₂	61,76	61,52	61,93	58,57	51,98
Al ₂ O ₃	13,38	13,53	12,8	12,01	10,5
Fe ₂ O ₃	6,85	8,75	12,41	16,36	27,89
MnO	0,08	0,08	0,11	0,14	0,22
MgO	1,87	1,01	0,73	0,59	0,58
CaO	5,9	5,73	4,59	5,68	3,44
Na ₂ O	2,35	2,56	2,54	2,41	2,02
K ₂ O	3,45	3,18	3,59	3,29	2,99
TiO ₂	0,5	0,46	0,31	0,31	0,27
P ₂ O ₅	0,16	0,18	0,18	0,16	0,15
Perda ao fogo	2,89	2,18	0,02	0,13	0,01

Fonte: Adaptado de Mármol *et al.* (2010).

O resíduo RBRO-5 foi tratado termicamente à temperatura de 900°C. Foram confeccionados dois traços distintos de argamassa, uma sendo o traço referência (A) e o outro com aplicação do resíduo tratado (B). Na Tabela 7 pode ser visto o traço de cada uma das argamassas.

Tabela 7: Traços de argamassa utilizados no trabalho de Mármol (2010)

Composição	A	B
Cimento	13,5	13,5
Areia	77	77
Fíler (CaCO ₃)	9,5	-
RBROTT (900°C)	-	9,5
Água/argamassa	0,16	0,14

Fonte: Adaptado de Mármol *et al.* (2010).

Os corpos de prova da argamassa referência e com aplicação do resíduo tratado podem ser vistos na Figura 8. É possível observar que a argamassa que utilizou o resíduo ficou com a coloração alaranjada, atingindo assim o objetivo de produzir uma argamassa colorida.

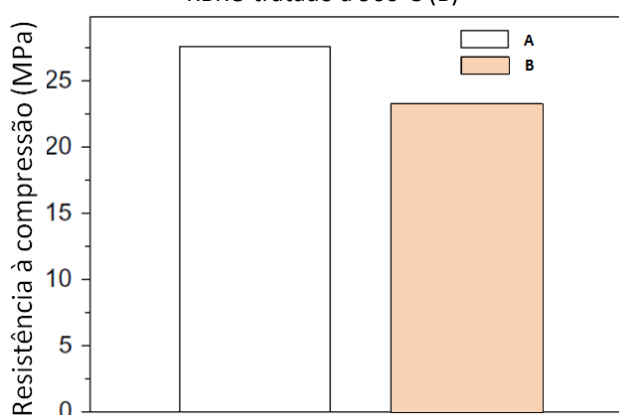
Figura 8: Corpos de provas da argamassa referência (A) e argamassa contendo adição de RBRO tratado a 900°C (B)



Fonte: Adaptado de Mármol *et al.* (2010).

Após o período de cura de 28 dias os corpos de prova foram rompidos por compressão. O resultado está apresentado na Figura 9. O autor conclui que a argamassa colorida (B) apresentou valores de resistência próximos aos valores da argamassa referência (A). Além disso, atendeu aos valores mínimos de resistência exigidos por norma para ser utilizado como argamassa de reboco.

Figura 9: Resistência à compressão da argamassa referência (A) e da argamassa contendo adição de RBRO tratado a 900°C (B)



Fonte: Adaptado de Mármol *et al.* (2010).

Uliana (2014) realizou o tratamento térmico da lama de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente do corte com fios diamantados (RBRO D) e multilâminas (RBRO G) com o intuito de utilizá-los em substituição parcial do cimento em argamassas. A composição química dos resíduos utilizados estão apresentados na Tabela 8, podendo-se observar que se trata de um material cuja maior parte da composição é SiO_2 e Al_2O_3 .

Tabela 8: Composição química LBRO G e LBRO D

Resíduo	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	PF
LBRO G	7,57%	63,75%	14,55%	3,72%	0,31%	0,22%	3,58%	5,01%	0,07%	0,06%	0,69%
LBRO D	3,79%	66,80%	13,50%	3,44%	0,93%	0,16%	3,50%	3,83%	0,07%	0,06%	3,50%

Fonte: Adaptado de Uliana (2014).

Os resíduos foram tratados termicamente por 2h nas temperaturas de 1200, 1300, 1400 e 1500°C. Para decidir qual das temperaturas seria a melhor, foi realizado um ensaio para determinar a classificação pozolânica do material pelo método de Luxán, que será explicado no capítulo de métodos. O resultado está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados de ensaio de atividade pozolânica – método de Luxán

Resíduo	Tratamento térmico da amostra	Leitura Inicial (mS/cm)	Leitura Final (mS/cm)	Condutividade (mS/cm)	Classificação quanto à pozolanicidade (LUXÁN; SAAVEDRA, 1989)
LBRO D	não tratado	4,86	4,84	0,02	Não pozolânico
	1200°C	4,89	4,45	0,44	Pozolanicidade Variável
	1300°C	4,88	4,63	0,25	Não pozolânico
	1400°C	4,87	4,65	0,22	Não pozolânico
	1500°C	4,85	4,12	0,73	Pozolanicidade Variável
LBRO G	não tratado	4,86	4,83	0,03	Não pozolânico
	1200°C	4,88	4,6	0,28	Não pozolânico
	1500°C	4,89	4,59	0,3	Não pozolânico

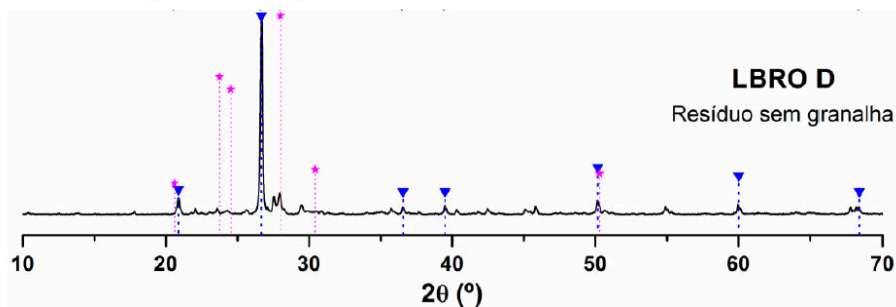
Fonte: Uliana (2014, p. 123).

É possível observar na Tabela 9 que tanto o tratamento a 1200°C como o tratamento a 1500°C conferiram ao LBRO D atividade pozolânica. A partir desses resultados decidiu-se utilizar a temperatura de 1200°C para tratar o resíduo a ser empregado nas argamassas. Descartou-se a temperatura de 1500°C pelo fato de apresentar um maior gasto energético e por ser um processo mais complexo de queima se comparado à temperatura de 1200°C.

Além do ensaio de classificação da atividade pozolânica, pode ser visto no difratograma apresentado na Figura 11 que após o tratamento térmico a 1200°C o resíduo apresentou halo amorfo, diferente do que se apresenta na Figura 10, que é o difratograma do resíduo sem tratamento térmico. Na Figura

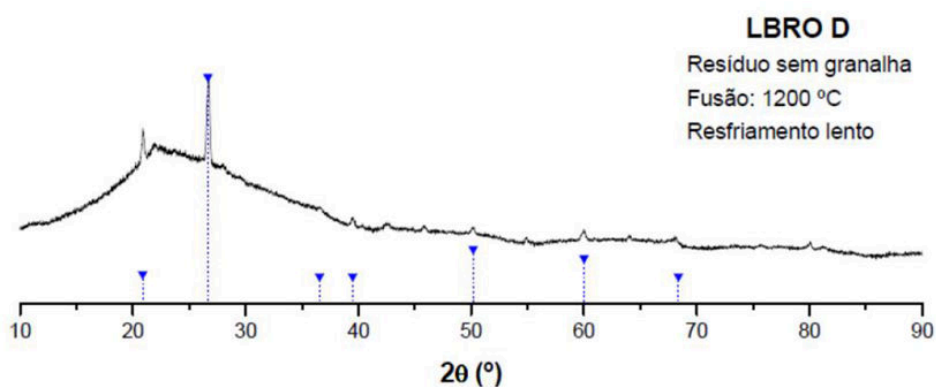
11 é possível observar picos que indicam a presença de organização cristalina que, segundo Uliana (2014) são pertencentes ao dióxido de silício (SiO_2) na forma de quartzo, visto que a temperatura de fusão desse componente é superior à temperatura de tratamento térmico aplicado.

Figura 10: Difratoograma de raios X do LBRO D sem tratamento térmico



Fonte: Uliana (2014, p. 116).

Figura 11: Difratoograma de raios X do LBRO D após tratamento térmico a 1200°C



Fonte: Uliana (2014, p. 120).

Após a determinação da temperatura de queima, foram produzidas argamassas com substituição de 5, 10, 15 e 20% do cimento pelo resíduo tratado, assim como substituições de 5% e 15% de resíduo não tratado, para que fosse possível compará-los. Após os resultados, observou-se que, quando utilizados nas argamassas após o tratamento térmico, os resíduos RBRO G TT e RBRO D TT demonstraram comportamento típico de materiais pozolânicos, com desempenho mecânico de resistência à compressão próximo ao da argamassa referência mesmo com percentual de substituição mais alto, que foi o de 20%. Já os RBRO G e RBRO D sem tratamento térmico apresentaram queda de até 20% na resistência para o percentual de substituição mais alto, que foi de 15%.

Vazzoler (2015), também realizou uma pesquisa com o resíduo tratado termicamente a 1200°C. A autora avaliou a influência do RBROTT quando aplicado em pastas de cimento com teores de adição de 5% e 10% em relação à massa de cimento, tendo como foco avaliar o efeito da adição na microestrutura da pasta. A autora concluiu que aplicado do RBROTT como adição, agiu na pasta cimentícia, densificando a matriz.

O trabalho desenvolvido por Uliana (2014) foi um grande passo em relação à utilização do RBRO em matrizes cimentícias, pois conseguiu provar que é possível converter o RBRO em RBROTT, que deixou de ser um fíler e adquiriu possíveis propriedades pozolânicas. Porém, novos estudos ainda devem ser desenvolvidos, principalmente com ensaios que comprovem a durabilidade dos concretos produzidos com a adição do resíduo tratado termicamente.

2.4 Durabilidade

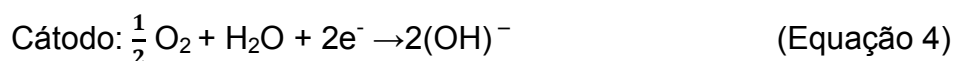
Segundo o ACI Committee 201 apud Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a capacidade de resistir às ações das intempéries, seja por ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo que possa deteriorar o concreto. Dessa forma, o concreto durável será aquele que conserva a sua forma original, sua qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente.

Atualmente, existem concretos que apresentam resistências mecânicas altíssimas, porém, devido à relação custo/benefício, ainda há necessidade de utilizar armaduras nas estruturais para que resistam aos esforços de tração. Dessa forma, tem-se o concreto armado, que é amplamente utilizado em todo país, sendo este um material excepcional, resistindo bem a esforços de tração e compressão. Porém, esta combinação apresenta uma fragilidade, que é a corrosão das armaduras. Segundo Ribeiro *et al.* (2014) a corrosão das armaduras ainda tem grande incidência nas estruturas, acarretando acidentes fatais, como alguns casos de desabamentos das marquises e lajes em balanço, ou acarretando enormes prejuízos, como a queda da adutora principal da Sabesp sobre o rio Pinheiros, em São Paulo, que deixou cerca de 3 milhões de paulistanos sem água por 15 dias.

A corrosão do aço no concreto é um processo eletroquímico, no qual são gerados potenciais eletroquímicos capazes de formar as células de corrosão. Além da diferença de potencial, também é necessário a presença de ar e de água para que ocorra o processo. As células de corrosão podem ser formadas de duas maneiras (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

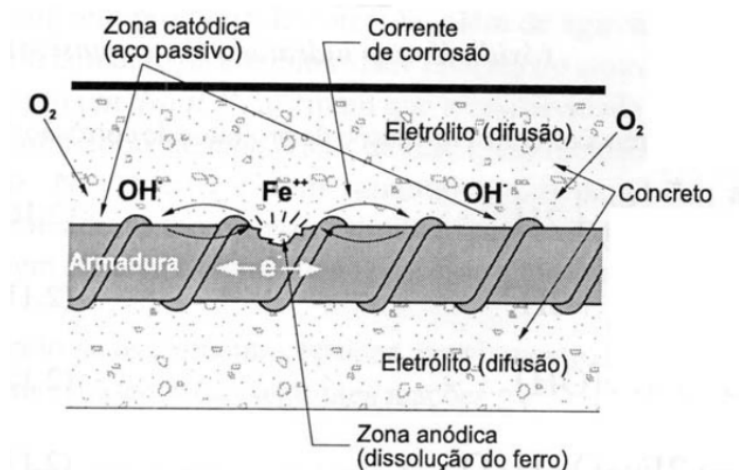
- Quando dois metais diferentes estão embutidos no concreto ou quando existem diferenças significativas nas características do aço.
- Também podem ser formadas devido a diferenças na concentração de íons dissolvidos na vizinhança do aço, tais como álcalis, cloretos e oxigênio.

Como resultado, um dos dois metais (ou alguma parte de um dos metais, quando há apenas um) torna-se a zona anódica (corroída) e o outro, a zona catódica (MEHTA e MONTEIRO, 2008). As reações químicas fundamentais que ocorrem na área anódica e catódica podem ser vistas nas Equações 3 e 4, respectivamente.



A partir daí, os íons Fe^{2+} migram pelo eletrólito (água contendo íons) em direção ao cátodo e os íons hidroxila OH^- migram em direção ao ânodo. Entre o ânodo e o cátodo esses íons se encontram e formam o hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), conhecido como ferrugem. O hidróxido ferroso pode sofrer transformações, gerando outros compostos expansivos e prejudiciais ao concreto armado (CASCUDO, 1997). Na Figura 12 pode ser observado o processo básico de corrosão que ocorre nas armaduras do concreto armado.

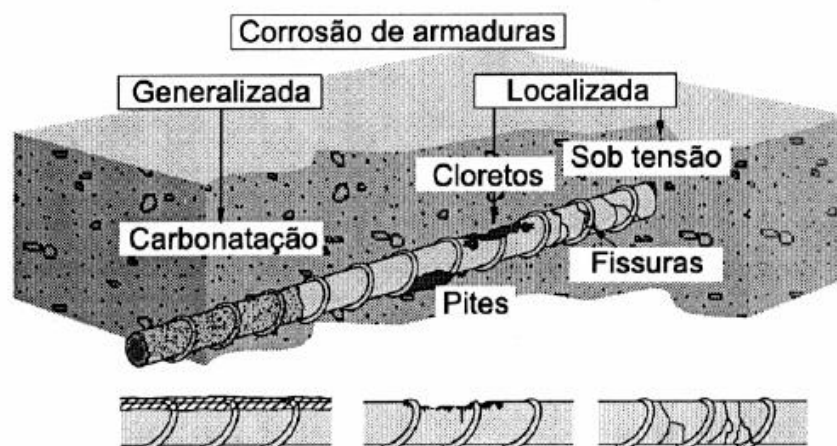
Figura 12: Mecanismo de corrosão na armadura do concreto



Fonte: Cascudo (1997, p. 58).

As reações apresentadas anteriormente são as reações fundamentais, porém, diversos outros fatores e agentes podem influenciar na forma como a corrosão irá ocorrer. Segundo Andrade (1992), a corrosão pode se apresentar de diversas formas, sendo em geral classificadas pela extensão da área atacada. Os tipos de corrosão mais comuns são: generalizada, localizada, por pite e fissurante. Na Figura 13 são apresentados os aspectos que esses tipos de corrosão conferem ao aço e suas possíveis causas.

Figura 13: Tipos de corrosão



Fonte: Cascudo (1997, p. 19).

2.4.1 Causas da corrosão das armaduras

Segundo Andrade (1992), o concreto, além de oferecer uma barreira física que serve de proteção ao aço, também confere uma barreira alcalina, com elevado

pH, que atua como uma camada passivante, protegendo o aço de elementos agressivos. Além disso, o próprio aço também possui uma fina camada de óxido passivante em sua superfície, de forma a protegê-lo de ataques químicos. Mesmo sendo um material denso e compacto, o concreto apresenta uma rede de poros. Essa rede de poros nem sempre se comunica, mas permite que o concreto apresente certa permeabilidade aos líquidos e gases. É a partir desses poros que os agentes externos penetram no concreto e caminham até encontrar o aço, restando somente o óxido de ferro do aço como proteção ao mesmo.

Para que seja dado início ao processo de corrosão, é necessário que a capa de óxido de ferro que protege a superfície do aço seja eliminada, pontualmente ou generalizadamente. Segundo Andrade (1992), são duas as causas que podem dar lugar a destruição da capa passivante do aço, que são:

- a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio. Para esse caso, o fenômeno mais comum é o processo da carbonatação, no qual o dióxido de carbono (CO_2) reage com os componentes alcalinos (principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$), destruindo assim a camada protetora natural que o concreto confere ao aço.

- a presença de uma quantidade suficiente de cloretos, que pode ter ingressado no concreto durante o amassamento ou penetrar do exterior, ou também outros íons despassivantes em contato com a armadura;

A principal diferença entre esses dois casos é que no primeiro, a corrosão ocorre de forma generalizada, já no segundo caso, ocorre em forma de pites, ou seja, a corrosão é pontual ou localizada (ver Figura 13).

Ambos os tipos de corrosão são extremamente prejudiciais ao concreto armado, pois, quando se converte o aço em ferrugem, ocorre o aumento do volume, o qual, dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600% do metal original, o que irá causar a expansão e fissuração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Além disso, a corrosão reduz a seção do aço, que terá sua resistência mecânica reduzida. Juntando os danos causados ao concreto e a

perda da seção do aço, o resultado pode ser catastrófico, podendo causar até mesmo a ruína da estrutura.

Mesmo ficando evidente que os dois tipos de corrosão apresentados são altamente prejudiciais às estruturas de concreto armado, o presente estudo terá como foco as análises de durabilidade do concreto voltadas para a resistência à penetração de íons cloretos, ficando à cargo de estudos posteriores verificar a capacidade desse concreto resistir à carbonatação, assim como o ataque de outros elementos químicos.

2.4.2 Mecanismos de penetração de cloretos no concreto

Existem diferentes mecanismos de transportes de cloretos no concreto, que são:

- *Absorção*: Este fenômeno é motivado por tensões capilares, ocorrendo imediatamente após o contato do líquido com o concreto. Um exemplo de solução líquida é a névoa salina, rica em íons cloreto. Normalmente a absorção capilar representa o primeiro passo para a contaminação do concreto e depende fortemente dos poros capilares interconectados entre si, que irá permitir o transporte das substâncias para o interior do concreto sendo mais intensa quanto menores forem os diâmetros dos capilares pois as forças de sucção serão maiores (CASCUDO, 1997);
- *Permeabilidade*: Segundo Ribeiro *et al.* (2014), a permeabilidade é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão. Cascudo (1997) afirma que o processo de permeabilidade ocasionada por pressão hidráulica em concretos ocorre de forma muito mais restrita se comparada à contaminação dada por absorção capilar. Ocorre em estruturas semi-enterradas com presença de lençol freático, estruturas de contenção de solos e também em estruturas de contenção de água.
- *Difusão iônica*: A absorção capilar abordada anteriormente ocorre na camada superficial do concreto. Já a movimentação no interior, onde o teor de umidade é mais elevado, ocorre principalmente devido à difusão em meio aquoso. A difusibilidade iônica ocorre devido à diferença de

concentração iônica, seja do meio externo e interno do concreto, seja dentro do próprio concreto. O processo de difusão é o mecanismo predominante de movimentação dos cloretos dentro do concreto, sendo necessário haver certa interconexão dos capilares. Além disso, é necessário que haja um eletrólito, sem o qual não ocorre a difusão. Valores típicos de taxa de difusão para pastas de cimento saturadas giram em torno de $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (CASCUDO, 1997).

Usualmente utiliza-se o coeficiente de difusão cuja unidade é cm^2/s para determinar a capacidade de um concreto em permitir a difusão de íons cloreto. Segundo Castellote, Andrade e Alonso (2001) existem dois tipos distintos de coeficientes de difusão. O coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) e o coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s). A diferença entre eles é que o D_{ns} leva em consideração o fato de que no processo de difusão parte dos cloretos vão se combinar quimicamente com os compostos do cimento. O D_s ocorre quando o concreto já está completamente saturado com cloretos, não havendo assim combinação dos mesmos com os compostos do cimento. Segundo Crauss (2010), nas estruturas reais o que ocorre é a difusão no estado não estacionário. Isso é de se esperar, visto que o concreto precisa estar saturado com cloretos para que ocorra a difusão no estado estacionário.

- **Migração:** Segundo Ribeiro *et al.* (2014), a migração iônica é o processo de transporte que ocorre devido a diferença de potencial elétrico que permite o deslocamento de íons. Alguns dos ensaios mais utilizados para determinar a capacidade dos concretos em resistir à penetração de cloretos se baseiam em aplicar uma diferença de potencial entre as faces opostas do concreto de forma que os íons presentes de um lado tendem a migrar para o outro lado. No caso dos íons cloreto (Cl^-), que possuem carga negativa, a migração ocorre no sentido da carga positiva aplicada. Através de ensaios que se baseiam na migração de cloretos é possível obter de forma indireta os coeficientes de difusão abordados anteriormente. Isso se torna interessante devido ao fato de o processo

de migração ser mais rápido se comparado ao processo de difusão, o que torna a obtenção dos resultados muito mais rápida.

2.4.3 Ensaios de resistência à penetração de cloretos

Os ensaios mais utilizados para definir a resistência à penetração de cloretos em concretos se baseiam tanto no processo de difusão como no processo de migração. Os ensaios baseados no processo de difusão consistem basicamente em imergir corpos de prova de concreto em solução contendo cloretos. Após determinado período de tempo imersos é possível avaliar o comportamento dos corpos de prova em permitirem a difusão dos íons cloretos em seu interior. No caso dos ensaios baseados em migração, normalmente utiliza-se duas câmaras contendo soluções (uma delas contem Cl^-), que são separadas por um corpo de prova de concreto. Após a montagem do aparato aplica-se uma diferença de potencial entre as soluções, de forma que os cloretos tendem a migrar para a câmara oposta através do corpo de prova, o que torna possível avaliar o comportamento dos concretos em permitirem a migração dos íons. Uma das diferenças entre os ensaios que empregam difusão e os ensaios que empregam migração está na velocidade de execução do ensaio. Normalmente ensaios que empregam difusão duram 90 dias ou mais, como é o caso do ensaio preconizado pela norma nórdica NT Build 443-95. Já os ensaios que empregam migração, normalmente duram apenas horas, como é o caso do ensaio de migração preconizado pela ASTM C1202 (ASTM, 2012), que dura apenas 6h.

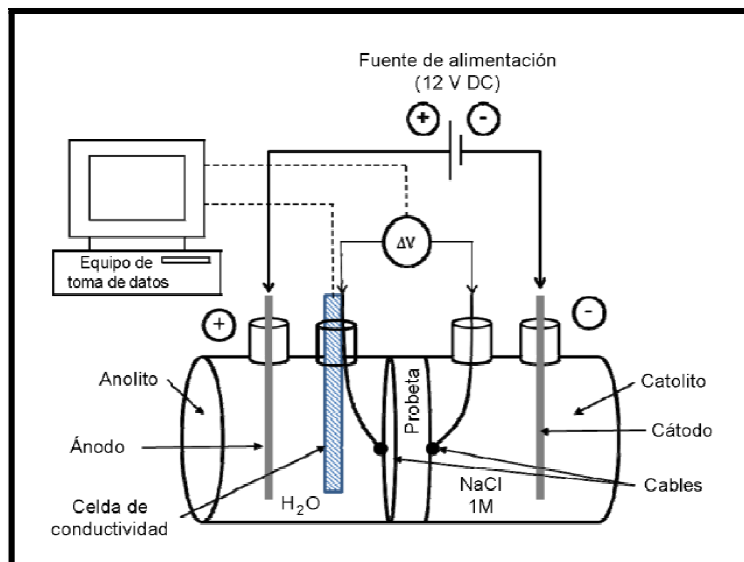
2.4.3.1 Ensaio acelerado de migração de cloretos – UNE 83987-14

A norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2014) – ***Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro em el hormigón endurecido*** estabelece um método de ensaio acelerado que torna possível a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto, tanto o coeficiente de difusão no estado estacionário como o não estacionário.

O ensaio consiste em colocar um corpo de prova de concreto entre duas soluções diferentes, uma contendo apenas água destilada e a outra contendo uma solução salina (58,42 g de NaCl por litro de água), como pode ser

observado na Figura 14. A UNE 83987 (UNE, 2014) determina que esse corpo de prova deve possuir espessura entre 2cm e 3cm e diâmetro mínimo de 7,5 cm.

Figura 14: Equipamento para ensaio de migração de cloretos



Fonte: UNE 83987 (UNE, 2014, p. 8).

No lado contendo a solução salina é colocado um eletrodo negativo (cátodo) e do lado contendo apenas água destilada é colocado o eletrodo positivo (ânodo). Feito isso, é aplicada uma diferença de potencial de 12 V entre as soluções, de forma que os íons cloreto se veem atraídos pela carga positiva e tendem a migrar, atravessando assim o corpo de prova.

Durante o ensaio, são feitas leituras periódicas da diferença de potencial entre as faces do corpo de prova e também da condutividade elétrica da solução do lado anódico. Tanto a leitura da tensão como a leitura da condutividade são necessárias para a determinação dos coeficientes de difusão.

Para cada leitura de condutividade é possível determinar a quantidade de cloretos presentes na solução (em mol). Essa conversão de condutividade para quantidade de cloretos é possível através da utilização da Equação 5.

$$\text{Cl}^- = 1 \cdot 10^{-3} \cdot (-1,71 + (11,45 \cdot C_{25})) \cdot V_a \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

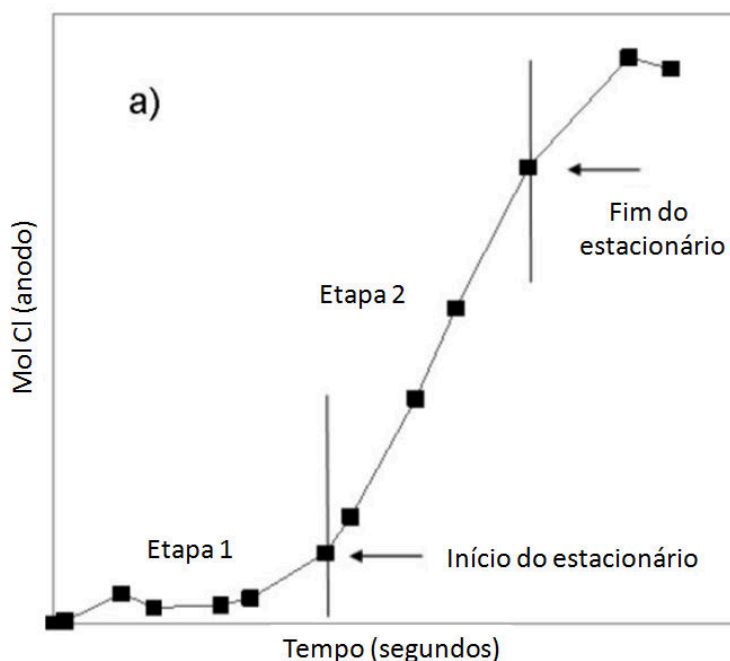
Cl^- é a quantidade de cloretos, em mol;

C_{25} é a condutividade elétrica obtida na temperatura de 25°C, em mS/cm

V_a é o volume da solução (no anodo), em l.

Após a conversão da condutividade em quantidade de Cl^- é possível construir uma curva que expressa a quantidade de cloretos versus tempo, cujo comportamento é semelhante ao apresentado na Figura 15.

Figura 15: Concentração de cloretos versus tempo



Fonte: Adaptado da norma UNE 83987 (UNE, 2014).

É possível observar na Figura 15 que no início, a taxa de aumento da condutividade é pequena, o que caracteriza o estado não estacionário (Etapa 1). Assim que termina essa primeira etapa, inicia-se o estado estacionário (Etapa 2), no qual há um aumento significativo da concentração de cloretos com o tempo. O estado estacionário tem fim quando essa taxa de variação (condutividade x tempo) volta a diminuir.

Para determinar os coeficientes de difusão torna-se necessário determinar com certa precisão os intervalos que compreendem a Etapa 1 e 2. Para isso, a norma UNE 83987 (UNE, 2014) recomenda primeiramente que seja feita uma regressão linear para o intervalo que compreende a Etapa 2, de forma que se obtenha uma regressão com boa representatividade. Para isso, deve-se analisar o coeficiente de determinação R^2 . Feita a regressão, obtêm-se uma

equação ($Y = Ax + B$), cujo coeficiente angular (A) será utilizado para a determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s), que é obtido a partir da Equação 6.

$$D_s = \frac{A.R.T.e}{z.S.F.Cl.\gamma.\Delta\phi} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,

D_s é o coeficiente de difusão no estado estacionário, em cm^2/s ;

A é o coeficiente angular da reta obtida na regressão no estado estacionário;

R é a constante dos gases perfeitos em cal/mol.K (1,9872);

T é a temperatura média do anodo em todo o ensaio em K ;

e é a espessura do corpo de prova em cm ;

z é a valência dos íons cloreto ($z=1$);

S é a área do corpo de prova exposta à solução de cloretos, em cm^2 ;

F é a constante de Faraday, em cal/Veq (23060);

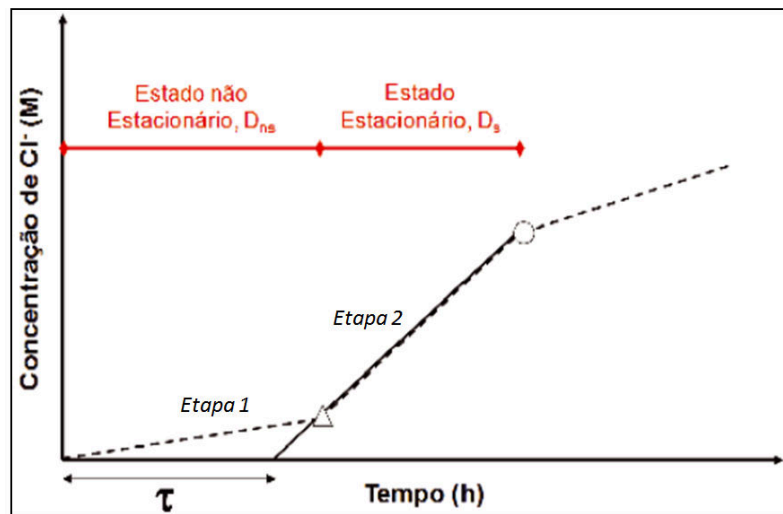
Cl é a concentração inicial de cloretos no catodo, em mol/cm^3 ;

γ é o coeficiente de atividade dos íons cloreto da solução catódica ($\gamma = 0,657$);

$\Delta\phi$ é a média das voltagens medidas durante o ensaio, em V .

Assim que se define o estado estacionário, basta prolongar a reta encontrada na regressão linear até que esta encontre o eixo da abscissa. Dessa forma, é determinado o período não estacionário, como pode ser visto na Figura 16. Este período é fundamental para se determinar o coeficiente de difusão no estado não estacionário. O D_{ns} é determinado a partir da Equação 7.

Figura 16: Determinação do intervalo não estacionário



Fonte: Adaptado de Ribeiro, Labrincha e Morelli (2012).

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \cdot t \cdot \varphi} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\varphi = \frac{z \cdot F \cdot \Delta \phi}{R \cdot T}$$

Onde,

e é a espessura do corpo de prova (cm);

t é o tempo em que transcorre o estado não estacionário (s);

$\Delta \phi = \frac{\Delta E}{e}$ é o campo elétrico normalizado em V/cm;

ΔE é a média das voltagens obtidas desde o início do ensaio até que se termina o estado não estacionário;

F é a constante de Faraday, em cal/Veq (23060);

R é a constante dos gases perfeitos em cal/mol.K (1,9872);

z é a valência dos íons cloreto ($z=1$);

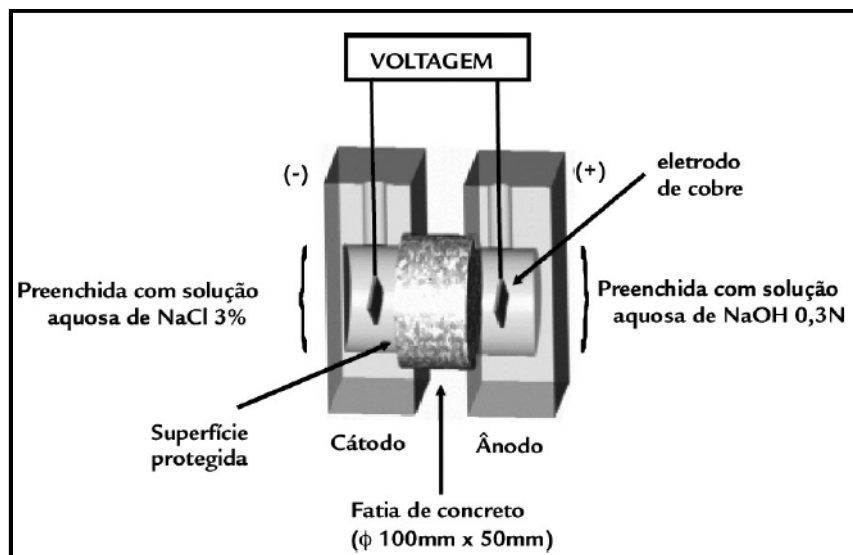
T é a temperatura média do anodo em todo o ensaio.

2.4.3.2 Ensaio acelerado de migração de cloretos - ASTM C1202-12

O ensaio consiste basicamente em avaliar a corrente passante em um corpo de prova com dimensões de 51 ± 1 mm. Para isso, uma das faces do corpo de prova é exposto a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) e a outra face a uma

solução de hidróxido de sódio (NaOH). Em cada solução é introduzida uma placa de cobre condutora. Essas placas são ligadas a uma fonte de 60V, que fornece a corrente necessária para execução do ensaio. Na Figura 17 pode ser visto o aparato.

Figura 17: Aparato para ensaio de migração de cloretos



Fonte: Medeiros (2013, p. 61).

A tensão de 60V é aplicada por um período de 6h, sendo necessário fazer a leitura da corrente passante através do corpo de prova a cada 30min. No final do ensaio, têm-se 12 leituras de corrente, que são utilizadas na Equação 8 para a determinação da carga total passante.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{Equação 8})$$

onde,

Q = carga passante (em Coulombs)

I_t = corrente medida em t minutos (em Amperes)

Após a determinação da carga total passante basta utilizar a Tabela 10 para definir de forma qualitativa a intensidade da penetração de cloretos no concreto.

Tabela 10: Classificação dos concretos de acordo com a carga passante

Carga Passante (Coulomb)	Permeabilidade aos íons cloretos
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Insignificante

Fonte: Adaptado da ASTM C1202 (ASTM, 2012).

2.4.3.3 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – NT BUILD 443-95

Os ensaios apresentados anteriormente se baseiam em processos de migração de cloretos, enquanto que no presente ensaio a penetração de cloretos ocorre por difusão. Esse ensaio é estabelecido pela norma nórdica NT BUILD 443-95 - ***Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration*** que fornece os procedimentos para determinação de parâmetros que estimam a resistência à penetração de cloretos em concretos. Essa norma se aplica a corpos de prova com diâmetro mínimo de 75 mm e comprimento mínimo de 100mm.

De acordo com a norma, após o período de cura o corpo de prova é retirado da água e recebe uma pintura impermeabilizante, deixando exposta apenas uma das faces, por onde os cloretos irão penetrar. Após a secagem da tinta o corpo de prova é imerso em solução com cal até que se encontre saturado – isso é muito importante, pois garante que os cloretos irão penetrar por difusão e não por absorção capilar. Finalizada a saturação, o corpo de prova é então imerso em solução salina contendo 165g de NaCl por litro de solução, ficando imerso até o fim do prazo previamente estabelecido pelo pesquisador.

Após o prazo de imersão deve-se proceder a coleta de material em pó de diferentes profundidades do corpo de prova. O método consiste em furar o corpo de prova com uma furadeira de forma que se obtenha material (pó) em 8 profundidades distintas, sendo que cada camada deve possuir no mínimo 1.0mm. Após a coleta de material de cada camada é possível determinar a concentração de cloretos em cada uma dessas camadas e a partir disso determinar o coeficiente de difusão dos íons cloreto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.

Este capítulo apresenta os principais ensaios utilizados nesta pesquisa, bem como o procedimento detalhado em relação à caracterização dos materiais, metodologia de obtenção do RBROTT, procedimentos de dosagem dos concretos, entre outros.

3.1 Planejamento dos experimentos

O planejamento dos experimentos tem por objetivo definir as variáveis que irão influenciar nos resultados dos ensaios. Para este trabalho serão consideradas três tipos distintos de variáveis, que são: variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis controle, como seguem:

3.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das oscilações das variáveis independentes, ou seja, são aquelas cujo resultado só é obtido de acordo com a realização de ensaios. Neste trabalho, as variáveis que podem ser classificadas como dependentes são:

- Resistência à compressão;
- Consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- Massa específica do concreto no estado fresco;
- Coeficiente de difusão;
- Carga total passante;
- Profundidade de penetração.

3.1.2 Variáveis independentes

São aquelas definidas na pesquisa, sendo introduzidas intencionalmente para verificar a relação entre suas variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes. Neste trabalho as variáveis independentes são:

- Percentual de adição do resíduo em relação à massa do cimento (0%, 5% e 10%);
- Relação água/cimento (0,4, 0,5 e 0,6);

- Idade para realização dos ensaios (apresentado de forma detalhada na Tabela 11).

3.1.3 Variáveis de controle

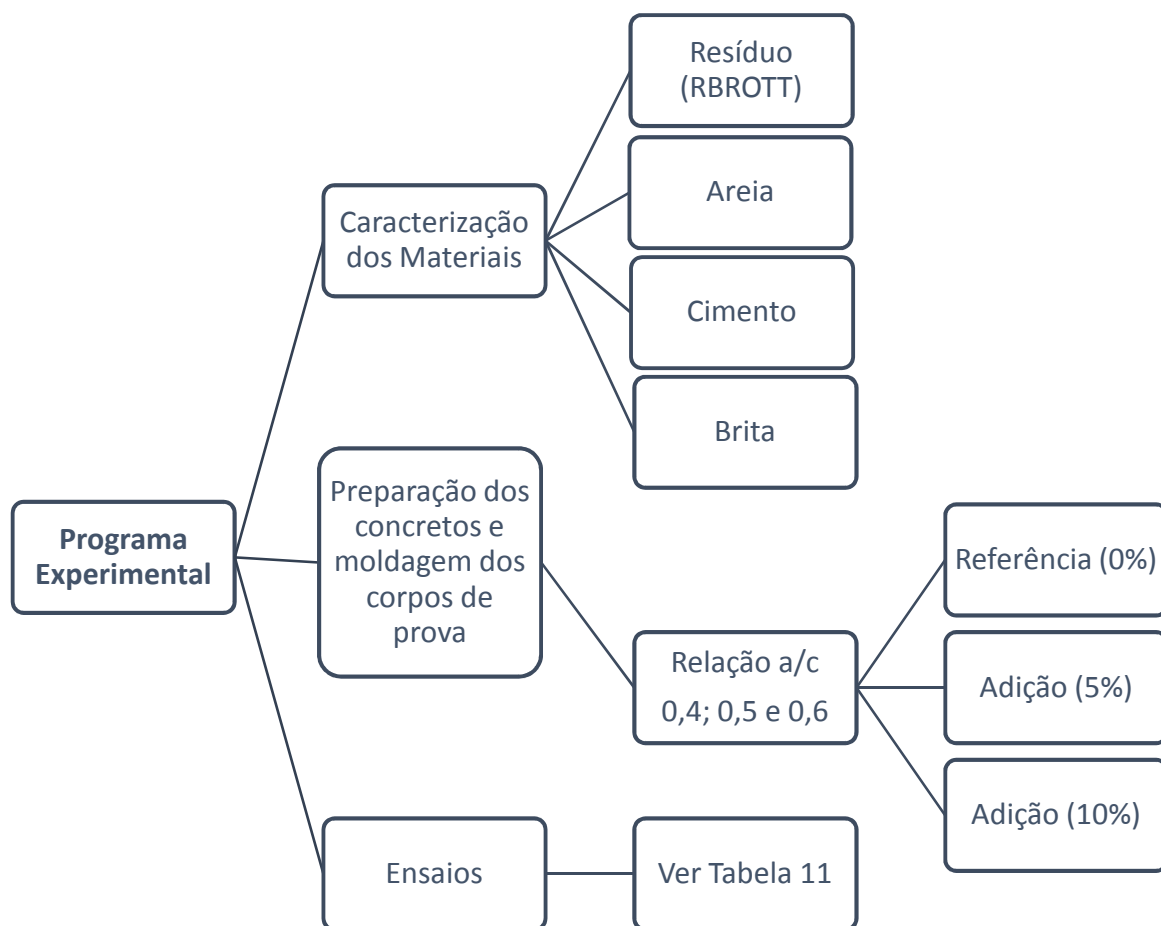
São as variáveis que não são objeto de estudo, mas que tem grande influência nas variáveis independentes e dependentes. Para o presente estudo, as variáveis de controle são:

- Características dos agregados constantes;
- Tipo de cimento (CP V – ARI);
- Procedimento de cura;
- Temperatura de tratamento térmico do resíduo (1200°C);
- Procedimento de moagem do resíduo.

3.2 Programa experimental

O programa experimental tem a função de determinar os ensaios a serem realizados em laboratório, assim como os materiais utilizados. Somente através desses ensaios foi possível obter os resultados necessários para comprovar a hipótese inicial de que o RBROTT melhora a resistência do concreto frente à ação de íons cloreto. O programa experimental foi dividido em três etapas, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Programa Experimental



Fonte: Acervo pessoal.

Foram estabelecidas três relações água/cimento, 0,4, 0,5 e 0,6 com o intuito de averiguar a influência do RBROTT sobre concretos com diferentes relações a/c.

Trabalhou-se com o RBROTT como adição em relação à massa de cimento devido à possibilidade do resíduo se transformar em uma pozolana após tratamento térmico. Fato que pode justificar seu uso como uma adição mineral com propriedades pozolânicas, conferindo manutenção ou melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto;

Preferiu-se trabalhar com adição do RBRO em vez de substituição, tomando como base o seguinte argumento:

“A substituição parcial do cimento Portland por pozolana deve ser cuidadosamente definida, tendo em vista que sua massa específica ($1,9$ a $2,4 \text{ g/cm}^3$) é bem mais baixa que a do cimento ($3,15 \text{ g/cm}^3$). Sendo assim, a substituição em massa resulta em um volume consideravelmente maior de material cimentício. Nos casos em que a exigência de resistência inicial for mantida e houver a necessidade de utilização de pozolanas, por exemplo, devido à reatividade de álcali-agregado, a adição de pozolana é preferível à substituição” (NEVILLE e BROOKS, 2013, p. 33).

Devido ao fato deste ser o primeiro estudo a trabalhar com aplicação do RBROTT em concretos, decidiu-se trabalhar com percentuais menores de adição, que foram de 5% e 10%, sendo estes valores comumente aceitos no meio técnico para melhorar algumas propriedades relacionadas com durabilidade de concretos.

Na Tabela 11 constam os ensaios realizados nos concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Tabela 11: Programa Experimental - Ensaios

Ensaios		Tipo de CP	Idade	Número de corpos de prova para cada relação a/c		
				0,4	0,5	0,6
Referência (0%)	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67: 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Massa específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28,56 e 91	15	15	15
	Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202-12)	10x20cm	28 e 91	2	2	2
	Determinação do coeficiente de Difusão (UNE 83987-14)	10x20cm	63	1	1	1
	Profundidade de penetração (NT Build/95)	10x20cm	28 e 91	6	6	6
Adição (5%)	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67: 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Massa específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28,56 e 91	15	15	15
	Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202-12)	10x20cm	28 e 91	2	2	2
	Determinação do coeficiente de Difusão (UNE 83987-14)	10x20cm	63	1	1	1
	Profundidade de penetração (NT Build/95)	10x20cm	28 e 91	6	6	6
Adição (10%)	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67: 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Massa específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28,56 e 91	15	15	15
	Ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202-12)	10x20cm	28 e 91	2	2	2
	Determinação do coeficiente de Difusão (UNE 83987-14)	10x20cm	63	1	1	1
	Profundidade de penetração (NT Build/95)	10x20cm	28 e 91	6	6	6
Total de CPs				216		

Fonte: Acervo pessoal.

3.3 Materiais

Os materiais utilizados para o preparo do concreto foram areia, brita, água, cimento e resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT).

3.3.1 Agregado miúdo

A areia utilizada foi areia branca, extraída de jazida. Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção Civil da UFES (LEMAC-UFES), seguindo as recomendações normativas brasileiras. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 12.

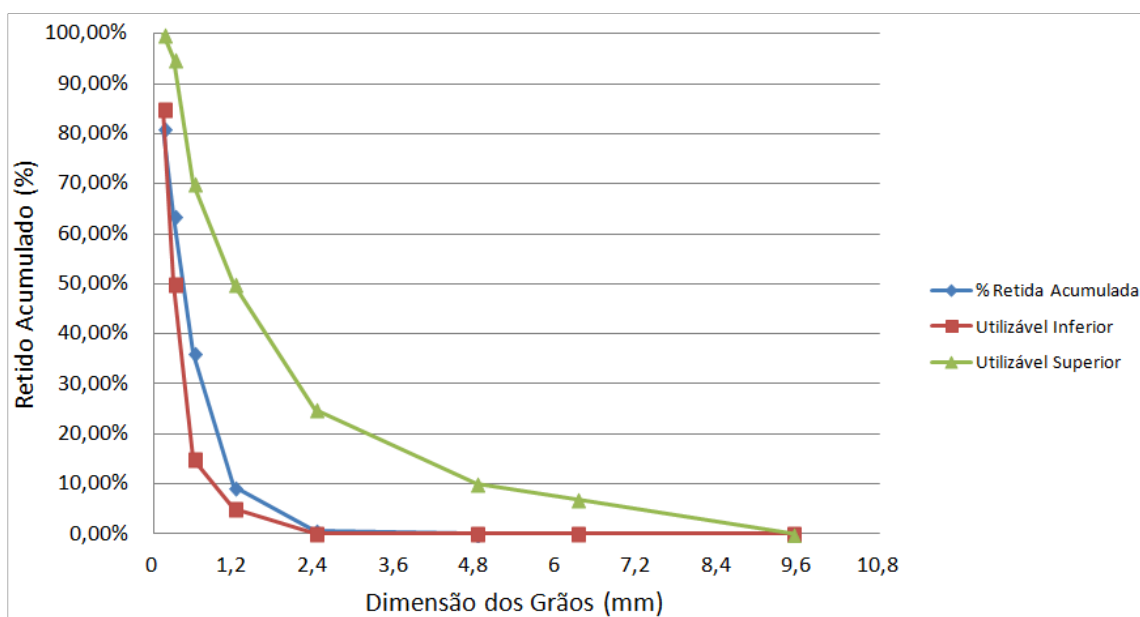
Tabela 12: Propriedades físicas do agregado miúdo

Propriedades	Normas	Resultados
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,92
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,4
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,57
Índice de Volume de Vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	34,63
Matéria Orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Clara
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	6,39
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,11

Fonte: Acervo pessoal.

A distribuição granulométrica pode ser vista na Figura 19. Essa areia se enquadrou dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificações.

Figura 19: Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Acervo pessoal.

3.3.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1, proveniente da britagem de rochas naturais, atendendo as características da norma NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificações. A brita foi lavada e seca ao ar antes de ser utilizada. Na Tabela 13 podem ser observadas as características físicas desse agregado.

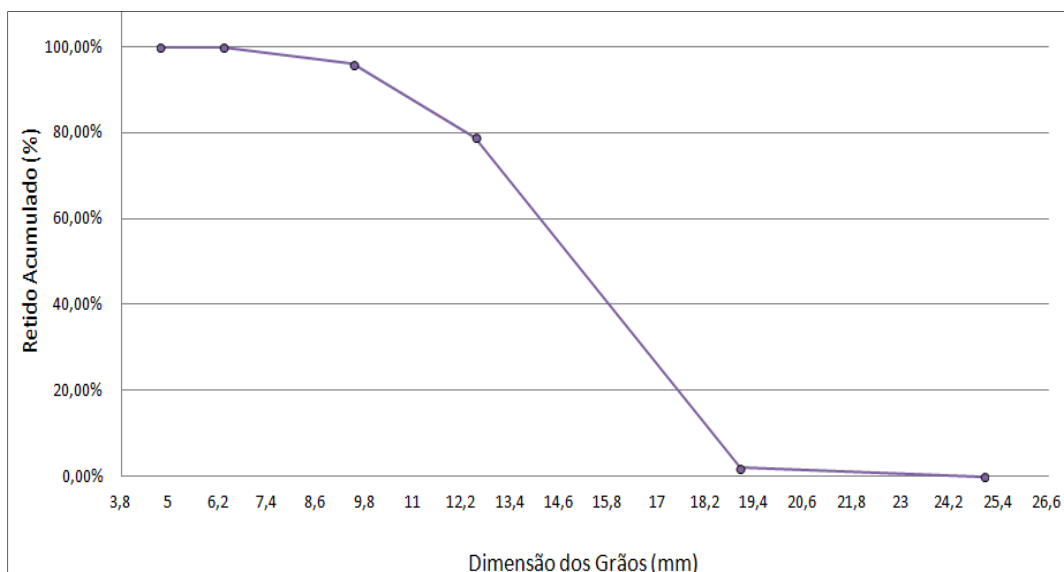
Tabela 13: Ensaios a serem realizados no agregado graúdo

Propriedades	Normas	Resultados
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,98
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,77
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,73
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,45

Fonte: Acervo pessoal.

A distribuição granulométrica da brita pode ser vista na Figura 20.

Figura 20: Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Acervo pessoal.

3.3.3 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária de serviço local (CESAN).

3.3.4 Cimento

Para a determinação do Índice de atividade pozolânica com cimento (IAP-Cimento) foi utilizado o CP II-F-32, que é uma recomendação da NBR 5752 (ABNT, 2014), cuja embalagem pode ser vista na Figura 21a.

Para a confecção dos concretos foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) que pode ser visto na Figura 21b.

A escolha desse cimento se deve ao fato de possuir a menor quantidade de adições se comparado aos demais cimentos do mercado, possibilitando uma melhor avaliação do efeito da adição sobre suas propriedades.

Figura 21 – Cimentos utilizados na pesquisa (a) determinação do IAP (b) confecção dos concretos



Fonte: Acervo pessoal.

A caracterização física e química do cimento CPV-ARI foi realizada pela cimenteira Lafarge/Holcim e pode ser observada na Tabela 14. No LEMAC foi realizado apenas o ensaio para determinar a massa específica.

Tabela 14: Caracterização do cimento CPV-ARI.

(continua)

Propriedades		Resultado	Método de ensaio	Limites NBR 5733
Massa específica (g/cm ³)		3,09	NBR NM 23	N.E.
Finura	Material retido na peneira #400 (%)	2,2	Controle Holcim	N.E.
	Área específica Blaine -(cm ² /g)	4751	NBR NM 76	≥ 3000
Tempo de pega	Início de pega (min)	135	NBR NM 65	≥ 60
	Fim de pega (min)	190	NBR NM 65	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	28,4	NBR 7215	≥ 14
	3 dias (MPa)	41,2	NBR 7215	≥ 24
	7 dias (MPa)	46,4	NBR 7215	≥ 34
Composição Química	PF 1000°C	3,39	NBR NM 18	≤ 4,5
	SiO ₂	19,42	NBR 14656	N.E.
	R.I.	0,92	NBR NM 15	≤ 1
	Al ₂ O ₃	4,87	NBR 14656	N.E.
	Fe ₂ O ₃	2,93	NBR 14656	N.E.
	CaO	63,69	NBR 14656	N.E.
	MgO	0,86	NBR 14656	N.E.
	SO ₃	3,02	NBR 14656	≤ 4,5

(continua)

(conclusão)

Propriedades		Resultado	Método de ensaio	Limites NBR 5733
Composição Química	CO ₂	2,49	NBR NM 20	≤ 3,5
	K ₂ O	0,8	NBR 14656	N.E.
	PF 500°C	0,78	Controle Holcim	N.E.
	C ₃ A (Teórico)	7,74	Equação de Bogue	N.E.

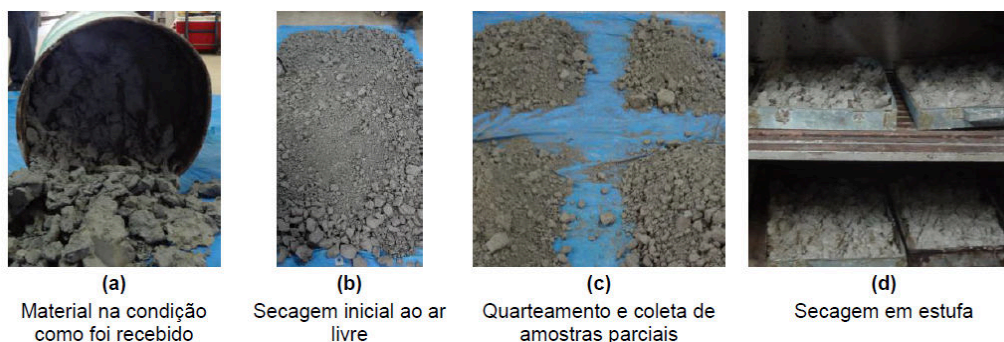
Fonte: Cortesia Lafarge/Holcim.

3.3.5 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

Anteriormente neste trabalho viu-se que os resíduos originados do beneficiamento de rochas ornamentais são classificados como dois tipos, o RBRO G e o RBRO D. No presente estudo, foi utilizado apenas o RBRO D, pois este apresentou melhor resultado de atividade pozolânica quando ensaiado por Uliana (2014) sendo possível observar na Tabela 9 os valores obtidos. Além disso, como foi visto anteriormente, os teares tradicionais estão sendo substituídos por teares multifios, o que serve de justificativa para analisar somente o resíduo gerado a partir desses teares.

O resíduo utilizado nessa pesquisa pertence ao mesmo lote utilizado no trabalho de Uliana (2014). O RBRO é proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais de uma marmoraria localizada no município de Serra, Espírito Santo. Esta empresa desdobra em chapas, blocos de mármore, granito e outras rochas, provenientes do interior do Estado e de outros Estados do Brasil. Uliana (2014) realizou a secagem do resíduo, que ocorreu em duas etapas, como é possível observar na Figura 22, inicialmente ao ar livre por 48 horas e em seguida por 24 horas em estufa a 100°C.

Figura 22: Processo de secagem do RBRO



Fonte: Uliana (2014, p. 101).

A caracterização do resíduo antes do tratamento térmico pode ser observada na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização dos resíduos RBRO G e RBRO D

Propriedades		RBRO G	RBRO D
Massa específica (g/cm ³)		2,48	2,525
Massa unitária (g/cm ³)		814,85	766,28
Finura	Área específica - Blaine (m ² /Kg)	7277,8	6179,3
	Material retido na peneira 200 (%)	8,56	3,08
	Material retido na peneira 325 (%)	18,1	7
Composição Química (%)	Perda ao fogo - PF (%)	0,69	3,5
	SiO ₂	63,75	66,8
	Al ₂ O ₃	14,55	13,5
	Fe ₂ O ₃	7,57	3,79
	CaO	3,72	3,44
	MgO	0,31	0,93
	K ₂ O	5,01	3,83
	Na ₂ O	3,58	3,5
	C	0,39	1,11
	TiO ₂	0,22	0,16
	SO ₃	0,06	0,06
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	85,87	85,08

Fonte: Adaptado de Uliana (2014).

3.4 Métodos

3.4.1 Produção do RBROTT

Após o processo de homogeneização, o resíduo foi tratado termicamente na mufla (Figura 23) a uma temperatura de 1200°C. Essa temperatura foi definida a partir do trabalho de Uliana (2014), pois dentre as temperaturas aplicadas essa foi a que apresentou os melhores resultados em relação à atividade pozolânica.

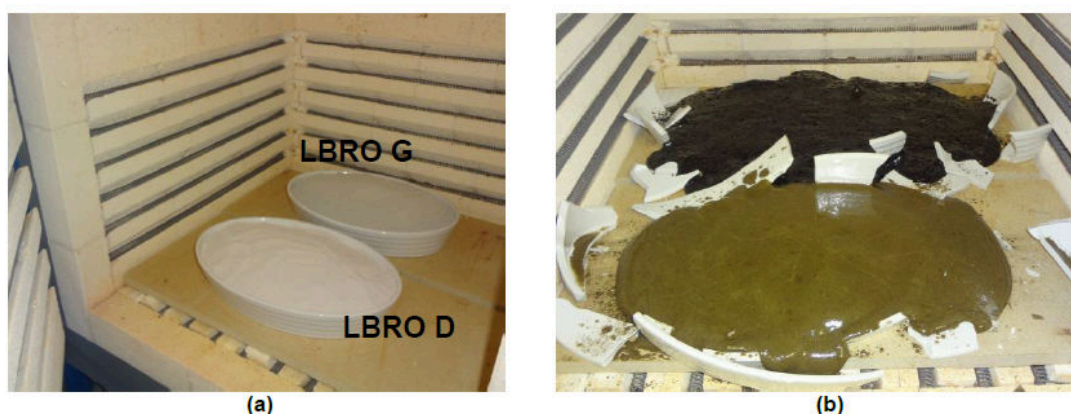
Figura 23: Forno tipo mufla



Fonte: Acervo pessoal.

Nos trabalhos desenvolvidos por Uliana (2014) e Vazzoler (2015), o resíduo foi tratado termicamente em um recipiente cerâmico (Figura 24a) que, após o tratamento térmico, trincava e se fundia ao resíduo (Figura 24b), sendo necessário separá-los posteriormente. Esse processo era viável somente para a produção de resíduo em poucas quantidades, geralmente utilizado na confecção de pastas e argamassas.

Figura 24: Resíduo tratado termicamente em recipiente cerâmico, (a) início e (b) final

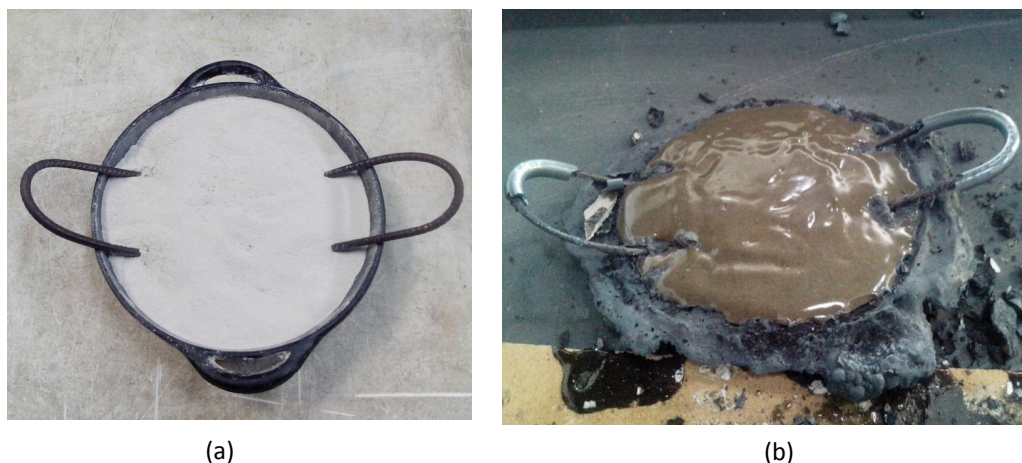


Fonte: Uliana (2014, p. 125).

Para a confecção dos concretos e caracterização do resíduo, a quantidade total necessária era de aproximadamente 10 kg, o que tornou inviável utilizar recipientes cerâmicos. Com isso, optou-se pelo desenvolvimento de outro método, que foi utilizar um recipiente de ferro fundido. Segundo o fabricante o

recipiente suportaria uma temperatura de até 1400°C. Para facilitar a retirada do resíduo do recipiente foram colocadas hastes dentro do resíduo, como pode ser visto na Figura 25a. Porém, essa tentativa inicial de tratar o resíduo em um recipiente metálico não foi bem sucedida. O recipiente se fundiu em 1200°C, contaminando o resíduo. O resultado pode ser visto na Figura 25b.

Figura 25: Recipiente contendo o resíduo (a) antes do tratamento térmico (b) depois do tratamento



Fonte: Acervo pessoal.

Através de pesquisas descobriu-se que o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) era capaz de suportar a temperatura de 1200°C. Segundo John e Cincotto (2007), na temperatura de 1200°C o gesso se apresenta na forma de anidrita I (CaSO_4) e somente acima de 1350°C ocorre a fusão. Com isso, decidiu-se confeccionar um recipiente de gesso, que pode ser visto na Figura 26a contendo o RBRO. Após o processo de queima, foi observado que o recipiente de gesso conseguiu conter o resíduo fundido (ver Figura 26b), mostrando ser a alternativa mais viável até o momento para produção do RBROTT em laboratório.

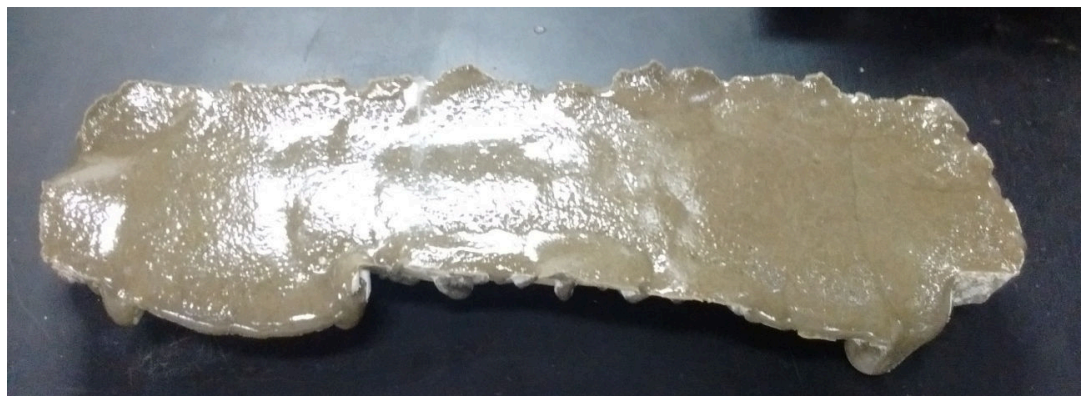
Figura 26: Recipiente de gesso com o resíduo (a) antes do tratamento térmico (b) depois do tratamento



Fonte: Acervo pessoal.

Após ser retirado do forno, o gesso permaneceu aderido à superfície do resíduo, sendo facilmente removido com uma escova de aço e água. Na Figura 27 observa-se o resíduo após o tratamento térmico, pronto para ser moído.

Figura 27: Resíduo após o tratamento térmico



Fonte: Acervo pessoal.

Em relação ao processo de moagem, inicialmente utilizou-se um triturador de mandíbulas para reduzir as dimensões do resíduo. Feito isso, empregou-se um moinho de argolas (Figura 28a) para converter os grãos à granulometria adequada para que fosse considerado uma pozolana. O processo de moagem consistiu em colocar 50g de cada vez no moinho de argolas e proceder a moagem por 2 minutos e 40 segundos. Esse tempo de moagem foi determinado a partir da finura na peneira de malha 325. Na Figura 28b pode ser visto o RBROTT após a moagem.

Figura 28: Processo de moagem (a) moinho de argolas (b) RBROTT após a moagem

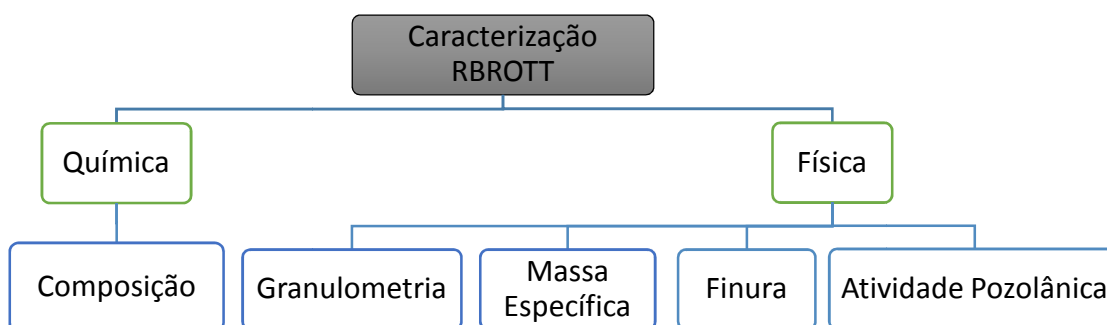


Fonte: Acervo pessoal.

Após a moagem o resíduo foi homogeneizado e ensacado para posteriormente ser utilizado na confecção de concretos.

Para avaliar as características do RBROTT foram feitos ensaios de caracterização do mesmo, de acordo com o diagrama da Figura 29

Figura 29: Caracterização do RBROTT



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.2 Caracterização do RBROTT

3.4.2.1 Caracterização química

A caracterização química do RBROTT foi realizada em parceria com o laboratório do Centro de Tecnologias do gás e energias renováveis-LTG-ER situado no Rio Grande do Norte. O RBROTT foi analisado pela técnica de Fluorescência de Raios-X utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados. Para a avaliação através do método de perda ao fogo, o

material primeiramente foi seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, posteriormente o mesmo material foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

3.4.2.2 Composição granulométrica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES - Campus Vitória. Para determinar a composição granulométrica utilizou-se um granulômetro a laser da Marca Malvern modelo Mastersizer Hydro 2000MU. O equipamento pode ser visto na Figura 30.

Figura 30: Aparelho para ensaio de granulometria a laser



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.2.3 Massa específica

Para determinar a massa específica do RBROTT seguiu-se os procedimentos recomendados pela norma NBR NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica. Inicialmente encheu-se o frasco com Xileno até a marca zero do recipiente. Em seguida pesou-se a massa de RBROTT e adicionou-se essa massa ao frasco, que proporcionou o aumento de volume do líquido (esse volume é exatamente o volume do RBROTT adicionado). O resultado é a divisão da massa (g) pela variação do volume (cm^3), cujo resultado é a massa específica (g/cm^3). Aqui está descrito o ensaio de forma genérica, pois o procedimento envolve diversas etapas como, por exemplo, o banho para regular a temperatura do frasco, entre outros. Na Figura 31 pode ser visto o ensaio em andamento.

Figura 31: Ensaio de massa específica do RBROTT



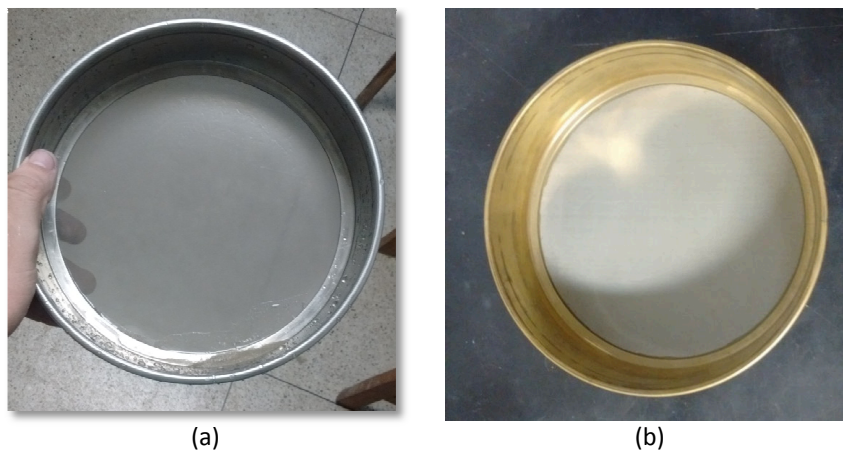
Fonte: Acervo pessoal.

3.4.2.4 Finura

Para determinar a finura por meio da peneira de malha 325 seguiram-se as recomendações da NBR 15894-3 (ABNT, 2010) - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Determinação da Finura por Meio da Peneira 45 μ m. A peneira utilizada pode ser vista na Figura 32b.

A finura do RBROTT por meio da peneira de malha 200 foi determinada a partir da NBR 11579 (ABNT 2013) - Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200). Essa norma recomenda que o procedimento seja feito via seca, pois é específico para cimento Portland, que tende a reagir com água. Porém, ao realizar o ensaio com o RBROTT percebeu-se a formação de grumos que impediam a passagem do material na abertura da malha, então optou-se por fazer o ensaio via úmida. O material retido na peneira pode ser visto na Figura 32a. O material retido foi seco em estufa na temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ para então ser determinada a porcentagem retida.

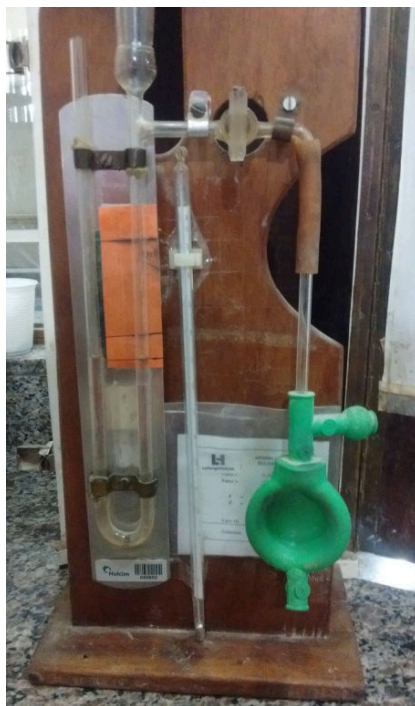
Figura 32: Ensaio finura (a) Peneira #200. (b) Peneira #325



Fonte: Acervo pessoal.

A finura pelo método de Blaine foi realizada por técnicos do controle de qualidade da cimenteira Lafarge/Holcim, seguindo as recomendações da NBR 16.372 (ABNT, 2015), sendo utilizado o equipamento apresentado na Figura 33. Para efeito comparativo, além da finura do RBROTT também se determinou a finura do RBRO antes do tratamento térmico.

Figura 33: Equipamento utilizado para determinação da finura pelo método de Blaine



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.3 Caracterização quanto à atividade pozolânica

Sabe-se que o resíduo antes de ser tratado termicamente é considerado um material inerte e que ao ser utilizado na produção de concretos atuará como fíler. Porém, após o tratamento térmico, espera-se que ele deixe de ser um material cristalino e converta-se em um material amorfo e que após um processo de moagem adquira propriedades pozolânicas.

Para determinar a atividade pozolânica do resíduo tratado termicamente, foram realizados os seguintes ensaios:

3.4.3.1 Ensaio pelo Método de Luxán

Inicialmente foi realizado o ensaio pelo Método de Luxán, desenvolvido por Luxán, Madruga e Saavreda (1989). Na Figura 34 pode ser observado o ensaio em andamento.

Figura 34: Ensaio de pozolanicidade pelo método de Luxán



Fonte: Acervo pessoal.

A principal vantagem desse ensaio é sua rapidez, pois consiste em produzir uma solução de 200ml saturada com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e medir a condutividade dessa solução na temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$. Após a primeira leitura adiciona-se 5g de material pozolânico, aguarda-se o período de 120s e faz-se a segunda leitura, também a $40 \pm 1^\circ\text{C}$. Segundo Rodrigues (2004), a

variação de condutividade em que o ensaio se baseia ocorre devido à reação da pozolana com os íons Ca^+ e $(\text{OH})^-$, ou seja, a pozolana reduz a quantidade de íons livres na solução e consequentemente reduz a condutividade da mesma. A partir dessa diferença de condutividade é possível classificar o material segundo sua pozolanicidade de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade

Classificação do Material	Variação da condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	Menor que 0,4
Pozolanicidade variável	entre 0,4 e 1,2
Boa pozolanicidade	maior que 1,2

Fonte: Adaptado de Luxán, Madruga e Saavreda (1989).

Para efeito comparativo, além de realizar o ensaio no RBROTT também realizou-se o ensaio com RBRO sem tratamento térmico e com metacaulim. Decidiu-se realizar o ensaio também com o metacaulim devido ao fato de ser uma pozolana já conhecida, servindo assim como referência.

3.4.3.2 Atividade Pozolânica com Cal

Este ensaio é preconizado pela NBR 5751 (ABNT, 2015) – Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. O ensaio consiste em confeccionar uma argamassa composta por hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), areia normal e material pozolânico, que no presente estudo é o RBROTT. Seguindo as recomendações da norma, confeccionou-se um traço contendo 104g de hidróxido de cálcio, 936g de areia normal e 227,92 de RBROTT. Para definir a quantidade de água a norma recomenda que seja adicionada a quantidade que permita obter o índice de consistência de 225 ± 5 mm – ensaio prescrito pela norma NBR 7215 (ABNT, 1997). Para obter esse abatimento utilizou-se a quantidade de 190,77g de água. O ensaio de índice de consistência pode ser visto na Figura 35.

Figura 35: Ensaio de índice de consistência



Fonte: Acervo pessoal.

Após a confecção da argamassa moldou-se três corpos de prova cilíndricos de 5x10cm. Passados 24h após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em estufa a 55 °C, permanecendo nesta temperatura por 6 dias, conforme recomenda a norma NBR 5751 (ABNT, 2015). Em seguida os corpos de prova foram desenformados e retificados, podendo ser vistos na Figura 36.

Figura 36: Corpos de prova para determinação do IAP-CAL



Fonte: Acervo pessoal.

Após terem sido retificados, os corpos de prova foram rompidos por compressão axial. A norma NBR 12653 (ABNT, 2015) - Materiais Pozolânicos – Requisitos recomenda que o resultado da média das resistências à

compressão axial dos 3 corpos de prova sejam superiores a 6 MPa, critério esse que serve para avaliar a atividade pozolânica do material em estudo.

3.4.3.3 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (IAP-CIMENTO)

Este ensaio é preconizado pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014) – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O ensaio consiste em confeccionar duas argamassas distintas, que são designadas por argamassas A e B. A argamassa A é uma argamassa de referência, contendo Cimento CP II-F-32, areia normal e água. Já argamassa B é composta por Cimento CP II-F-32, pozolana, areia normal e água. Na Tabela 17 pode ser visto o traço de cada argamassa.

Tabela 17: Composição das argamassas

Material	Argamassa A	Argamassa B
CP II-F-32	624±0,4 g	468±0,4 g
Pozolana	-	156±0,2g
Areia Normal	1872 (4 frações de 468g)	1872 (4 frações de 468g)
Água	300±0,2g	300±0,2g

Fonte: NBR 5752 (ABNT, 2014).

A NBR 5752 (ABNT, 2014) sofreu alterações significativas se comparadas às versões anteriores. Na NBR 5752 (ABNT, 1992) o parâmetro para definir o consumo de água das argamassas A e B era o abatimento, fixado em 225±5 mm. Com isso, além da adição pozolânica surgia uma nova variável, que era o consumo de água. Tal procedimento interfere na análise dos resultados, pois havia dúvida se a mudança no comportamento das argamassas se devia à adição pozolânica ou era devido ao consumo de água distinto entre as argamassas. Já na última versão, a NBR 5752 (ABNT, 2014) o abatimento não é fixado e sim o consumo de água para ambas as argamassas, como pode ser visto na Tabela 17. Com isso, a única diferença é a presença de material pozolânico em substituição parcial ao cimento.

Para avaliar o desempenho do RBROTT foram moldados 6 corpos de prova de cada argamassa e após 28 dias foram rompidos por compressão axial. Os corpos de prova de 5x10 cm podem ser vistos na Figura 37.

Figura 37: Corpos de prova de argamassa para avaliação do IAP



Fonte: Acervo pessoal.

A avaliação do desempenho da pozolana é estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015) - Materiais Pozolânicos – Requisitos. Segundo essa norma, o índice de desempenho obtido segundo a Equação 9 deve ser de no mínimo 90%.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde,

I_{cimento} é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado é expresso em porcentagem;

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), expressa em megapascals (MPa);

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), expressa em megapascals (MPa).

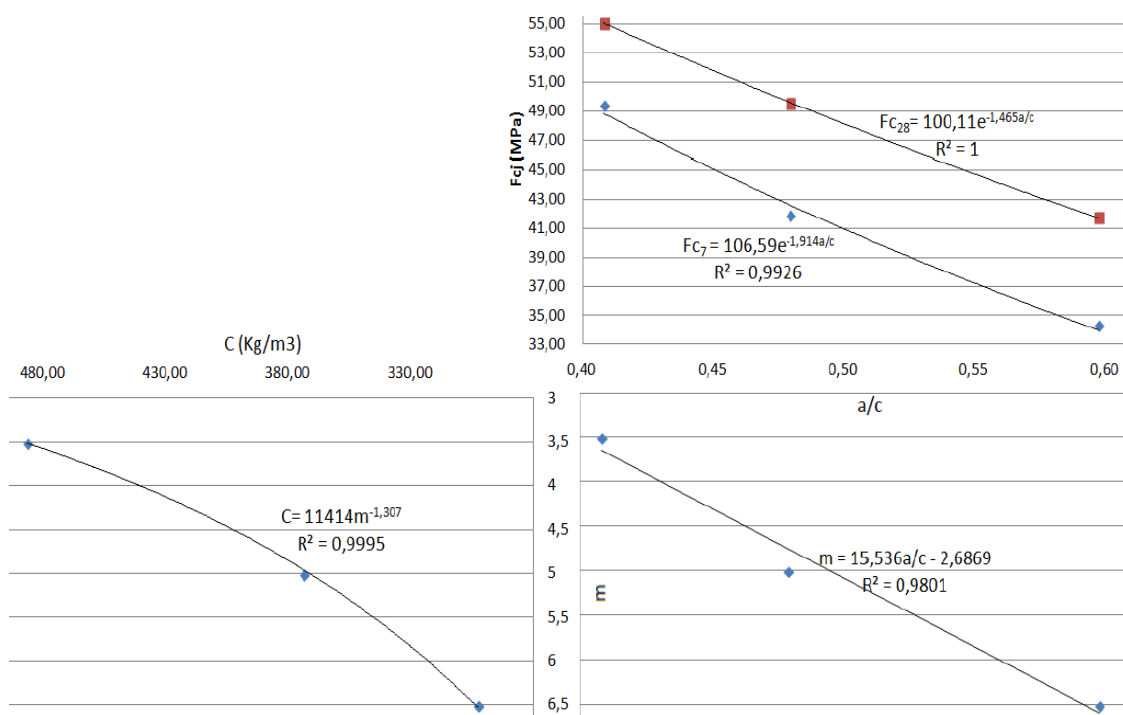
3.4.4 Método de dosagem dos concretos

Para determinar os traços dos concretos utilizados neste estudo, foi aplicado o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Esse método relaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento em um diagrama de dosagem que segue três leis de comportamento, que são a Lei de Abrans, Lei de Lyse e Lei de Molinari. Para a elaboração do diagrama apresentado na Figura 38 é necessário realizar uma dosagem experimental que constitui em fixar um abatimento para o concreto e fixar também o teor de argamassa, que é a relação entre a massa da argamassa seca (cimento e areia) e a massa total de material seco aplicado ao concreto (cimento, areia e

brita). O que irá variar nos traços experimentais é o consumo de agregados, consumo de cimento e a relação a/c.

Para a execução dos traços experimentais, o abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm e o teor de argamassa em 51%. A partir disso, três traços com diferentes relações água/cimento foram elaborados. Essas relações a/c são encontradas a partir do abatimento pré-fixado, no qual se adiciona água aos traços até o momento em que o abatimento requerido é encontrado. No presente estudo, as relações a/c encontradas foram de 0,41, 0,48 e 0,60. Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm para a determinação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias. O resultado final é o diagrama apresentado na Figura 38.

Figura 38: Diagrama de dosagem obtido a partir do método IPT/USP



Fonte: Acervo pessoal.

A partir desse diagrama, definiu-se os 9 traços que foram utilizados para avaliar a influência da adição do RBROTT no concreto. Para esses traços, definiu-se três relações a/c (0,4, 0,5 e 0,6) e três teores de adição do resíduo (0%, 5% e 10%), que podem ser vistos na Tabela 18.

Tabela 18: Traço unitário dos concretos

Relação a/c	Teor de adição (%)	Cimento	Resíduo	Areia	Brita	Consumo de Cimento (Kg/m ³)
0,4	0%	1	-	1,31	2,22	499,20
0,5			-	2,10	2,98	373,56
0,6			-	2,89	3,74	296,03
0,4	5%	1	0,05	1,31	2,22	488,27
0,5			0,05	2,10	2,98	370,41
0,6			0,05	2,89	3,74	294,09
0,4	10%	1	0,1	1,31	2,22	488,11
0,5			0,1	2,10	2,98	364,79
0,6			0,1	2,89	3,74	292,82

Fonte: Acervo pessoal.

3.4.5 Determinação da massa específica no estado fresco

Esse ensaio é regulamentado pela norma NBR 9833 (ABNT, 2009) sendo fundamentado em um princípio básico, que consiste em encher com concreto uma fôrma metálica de massa e volume conhecidos e pesar esse recipiente. Com esses dados em mãos, basta aplicar a Equação 10.

$$\gamma_c = \frac{M_{forma+concreto} - M_{forma}}{V_{forma}} \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

$M_{forma+concreto}$: Massa da forma preenchida com concreto;

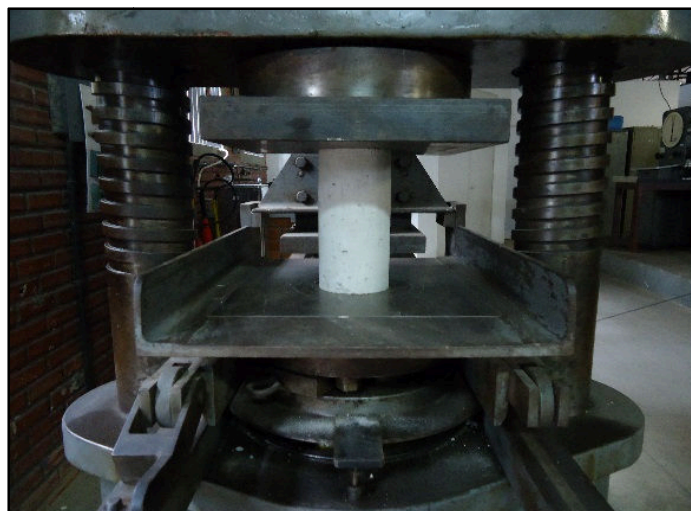
M_{forma} : Massa da forma vazia;

V_{forma} : Volume da forma.

3.4.6 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada uma das 9 misturas de concreto, foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos com dimensão de 10x20cm, obtendo-se um total de 135 CPs. Os corpos de prova foram curados imersos em uma solução saturada com cal até a idade de ruptura, no qual foram ensaiados 5 corpos de prova em cada uma das três idades (28, 56 e 91 dias). Todos foram retificados e posteriormente rompidos por compressão axial na máquina Amsler do LEMAC, que pode ser vista na Figura 39.

Figura 39: Corpo-de-prova em ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.7 Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987-14

A norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2014) estabelece um método de ensaio que permite a obtenção do coeficiente de difusão de cloretos no concreto. O ensaio consistiu em cortar fatias com espessura de 20 mm, obtido a partir de um corpo de prova de 10x20 cm (a extração foi feita no terço médio). Para cada um dos 9 traços, foram utilizados 2 corpos de prova de 20 mm, que podem ser vistos na Figura 40.

Figura 40: Corpos de prova para ensaio de migração de cloretos – UNE 83987 (UNE, 2014)



Fonte: Acervo pessoal.

Após o processo de corte, a lateral dos corpos de prova foi pintada com tinta epóxi, sendo posteriormente imersos em água até o momento em que a massa permaneceu constante. Esse procedimento para saturação é recomendado pela UNE 83987 (UNE, 2014) para corpos de prova que foram curados imersos em solução com cal. Para corpos de prova curados em câmara úmida, deve-se saturá-los à vácuo.

Para obtenção do coeficiente de difusão, é necessário a utilização de um aparato que permita expor uma das faces do corpo de prova a uma solução contendo cloreto de sódio (58,42g de NaCl por litro de água) e a outra face exposta apenas a água deionizada. Para reproduzir o aparato descrito pela norma, foram utilizados tubos de PVC com diâmetro interno de 100 mm. Os tubos atenderam perfeitamente às necessidades do ensaio, principalmente em relação à estanqueidade.

Para a fixação do corpo de prova no tubo foi utilizado silicone. Após a fixação, foi realizado um teste de estanqueidade para garantir que as duas câmaras ficassem perfeitamente isoladas, de forma que os cloretos passariam somente através do concreto. O teste de estanqueidade pode ser visto na Figura 41.

Figura 41: Teste de estanqueidade



Fonte: Acervo pessoal.

Após o teste, instalou-se a outra câmara. Ambas as câmaras foram preenchidas com água deionizada por 24h para garantir que os CPs estariam saturados quando o ensaio tivesse início. Após esse período, removeu-se a água, sendo que em uma câmara foi colocado a solução de NaCl e na outra água deionizada .

Esse ensaio é considerado acelerado, de forma que os cloretos penetram por migração. Para que ocorresse a migração, foi utilizada uma fonte que proporcionou uma tensão de 12 V. Para acelerar a passagem dos cloretos, na câmara que possui apenas água destilada, foi introduzida uma barra de aço carbono, com carga positiva (anodo) e na câmara com solução salina foi introduzida a barra com carga negativa (catodo). O aparato pode ser visto na Figura 42.

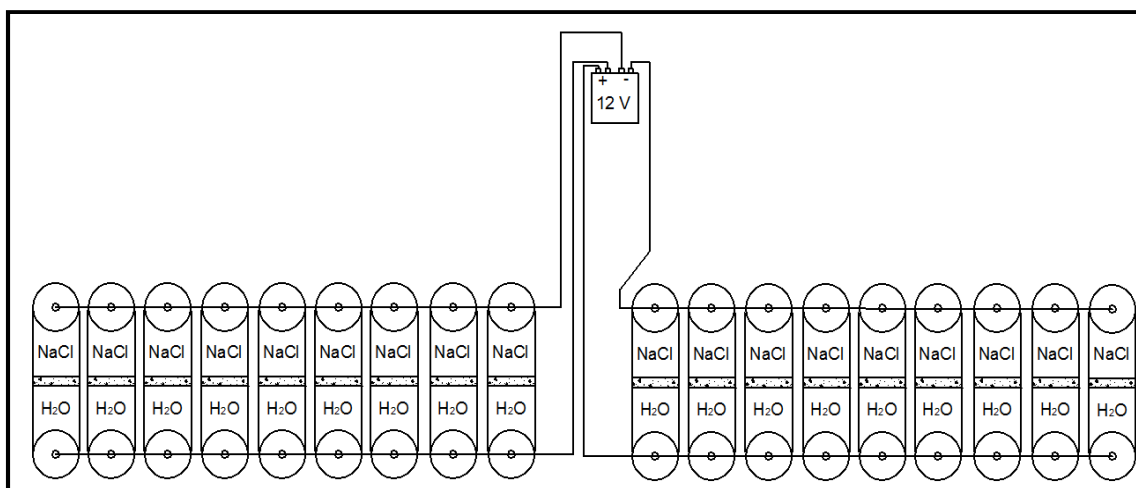
Figura 42: Ensaio em andamento – UNE 83987-14



Fonte: Acervo pessoal.

Para melhor entendimento, na Figura 43 pode ser visto o diagrama do circuito montado, exatamente da forma como o ensaio foi realizado.

Figura 43: Diagrama do ensaio de migração segundo a UNE 83987 (UNE, 2014)



Fonte: Acervo pessoal.

Após a montagem do aparato, foram feitas leituras periódicas, obtendo-se a condutividade da câmara com água deionizada (essa condutividade foi convertida em quantidade de NaCl, em mol). O condutímetro utilizado pode ser visto na Figura 42.

Além da leitura da condutividade, também foram feitas leituras com um multímetro, que permitiram determinar a diferença de potencial entre as faces do corpo de prova (Figura 44). Essa leitura torna-se necessária pois a determinação do coeficiente de difusão depende tanto da quantidade de cloretos passante como da tensão que tornou possível sua migração.

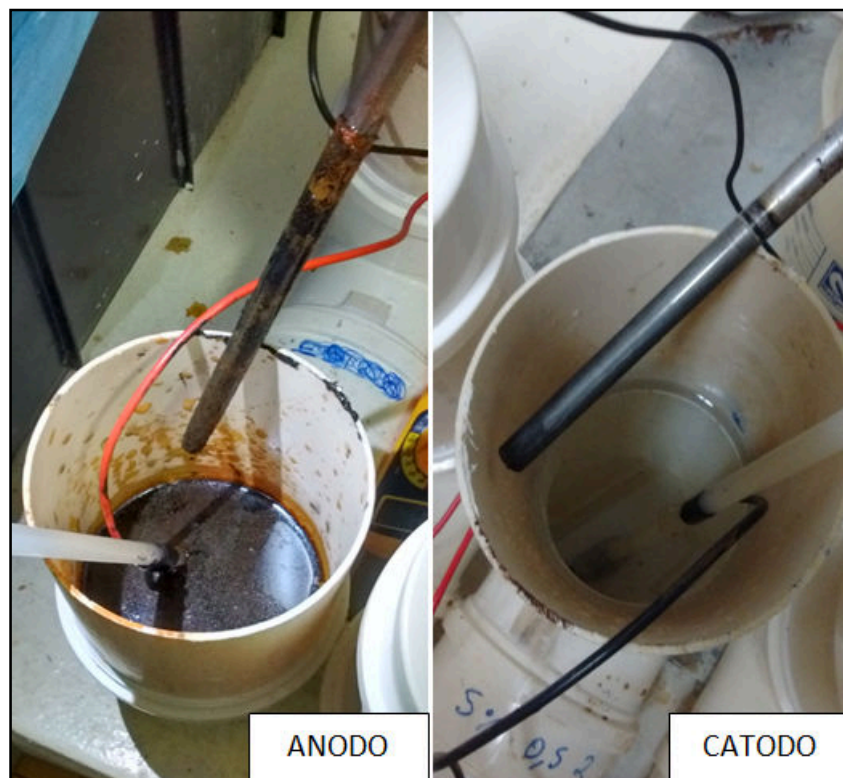
Figura 44: Procedimento para leitura da tensão



Fonte: Acervo pessoal.

Durante o ensaio observou-se que a barra de aço do anodo sofreu um processo de corrosão severo, enquanto a barra de aço do catodo permaneceu praticamente intacta. A norma UNE 83987 (UNE, 2014) afirma que isso é esperado no processo, sendo até importante que essa corrosão ocorra, pois evita a formação de gás clorídrico, que é tóxico. Na Figura 45 pode ser observada a diferença entre o anodo e o catodo.

Figura 45: Corrosão anodo e catodo



Fonte: Acervo pessoal.

Após o término do ensaio, rompeu-se um corpo de prova e aspergiu-se nitrato de prata para verificar se os cloretos realmente migraram de uma câmara para a outra. Na Figura 46 pode ser visto que a coloração apresentada em toda a extensão do corpo de prova é branca, indicando assim a presença de cloretos de uma face à outra.

Figura 46: Corpo de prova após aspersão de nitrato de prata



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.8 Ensaio acelerado de migração de cloretos – ASTM C1202/12

Esse ensaio é descrito pela norma americana ASTM C1202 (ASTM, 2012) e tem como objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto submetida a uma diferença de potencial de $60 \pm 0,1V$. Para esse ensaio, foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5x10 cm obtidos a partir de um único corpo de prova de 10x20cm. Uma das faces desse cilindro foi exposta a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) e a outra foi exposta a uma solução de hidróxido de sódio (NaOH). Ambas as soluções foram produzidas com produtos para análise (PA) e podem ser vistas na Figura 47.

Figura 47: Cloreto de sódio e Hidróxido de sódio utilizados no ensaio segundo a ASTM C1202-12



Fonte: Acervo pessoal.

Cada uma dessas soluções é colocada em uma câmara de forma que o concreto é o elemento que separa essas duas soluções. Em cada uma das câmaras é introduzido um eletrodo de cobre ligado a uma fonte de corrente, que permite assim haver uma diferença de potencial entre as faces do concreto, sendo esta diferença de potencial a responsável pela migração dos íons cloretos.

Antes do ensaio, todos os corpos de prova receberam 2 camadas de verniz poliuretânico em suas laterais para garantir o isolamento do concreto em relação ao ambiente externo, como pode ser visto na Figura 48.

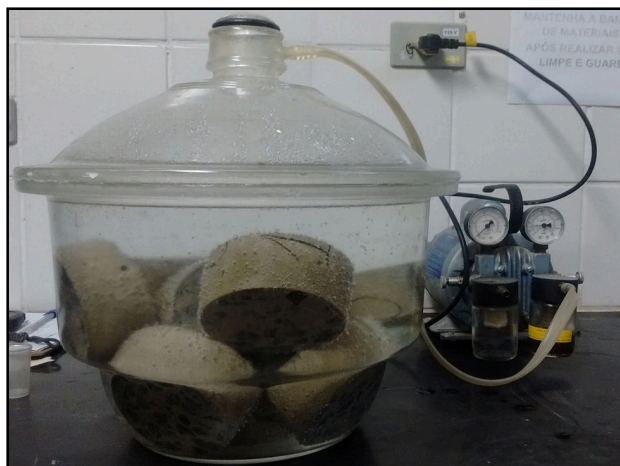
Figura 48: Corpos de prova com as laterais seladas



Fonte: Acervo pessoal.

É de extrema importância que os corpos de prova estejam saturados antes que se inicie o ensaio, para que os cloretos penetrem por migração e não por absorção capilar. Para isso, a norma ASTM C1202 (ASTM, 2012) recomenda que os corpos de prova passem por um processo de saturação a vácuo, como pode ser observado na Figura 49.

Figura 49: Corpos de prova em processo de saturação

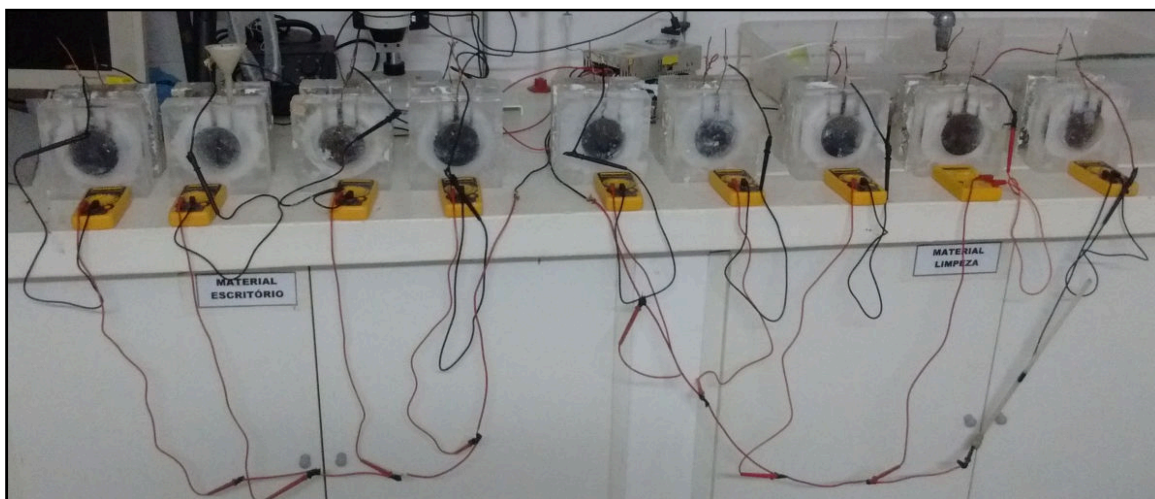


Fonte: Acervo pessoal.

Após o processo de saturação, os corpos de prova foram fixados às células, utilizando para isso silicone acético. Em seguida as células foram preenchidas com suas respectivas soluções, iniciando-se assim o ensaio, que pode ser visto na Figura 50.

Durante o período de 6h foram feitas leituras da corrente passante pelo corpo de prova a cada 30min. Para obter essa leitura, utilizou-se um multímetro para cada célula, que também podem ser vistos na Figura 50.

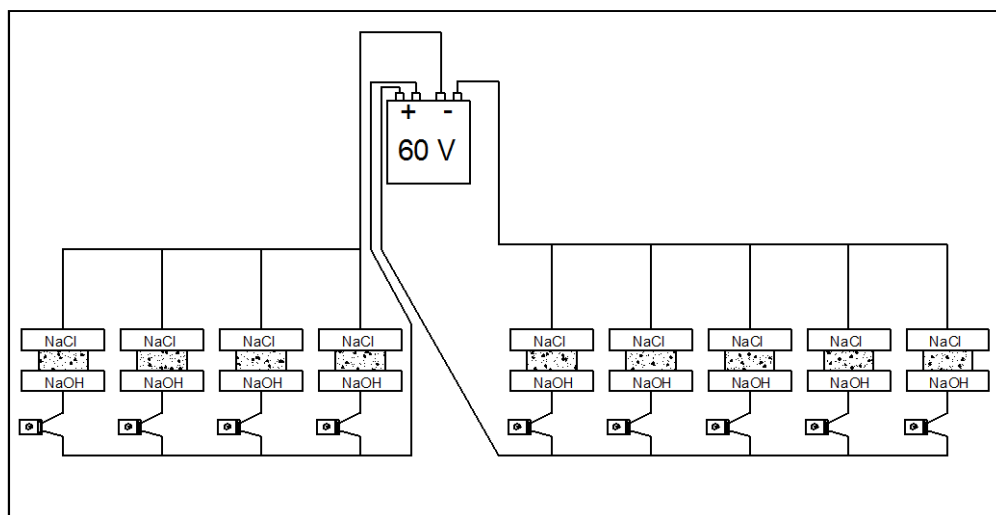
Figura 50: Ensaio de penetração de cloretos segundo a ASTM C1202 (ASTM, 2012)



Fonte: Acervo pessoal.

Para melhor entendimento, na Figura 51 está apresentado o diagrama do circuito montado, exatamente da forma como foi realizado no ensaio.

Figura 51: Diagrama do circuito utilizado no ensaio de migração segundo a ASTM 1202 (ASTM, 2012)



Fonte: Acervo pessoal.

3.4.9 Ensaio de penetração de cloretos por imersão - NT BUILD 443-95

O principal motivo da realização deste ensaio é o fato do ingresso dos íons cloreto ser por difusão, diferente do que ocorre nos demais ensaios apresentados anteriormente, cujo ingresso ocorre por migração, que é um processo no qual os íons são obrigados a penetrarem no corpo de prova. Dessa forma, é possível verificar se os resultados obtidos por migração seguem o mesmo comportamento dos resultados obtidos por difusão, que é um processo mais próximo do que realmente ocorre em uma estrutura real, como um pilar de uma ponte, por exemplo.

Esse ensaio é preconizado pela norma NT BUILD 443-95, e consiste em imergir corpos de prova de concreto em uma solução salina (165g de NaCl por litro de solução) após um período de cura de pelo menos 28 dias. Para esse ensaio, decidiu-se imergir os corpos de prova com idades de 28 e 91 dias, permanecendo imersos em solução salina por 63 dias. Após esse período mediu-se a profundidade de penetração de cloretos.

Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 10x10 cm obtidos a partir da divisão de corpos de prova de 10x20cm. Após o período de cura, os CPs de 10x20cm foram cortados ao meio e tiveram a lateral e uma das faces selados com duas camadas impermeabilizantes, sendo a primeira de verniz poliuretânico e a segunda de silicone, como pode ser observado na Figura 52.

Figura 52: Corpos de prova impermeabilizados



Fonte: Acervo pessoal.

Após o período de secagem do silicone os corpos de prova foram imersos novamente em água com cal, permanecendo imersos até a constância de massa. Assim que estavam saturados, foram imersos em solução salina, como pode ser visto na Figura 53.

Figura 53: Corpos de prova imersos em solução salina

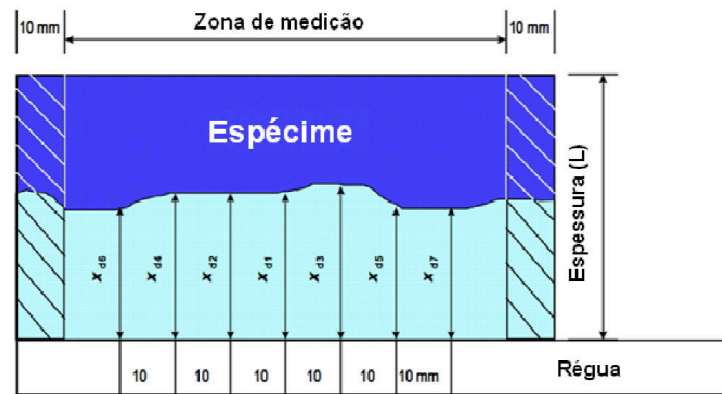


Fonte: Acervo pessoal.

Após o período de imersão de 63 dias os corpos de prova foram secos ao ar e posteriormente rompidos por compressão diametral de forma que se obtiveram duas metades. Após o rompimento aspergiu-se nitrato de prata nos corpos de prova com o intuito de verificar a profundidade que os cloretos penetraram.

Para a medição da profundidade de penetração, seguiu-se o procedimento recomendado pela NT BUILD 492/99. As leituras foram feitas desconsiderando-se 20 mm das bordas, sendo realizado um total de 7 leituras distribuídas de 10 em 10 mm. Na Figura 54 observa-se o padrão de leitura utilizado. As leituras foram realizadas com uma régua com precisão de 2 casas decimais.

Figura 54: Ilustração da medição de profundidade de penetração de cloretos



Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999) *apud* Fedumanti (2013, p. 50).

A NT-BUILD 443-95 tem como objetivo final determinar o coeficiente de difusão dos íons cloreto no concreto. Porém, no presente estudo utilizou-se os procedimentos recomendados por esta norma para determinar a profundidade total de penetração dos íons cloreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do RBROTT

O RBROTT foi submetido à ensaios para avaliar suas características físicas e químicas. Além disso, também foram realizados ensaios com o intuito de comprovar a atividade pozolânica do mesmo após o tratamento térmico.

4.1.1 Caracterização química do RBROTT

A caracterização química do RBROTT foi obtida por ensaio de perda ao fogo e fluorescência de raios-X. Os resultados estão descritos na Tabela 19. Para efeito comparativo, na Tabela 19 apresentam-se também a composição química do metacaulim, cinza volante e sílica ativa encontrada por outros autores.

Tabela 19: Caracterização química do RBROTT

Propriedades		RBROTT	Metacaulim ¹	Cinza Volante ²	Sílica ativa ³
Composição Química	SiO ₂	67,11	50,27	51,80	95,1
	Al ₂ O ₃	23,42	34,46	26,40	0,09
	K ₂ O	3,36	-	0,68	0,93
	CaO	2,62	0,29	1,61	0,24
	Fe ₂ O ₃	1,53	0,75	13,20	0,10
	MgO	1,5	-	1,17	0,44
	TiO ₂	0,18	-	1,44	-
	SO ₃	0,05	0,21	0,21	-
	P ₂ O ₅	0,05	-	1,39	-
	MnO	0,03	-	0,10	-
	Cr ₂ O ₃	0,01	-	-	-
	Rb ₂ O	0,01	-	-	-
	ZrO ₂	0,01	-	-	-
	CuO	0,01	-	-	-
	SrO	0,01	-	-	-
	Na ₂ O	-	-	0,31	0,22
	P.F.	0,1	12,65	0,5	2,32

¹ Duan *et al.* (2013)

² Shaikh e Supit (2015)

³ Hoffmann (2001)

Fonte: Autor.

A caracterização química apresentou valores próximos aos encontrados por Uliana (2014) após o tratamento térmico realizado também a 1200°C. É possível observar que o RBROTT se apresenta como um material sílico-

aluminoso, pois há predominância de compostos à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) que é uma das principais características de materiais pozolânicos. Comparando-se o RBROTT com a sílica ativa, cinza volante e o metacaulim que são pozolanas bastante estudadas e conhecidas, observa-se que RBROTT apresenta composição química mais próxima à composição do metacaulim e da cinza volante quando se compara os teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Já a sílica ativa apresenta maiores teores de sílica (SiO_2), chegando a valores superiores a 95% da composição química.

Para avaliar se as características químicas do RBROTT permitem enquadrá-lo como um material pozolânico utilizou-se os parâmetros definidos pela norma NBR 12653 (ABNT, 2015).

Primeiramente procedeu-se a classificação do RBROTT segundo sua origem. As três classificações em que uma pozolana pode se enquadrar foram apresentadas no Capítulo 2.2 sendo que RBROTT é classificado como pertencente à classe E, pois não se enquadra na classe N nem na classe C. A partir disso, pode-se avaliar se a pozolana atende aos critérios químicos estabelecidos pela norma NBR 12653 (ABNT, 2015). Na Tabela 20 estão apresentados os limites, sendo possível verificar que o RBROTT atendeu a todos os critérios.

Tabela 20: Requisitos químicos

Propriedades	Limites segundo a classe de material pozolânico			Resultado (%)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	92,06
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	0,05
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	0,00
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	0,10
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	Não Identificado

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.2 Caracterização física do RBROTT

A caracterização física foi realizada por meio do ensaio de massa específica, finura e composição granulométrica. Os resultados de massa específica e finura estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Caracterização física do RBROTT

Massa específica (g/cm ³)		2,45	NBR NM 23
Finura	Material retido na peneira #325 (%)	9,57	NBR 15894-3
	Material retido na peneira #200 (%)	1,16	NBR 11579
	Área específica - Blaine -(cm ² /g)	6890	NBR NM 76

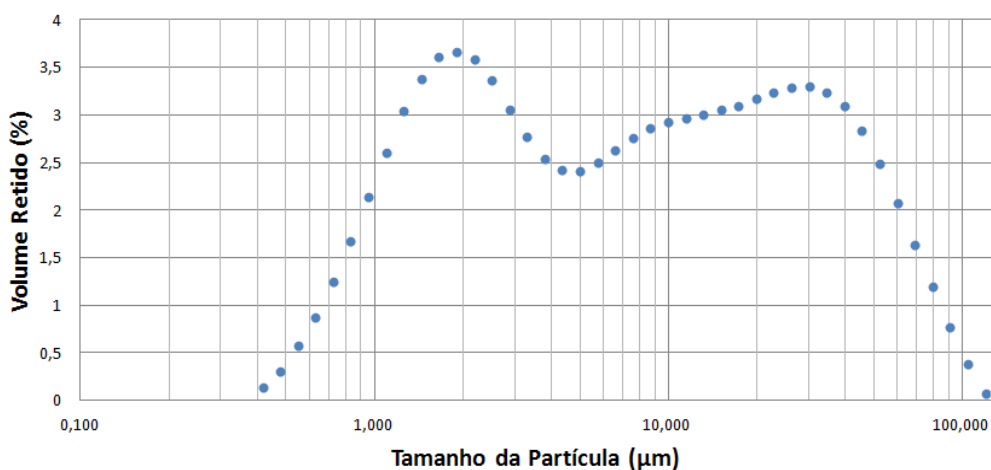
Fonte: Acervo pessoal.

Para ser considerado um material pozolânico, a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) exige que a porcentagem retida na peneira de malha 325 seja de no máximo 20%. Na Tabela 21 é possível verificar que o RBROTT atendeu a este critério, sendo então caracterizado como possível material pozolânico.

A superfície específica encontrada via Blaine foi de 6.890 cm²/g. Comparando a finura do RBROTT com a cinza volante e a sílica ativa percebe-se que o RBROTT apresentou finura superior ao encontrado para a cinza volante em alguns estudos (Siriruang *et al.* (2016), Yoshitake *et al.* (2016) e Ahn, Jang e Lee (2016)), que são valores próximos a 3000 cm²/g. Em relação à sílica ativa, o RBROTT apresentou valor inferior de finura, pois a sílica ativa normalmente apresenta valores muito altos, próximos a 20.000 cm²/g, como os valores encontrados por Jalal *et al.* (2015) e Kieling (2009).

Quanto à distribuição granulométrica, na Figura 55 está apresentado distribuição do tamanho dos grãos.

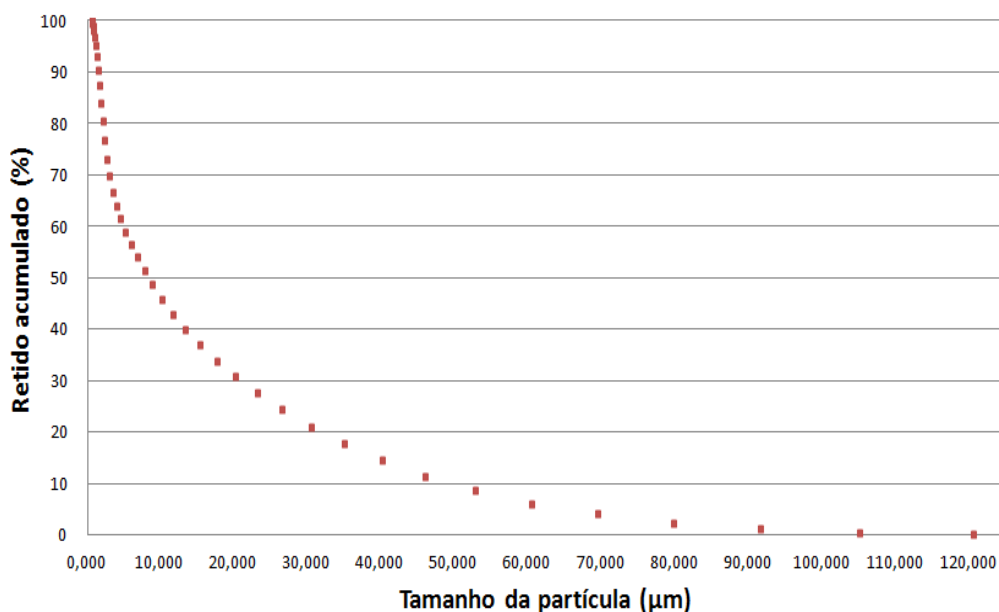
Figura 55: Distribuição granulométrica do RBROTT



Fonte: Acervo pessoal.

Para melhor compreensão da distribuição granulométrica do RBROTT, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 56 que mostra a porcentagem retida acumulada.

Figura 56: Porcentagem retida acumulada



Fonte: Acervo pessoal.

É possível comparar os valores obtidos nesse ensaio com os valores obtidos através das peneiras de malha 200 e 325. Na Tabela 21 verifica-se que o material retido nas peneiras de malha 325 (45 µm) e 200 (75 µm) foi de 9,57% e 1,16%, respectivamente. Enquanto que na Figura 56 observa-se que o material retido nas aberturas 45 µm e 75 µm são de 11,83% e 3,12% respectivamente. Dessa forma, é possível concluir que os valores obtidos por meio das peneiras 200 e 325 estão muito próximos aos valores obtidos pelo granulômetro a laser.

4.1.3 Atividade Pozolânica do RBROTT

Este capítulo visa apresentar os resultados dos ensaios realizados com o intuito de comprovar a atividade pozolânica do resíduo após tratamento térmico.

4.1.3.1 Método de Luxán

Este ensaio foi repetido duas vezes para cada material ensaiado (RBRO, RBROTT e metacaulim). Na Tabela 22 podem ser observados os valores encontrados.

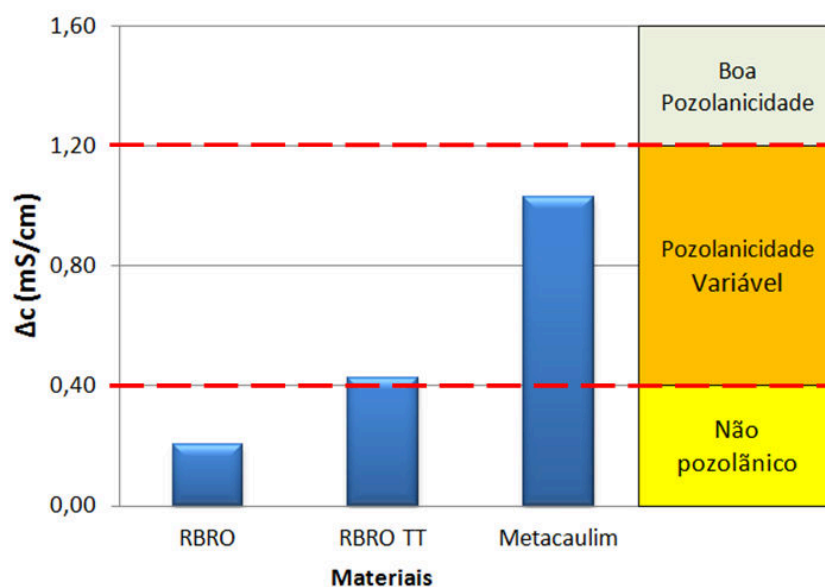
Tabela 22: Resultados do ensaio de atividade pozolânica pelo método de Luxán

Material	Condutividade Inicial (mS/cm)	Condutividade Final (mS/cm)	Δc (mS/cm)	Δc - média (mS/cm)
RBRO	9,04	8,78	0,26	0,21
RBRO	8,91	8,76	0,15	
RBRO TT	9,13	8,68	0,45	0,43
RBRO TT	9,21	8,81	0,40	
Metacaulim	9,23	8,27	0,96	1,03
Metacaulim	9,21	8,11	1,10	

Fonte: Acervo pessoal.

Para melhor visualização dos resultados, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 57.

Figura 57: Resultado do ensaio de atividade pozolânica pelo método de Luxán



Fonte: Acervo pessoal.

A partir da Figura 57 observa-se que o material que apresentou a menor atividade pozolânica foi o RBRO sem tratamento térmico, sendo considerado um material não pozolânico. Em seguida, estão o RBROTT e o metacaulim, sendo ambos considerados materiais de pozolanicidade variável.

Uliana (2014) realizou o ensaio pelo método de Luxán para avaliar a atividade pozolânica do RBROTT obtendo como resultado o valor médio de 0,44 mS/cm, que é muito próximo ao resultado obtido no presente estudo. Vazzoler (2015) também realizou este ensaio, obtendo como resultado o valor de 0,55 mS/cm.

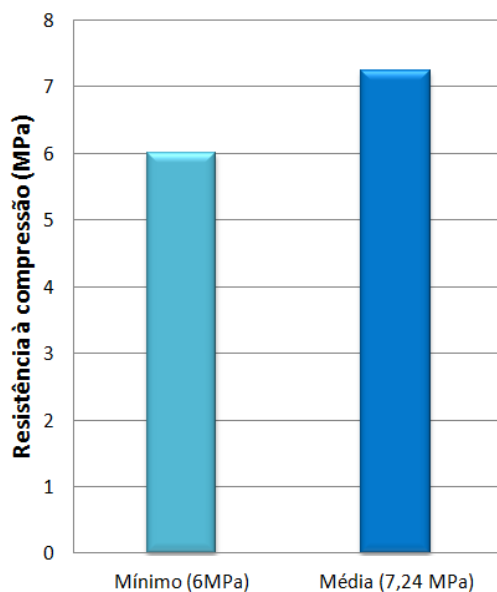
Rodrigues (2004) afirma que o decréscimo da condutividade elétrica pode não representar de forma realista a atividade pozolânica da adição. Isso se deve ao fato de as partículas mais finas poderem propiciar o processo de nucleação, de forma que os íons são atraídos para a superfície das partículas sem que necessariamente ocorra a reação do íon com a sílica amorfa. Desta forma, a redução da condutividade pode ser muito mais devido à alta superfície específica da adição mineral do que da capacidade reativa do mesmo. O RBRO e o RBROTT apresentam superfície específica de 6743 cm²/g e 6890 cm²/g respectivamente, havendo indícios de que a maior variação de condutividade apresentada pelo RBROTT se deve à melhoria da capacidade reativa do material após tratamento térmico e não à diferença de superfície específica.

Em relação ao metacaulim, devido ao fato de ser um material pozolânico já conhecido, esperava-se maior valor de variação de condutividade. Kieling (2009) ensaiou a sílica ativa pelo método de Luxán, que também é um material pozolânico, encontrando como valor 0,89 mS/cm. Dessa forma, pode-se concluir que a classificação do material com atividade pozolânica variável (0,4 a 1,2 mS/cm) é um resultado satisfatório, pois pozolanas como a sílica ativa e o metacaulim apresentaram resultados compreendidos nesse intervalo. Vale ressaltar que no presente estudo também foi determinada a atividade pozolânica do metacaulim através da NBR 5751 (ABNT, 2015), apresentando como resultado valor 92,17% superior ao mínimo necessário para ser considerado uma pozolana. Kieling (2009) também determinou a atividade pozolânica da sílica ativa por meio da NBR 5752 (ABNT, 1992) que apresentou resultado 28% superior ao mínimo necessário para ser considerada uma pozolana.

4.1.3.2 Atividade Pozolânica com Cal

Para verificar a atividade pozolânica com cal foram moldados 3 corpos de prova de 5x10cm, que foram rompidos na idade de 7 dias, segundo as recomendações da NBR 5751 (ABNT, 2015). O resultado médio de resistência à compressão pode ser vistos na Figura 58.

Figura 58: Resultado da Resistência à compressão axial média para determinação do IAP-CAL



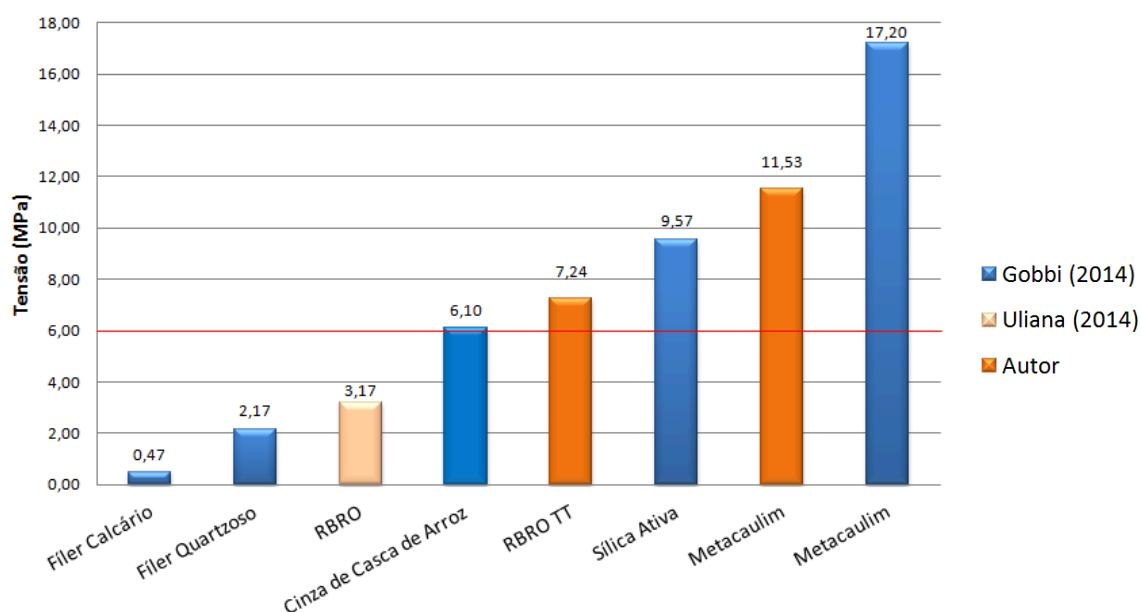
Fonte: Acervo Pessoal.

Para que o material analisado fosse considerado uma pozolana, a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) recomenda que o valor mínimo de resistência à compressão seja de 6 MPa. No caso do RBROTT, a resistência média à compressão gerou como resultado o valor de 7,24 MPa, que é 20,6% maior do que o mínimo necessário. Dessa forma, segundo esse critério, o RBRO após o tratamento térmico pode ser considerado uma pozolana.

Gobbi (2014) estudou a atividade pozolânica com cal para diferentes adições minerais com o intuito de analisar a eficácia desse método. Para efeito comparativo construiu-se o gráfico apresentado na Figura 59 que mostra os resultados obtidos por Gobbi (2014) e Uliana (2014) juntamente com os resultados obtidos no presente trabalho. Esses autores utilizaram a NBR 5751 (ABNT, 2012), que atualmente foi substituída pela NBR 5751 (ABNT, 2015). Porém, os procedimentos para obtenção dos resultados não foram alterados,

de forma que os resultados obtidos das normas de 2012 e 2015 podem ser comparados.

Figura 59: Atividade pozolânica com cal para diferentes adições minerais



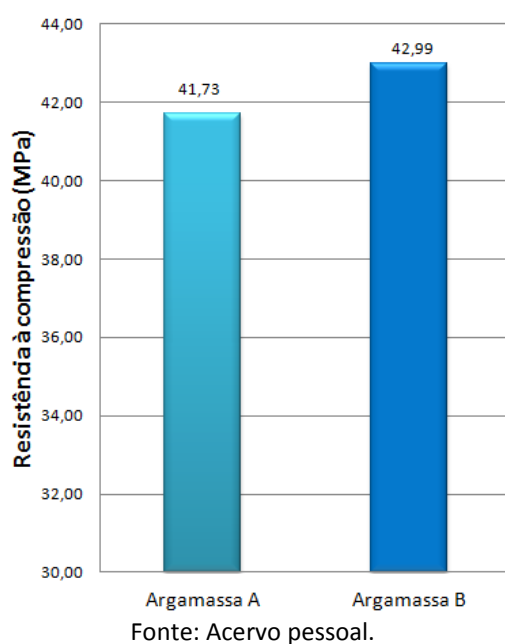
Fonte: Autor.

É possível verificar que o RBROTT ficou enquadrado entre duas pozolanas bastante estudadas e com potencial pozolânico comprovado, que são a cinza da casca de arroz e a sílica ativa. Assim como no ensaio pelo método de Luxán, o metacaulim apresentou o melhor resultado de atividade pozolânica, tanto no resultado encontrado por Gobbi (2014) como no resultado encontrado no presente estudo.

4.1.3.3 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). Foram moldados 6 corpos de prova para a argamassa de referência (A) e 6 corpos de prova para a argamassa com RBRO TT (B) que foram rompidos na idade de 28 dias. O resultado do ensaio de resistência à compressão pode ser visto na Figura 60.

Figura 60: Resultado da Resistência à compressão axial média para determinação do IAP-Cimento



Para ser considerado um material pozolânico, a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) recomenda que a argamassa B atinja pelo menos 90% da resistência obtida na argamassa A. O índice de desempenho obtido foi de 103%, ou seja, o resultado foi 13% superior ao mínimo necessário para considerar o RBROTT como sendo uma pozolana.

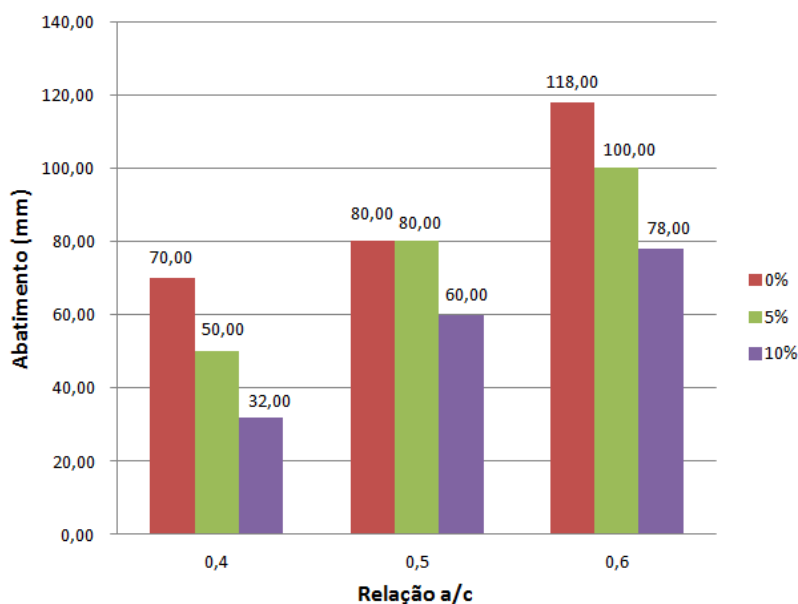
4.2 Resultados dos ensaios em concretos

4.2.1 Concreto no estado fresco

4.2.1.1 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento pelo tronco de cone foi realizado segundo o que recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 98). Na figura 69 é possível verificar o comportamento dos concretos produzidos em função da consistência do concreto e da relação água/cimento.

Figura 61: Influência do percentual de adição sobre a consistência do concreto



Fonte: Acervo pessoal.

Esperava-se que os concretos sem adição (referência) obtivessem um abatimento compreendido no intervalo de 80 a 120 mm, pois foram dosados para atender a este quesito. Apenas o concreto referência com relação a/c 0,4 ficou com abatimento inferior ao esperado, que foi de 70 mm. Diversos fatores podem ter contribuído para a redução do abatimento, como por exemplo, a temperatura ambiente, que afeta a temperatura dos compostos do concreto (cimento, areia, brita e água). Segundo Mehta e Monteiro (2008), um concreto produzido com o cimento em duas temperaturas diferente (23°C e 30°C) apresentaram perdas de abatimentos distintas com o tempo. O concreto produzido com o cimento a 23°C perdeu 44 mm de abatimento nos primeiro 30min, enquanto o concreto produzido a 30°C perdeu 68mm de abatimento. Apesar da diminuição do abatimento o concreto apresentou-se coeso e trabalhável.

É possível observar na Figura 61 a diminuição do abatimento de acordo com o aumento do percentual de adição do RBROTT. Este comportamento se deve ao fato de o RBROTT adicionado ser um material muito fino, o que exigiria um aumento do consumo de água para se obter o mesmo abatimento do concreto referência. Neville e Brooks (2013) afirmam que partículas mais finas requerem mais água para a molhagem de suas grandes superfícies específicas. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que para uma determinada consistência do concreto,

o uso de materiais com alta área superficial específica (materiais finos), como a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, aumentam a demanda de água na mistura.

Dentre os concretos, aquele que foi mais afetado com a adição do RBROTT foi o concreto com relação a/c de 0,4. Para o teor de adição de 5% houve redução no abatimento de 28,57% e para o teor de adição de 10% houve redução de 54,29% no abatimento. Isso se deve ao fato do concreto com relação a/c 0,4 ser o que possui o maior consumo de cimento em relação aos demais. Pois, como a adição de RBROTT foi feita em relação à massa de cimento, este foi o concreto que recebeu a maior quantidade de adição (em massa), sendo o concreto mais afetado em sua consistência.

Apesar disso, mesmo com o abatimento reduzido devido à adição, os concretos se apresentaram coesos e com trabalhabilidade suficiente para moldagem dos corpos de prova.

4.2.1.2 Massa específica do concreto no estado fresco

Como descrito no capítulo de métodos, o resultado do ensaio para determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009). Na Tabela 23 estão apresentados os valores obtidos.

Tabela 23: Massa específica dos concretos

Concreto	Massa específica do concreto (Kg/m ³)
Ref-0,4	2461,05
5%-0,4	2458,03
10%-0,4	2436,34
Ref-0,5	2431,60
5%-0,5	2455,81
10%-0,5	2435,09
Ref-0,6	2455,18
5%-0,6	2436,82
10%-0,6	2439,15

Fonte: Acervo pessoal.

É possível observar que todos os concretos apresentaram valores de massa específica muito próximas. A média de todos os valores obtidos foi de 2445,45 Kg/m³, sendo que o desvio máximo em relação a essa média foi de 0,57% para o concreto Ref-0,5, ou seja, o desvio foi menor do que 1%. Isso se deve ao fato

de que as porcentagens adicionadas (5 e 10%) não terem sido suficientes para provocar aumento ou redução significativa na massa específica dos concretos. Porém, mesmo não tendo influenciado de forma apreciável a massa específica, a adição do RBROTT foi capaz de modificar outras propriedades do concreto, como será discutido nos próximos capítulos.

4.2.2 Concreto no estado endurecido

Os ensaios realizados no estado endurecido do concreto têm por objetivo avaliar as características mecânicas e de durabilidade do concreto, de forma que se possa averiguar a influência da idade, relação a/c e teor de adição sobre tais propriedades. Nos capítulos seguintes serão apresentados os resultados desses ensaios, assim como a análise estatística realizada sobre os mesmos. Os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios estão mais bem descritos no capítulo de métodos.

4.2.2.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada concreto foi realizado ensaio de compressão axial nas idades de 28, 56 e 91 dias. Decidiu-se por realizar o ensaio em três idades distintas com o intuito de averiguar a influência da atividade pozolânica no comportamento mecânico do concreto ao longo do tempo.

Para cada concreto, em cada idade, foram ensaiados 5 corpos de prova cujos resultados individuais de resistência à compressão axial podem ser vistos no Apêndice A. Para o cálculo da resistência média, de cada grupo de 5 corpos de prova desconsiderou-se aqueles que diferiam em $\pm 10\%$ da média, sendo considerado como valor espúrio (dos 135 corpos de prova ensaiados, apenas 4 foram considerados espúrios). Na Tabela 24 pode ser vista a resistência média de cada um dos 9 concretos produzidos. O coeficiente de variação (CV) apresentando é resultado da divisão do desvio padrão pela média de cada grupo de 5 corpos de prova.

Tabela 24: Resistência à compressão média

Concreto	28 dias			56 dias			91 dias		
	Fc	σ	CV	Fc	σ	CV	Fc	σ	CV
Ref - 0,4	55,19	1,50	2,73%	59,75	1,86	3,12%	65,70	1,69	2,58%
5% - 0,4	60,54	2,61	4,31%	61,90	1,54	2,49%	64,68	1,61	2,49%
10% - 0,4	63,09	0,66	1,04%	61,19	2,63	4,30%	66,57	2,38	3,57%
Ref - 0,5	52,58	1,81	3,45%	55,65	2,05	3,69%	54,56	0,60	1,10%
5% - 0,5	51,89	0,73	1,40%	52,25	1,55	2,97%	50,76	1,91	3,76%
10% - 0,5	53,19	0,75	1,42%	51,19	3,94	7,70%	61,41	2,60	4,24%
Ref - 0,6	40,37	0,35	0,88%	42,28	1,36	3,22%	42,53	1,85	4,35%
5% - 0,6	48,20	1,01	2,09%	49,22	1,21	2,45%	48,36	2,39	4,94%
10% - 0,6	50,01	0,60	1,20%	49,90	2,94	5,88%	56,43	0,50	0,88%

Notas: Fc - Resistência à compressão média (MPa).

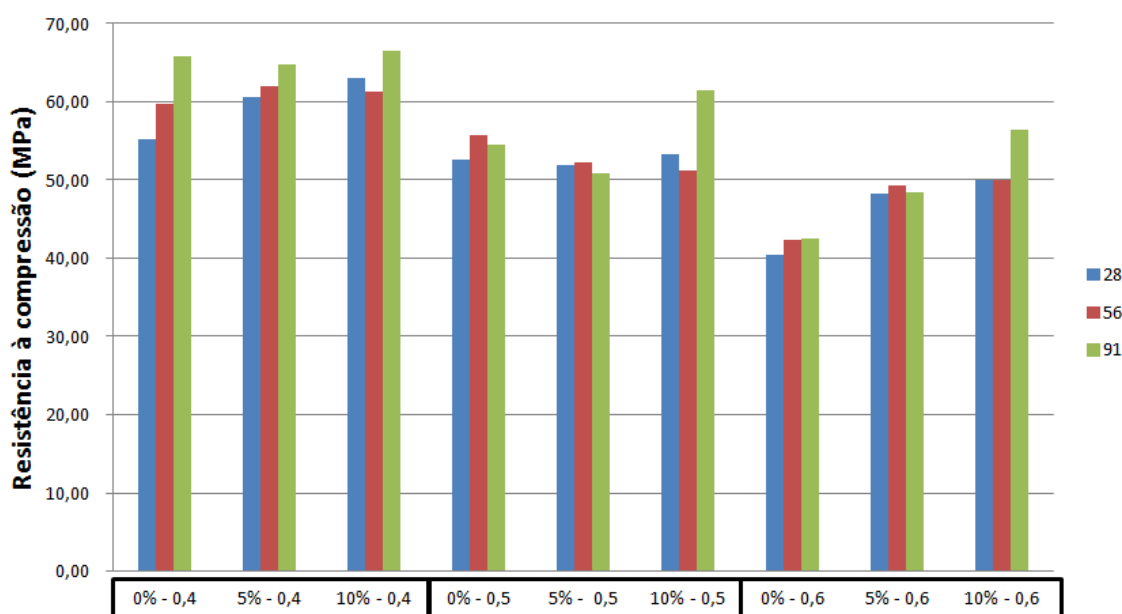
σ - Desvio padrão.

CV - Coeficiente de variação, resultado da divisão do desvio padrão pela média.

Fonte: Acervo pessoal.

A partir da Tabela 24 construiu-se o gráfico com os valores médios de resistência apresentado na Figura 62.

Figura 62: Resistência à compressão axial dos concretos aos 28, 56 e 91 dias



Fonte: Acervo pessoal.

Analisando-se a Figura 62 é possível observar que o aumento do teor de RBROTT influenciou de forma mais apreciável os concretos com relação água/cimento 0,6. Para a idade de 91 dias, houve um aumento de 32,68% na resistência mecânica do concreto 0%-0,6 para o concreto 10%-0,6. É possível

que esse comportamento se deva à presença da adição pozolânica (RBROTT) que proporcionou o refinamento dos poros devido à reação entre a pozolana e os álcalis (gerados na hidratação do cimento), ocorrendo assim a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que preencheram parte dos poros e consequentemente aumentaram a resistência mecânica dos concretos. Esse comportamento foi mais evidente para os concretos com relação a/c 0,6 possivelmente devido ao fato de serem mais porosos.

Para avaliar a influência das variáveis (a/c, idade e teor de adição) sobre o comportamento mecânico do concreto torna-se necessário, além da análise dos valores absolutos, avaliar de forma estatística o comportamento do concreto frente a tais variáveis. Para isso, submeteu-se os resultados à Análise de Variância (ANOVA), realizada através do programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

4.2.2.1.1 Análise de variância da resistência à compressão axial

A análise de variância da resistência à compressão dos concretos está apresentada na Tabela 25. Foi considerado um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 25: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
a/c	4613,6	2	2306,8	668,7	0,000000	Significativo
idade	373,2	2	186,6	54,1	0,000000	Significativo
% adição	535,3	2	267,6	77,6	0,000000	Significativo
a/c - idade	50,3	4	12,6	3,6	0,008088	Significativo
a/c - % adição	475,3	4	118,8	34,4	0,000000	Significativo
Idade - % adição	248,4	4	62,1	18	0,000000	Significativo
a/c - idade - % adição	155,6	8	19,4	5,6	0,000006	Significativo

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

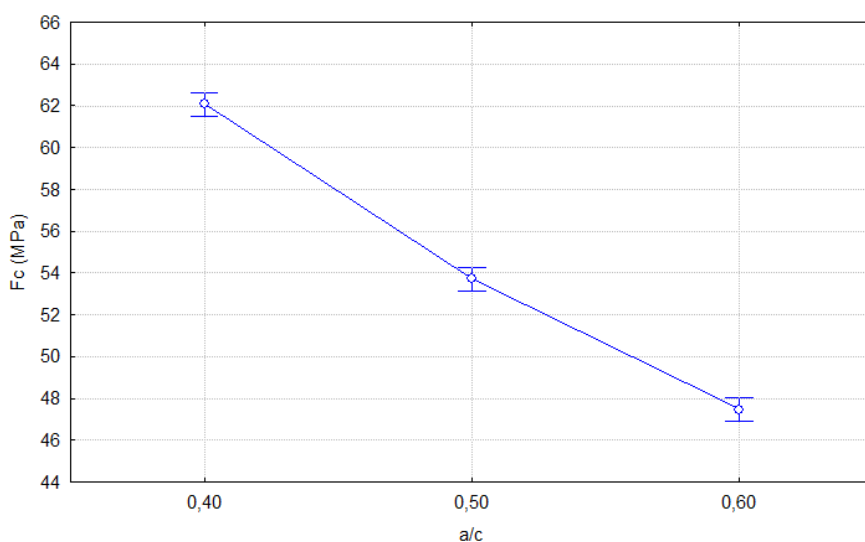
Para avaliar se determinada variável teve influência sobre a resistência à compressão do concreto, analisou-se o p-valor fornecido pela análise de variância. A variável é considerada como tendo influência significativa caso seu p-valor seja inferior a 0,05. Para todas as variáveis e suas interações o p-valor foi inferior a 0,05 de forma que se pode afirmar que tiveram influência sobre a resistência do concreto, ora diminuindo a resistência, como ocorreu com o

aumento da relação a/c , ora aumentando a resistência, como ocorreu com o aumento da idade.

Na Tabela 25 a análise de variância demonstra que todas as variáveis tiveram influência sobre o comportamento do concreto em relação à resistência mecânica. Para avaliar de que maneira essas variáveis e suas interações influenciaram a resistência à compressão do concreto, torna-se necessário realizar uma análise do gráfico que apresenta a influência de cada fator.

Inicialmente será analisado o efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão do concreto, que pode ser vista na Figura 63.

Figura 63: Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência do concreto

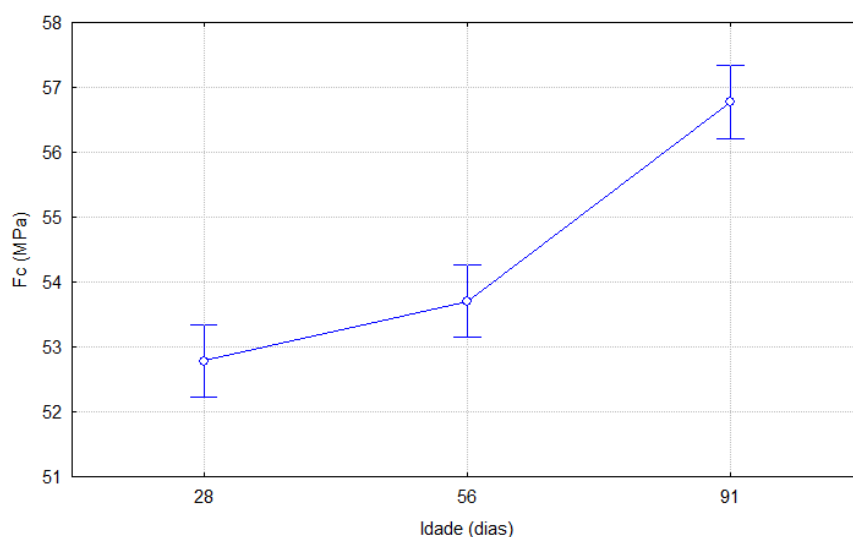


Fonte: Acervo pessoal.

É possível observar que aumento da relação a/c diminui significativamente a resistência à compressão do concreto. Este resultado já era esperado, pois segue o comportamento descrito pela lei de Abrams em que o aumento da relação a/c ocasiona o aumento da porosidade do concreto, diminuindo a resistência à compressão do mesmo.

A influência da idade sobre a resistência à compressão pode ser vista na Figura 64.

Figura 64: Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão do concreto



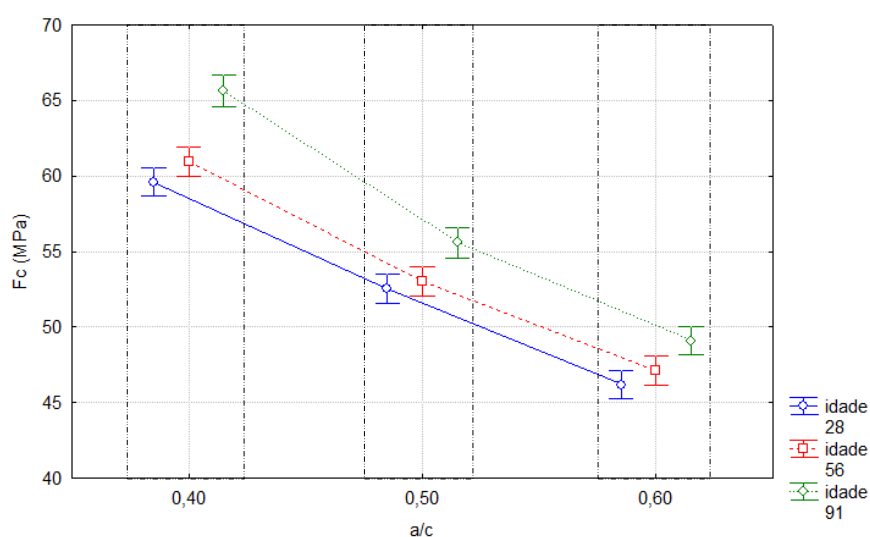
Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se na Figura 64 que houve um aumento médio de 7,56% dos 28 para os 91 dias. Esse comportamento era esperado, visto que o cimento utilizado é o CPV-ARI, que atinge a maior parte de sua resistência nas primeiras idades. Evangelista (2002) analisou a evolução da resistência à compressão de concretos produzidos com CPV-ARI para diferentes relações a/c . Em seus resultados é possível verificar que a resistência média evoluiu 11,66% da idade de 28 para 91 dias, que também é um valor pouco significativo para esse intervalo de tempo.

Analisando cada intervalo de idade apresentado na Figura 64, é possível verificar que a resistência média à compressão aumentou 1,74% dos 28 para os 56 dias (intervalo de 28 dias) e 5,74% dos 56 para os 91 dias (intervalo de 35 dias). O aumento maior do intervalo de 56 para os 91 dias pode ser consequência de uma possível atividade pozolânica atribuída ao RBROTT, que teve suas propriedades de pozolanicidade comprovadas.

Tratando-se a influência conjunta da relação a/c e idade sobre a resistência mecânica, pode-se concluir também que essa interação foi significativa conforme a Tabela 25. Na Figura 65 é possível observar a diminuição da resistência com o aumento da relação a/c e o aumento da resistência devido ao aumento da idade.

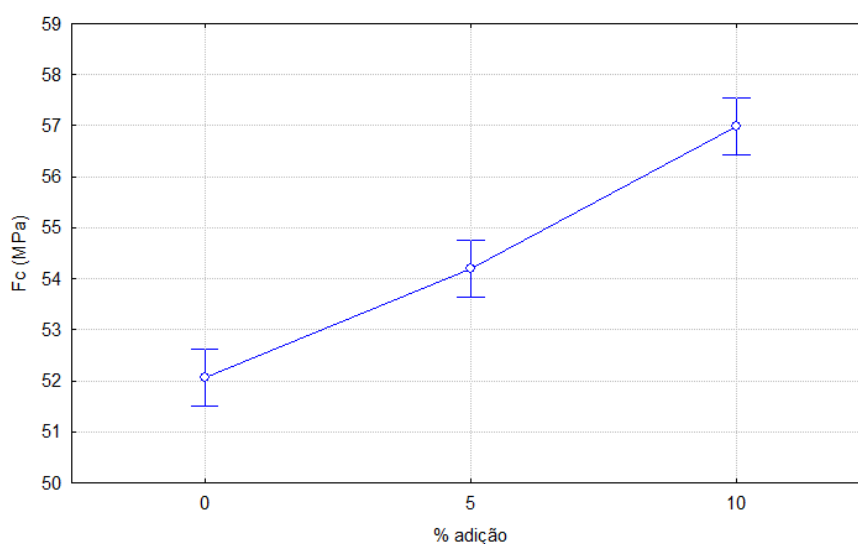
Figura 65: Efeito interação da relação a/c e idade sobre a resistência à compressão do concreto



Fonte: Acervo pessoal.

Para o presente estudo, a análise mais importante é o efeito do percentual de adição sobre a resistência do concreto. Na Figura 66 pode-se observar de forma isolada o efeito da adição do RBROTT sobre a resistência, que aumentou de acordo com o aumento do percentual de adição.

Figura 66: Efeito isolado do teor de adição sobre a resistência mecânica do concreto



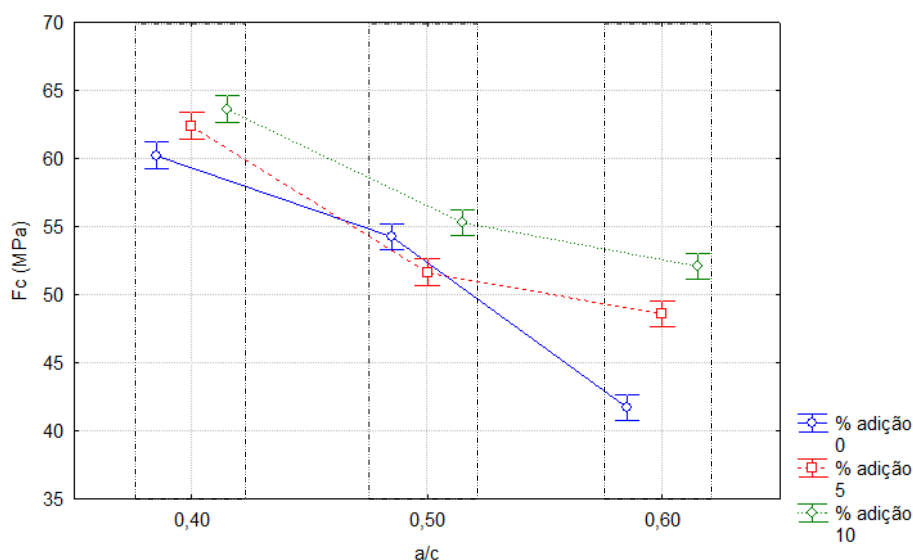
Fonte: Acervo pessoal.

Os concretos com 0%, 5% e 10% de adição apresentaram resistência média de 52,07, 54,06 e 57,00 MPa respectivamente, ou seja, a adição de 5% e 10% proporcionou aumento de 3,82% e 9,47% na resistência mecânica dos concretos. Acredita-se que este efeito se deve principalmente ao efeito

pozolânico do RBROTT. Foi comprovado que este resíduo, tratado termicamente, possui índices de atividade pozolânica, tendo em vista que o RBROTT atendeu a todos os critérios estabelecidos pela norma NBR 12653 (ABNT, 2015). Dessa forma, é provável que o aumento da resistência foi devido à reação do RBROTT com os álcalis do cimento, proporcionando a formação de silicato de cálcio hidratado que diminuiu a porosidade do concreto e aumentou sua resistência à compressão.

Na Figura 67 observa-se o efeito da interação entre a relação a/c e o teor de adição.

Figura 67: Efeito isolado do teor de adição e relação a/c sobre a resistência mecânica do concreto



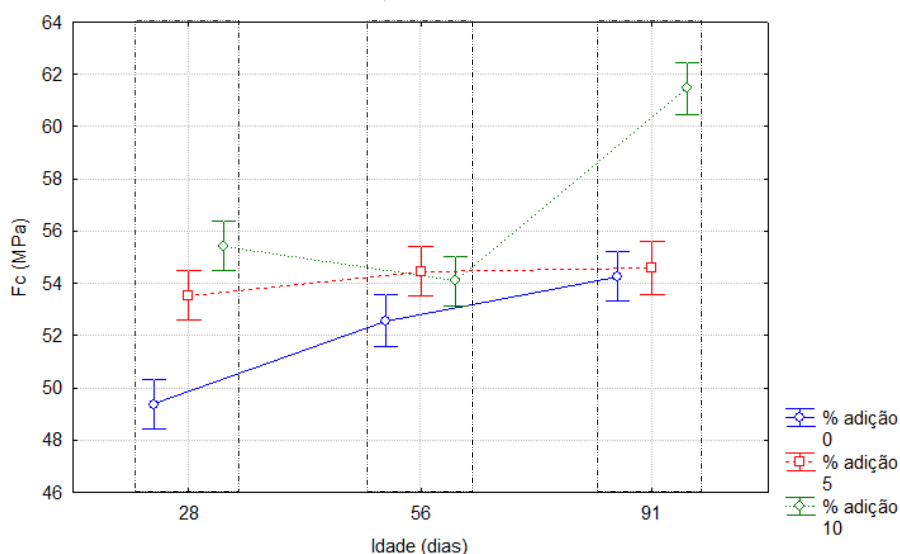
Fonte: Acervo pessoal.

Verifica-se que a adição do RBROTT proporcionou aumento da resistência à compressão de forma mais significativa para os concretos com relação a/c de 0,6 sendo maior para os concretos com 10% de adição, em seguida 5% e por ultimo os de referência. Isso se explica pelo fato de os concretos com relação a/c maiores também serem mais porosos, de forma que a pozolana através das reações com os álcalis pode preencher esses poros com C-S-H, aumentando a resistência mecânica do concreto. Para a relação a/c igual a 0,5, a resistência mecânica dos concretos com 10% de adição se mostrou superior à resistência mecânica dos concretos com 5% e referência, sendo que os concretos para essa relação a/c se apresentaram com resistências muito próximas. Para os concretos com relação a/c de 0,4 houve um aumento da resistência com o

aumento do teor de adição, porém esse aumento foi o menos significativo. Isso se deve ao fato de que os concretos com relação a/c de 0,4 apresentam teoricamente menor porosidade se comparado aos concretos com maior relação a/c de forma que a pozolana não foi capaz de proporcionar grande melhoria.

Na Figura 68 é apresentado o comportamento da resistência à compressão frente à interação entre o percentual de adição e idade.

Figura 68: Efeito da idade e porcentagem de adição sobre a resistência à compressão do concreto



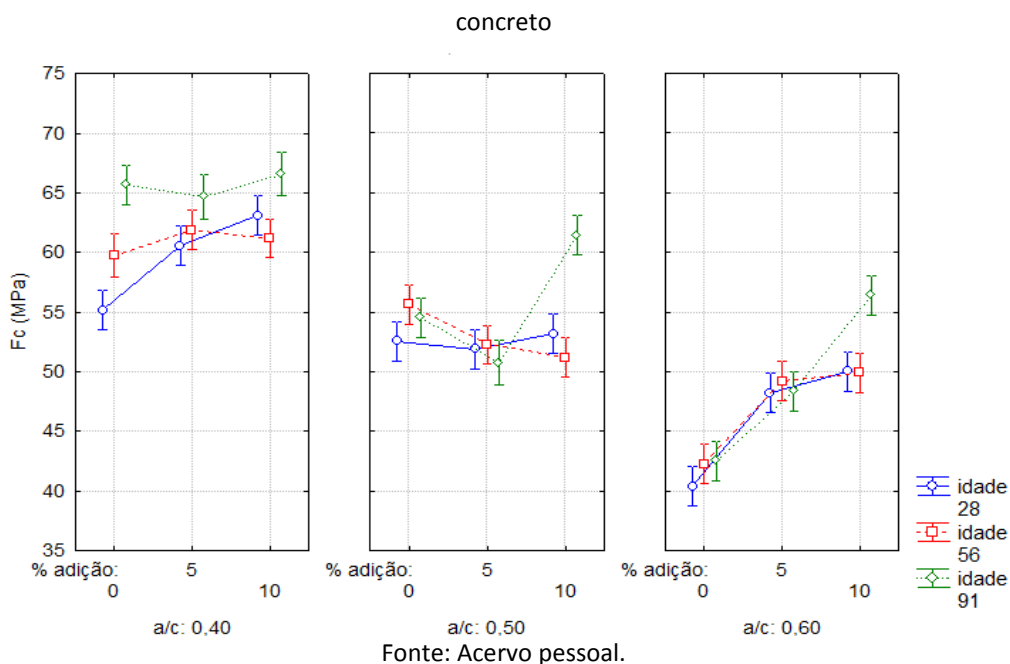
Fonte: Acervo pessoal.

Verifica-se que já na idade de 28 dias os concretos com 5% e 10% de adição apresentaram resistência mecânica superior ao concreto referência, sendo esse aumento de 13,79% e 18,37% respectivamente. Segundo Mehta e Monteiro (2008), cimentos contendo pozolanas apresentam ganho de resistência mecânica devido à pozolana após a idade de 7 dias. Logo, para a idade de 28 dias já era esperado um efeito significativo da adição sobre a resistência mecânica dos concretos. Aos 56 dias os 3 teores de adição se apresentaram com resistências mecânicas próximas, sendo que o concreto com 10% de adição apresentou uma pequena redução dos 28 para os 56 dias possivelmente devido à algum erro ocorrido ou no processo de moldagem ou no processo de retífica dos corpos de prova, sendo possível observar na Tabela 24 que os corpos de prova com 10% de adição e 56 dias de idade foram os que apresentaram os maiores coeficientes de variação. Com o

aumento da idade para 91 dias houve um aumento da resistência devido à adição de RBROTT, principalmente para os concretos com 10%, que apresentaram um aumento de 13,29% quando comparados aos concretos referência também aos 91 dias. Os concretos com 5% de adição não apresentaram evolução apreciável dos 56 para os 91 dias. Isso pode ser explicado pelo fato de 5% de adição não ser uma quantidade tão significativa, sendo incapaz de promover grandes evoluções na resistência devido à atividade pozolânica. O mesmo ocorreu com o concreto referência, cuja resistência mecânica também evoluiu pouco dos 56 para os 91 dias.

A interação da relação a/c , idade e percentual de adição também foi considerada significativa, conforme apresentado na Tabela 25 e seu comportamento pode ser observado na Figura 69.

Figura 69: Efeito da interação entre idade, relação a/c e percentual de adição sobre a resistência do



De acordo com o gráfico da Figura 69 é possível observar o efeito da interação tripla entre a relação a/c , idade e percentual de adição. Em idades mais avançadas, o efeito da adição foi mais intensificado para percentuais de 10% na idade de 91 dias. Este comportamento foi mais evidenciado para os concretos com relação a/c 0,50 e 0,60.

Ainda de acordo com a Figura 69, os concretos com percentual de 10% de adição de RBROTT sobre relação a/c de 0,6 situaram-se nos mesmos

patamares que a relação a/c 0,50, indicando efeito físico de preenchimento dos poros. O melhor desempenho dos concretos com adição de 10% foi evidenciado na relação a/c de 0,60 e idade de 91 dias, ao compararmos com concretos produzidos com relação a/c de 0,50 sem adição de resíduo. Ou seja, é possível verificar que a adição de 10% de RBROTT no concreto com relação a/c 0,6 faz com que este seja equivalente a um concreto sem adição com relação a/c 0,5. Este efeito se deve, além do efeito físico de preenchimento dos poros, uma possível atividade pozolânica, tendo em vista que este resíduo tratado termicamente se comporta como uma pozolana. O comportamento do concreto para a relação a/c 0,6 traz consequências positivas imediatas no que diz respeito à diminuição do consumo de cimento das misturas produzidas.

4.2.2.2 Ensaio acelerado de migração de cloretos – ASTM C1202-12

No capítulo 4 ficou claro que foram utilizados 3 corpos de prova de 50x100mm para cada traço de concreto. Esses 3 corpos de prova foram obtidos de um único corpo de prova cilíndrico de 100x200mm (diâmetro x altura). Porém, observou-se que o corpo de prova extraído do topo apresentou valores de carga passante muito superior aos 2 corpos de prova extraídos das camadas inferiores. Uma possível explicação para esse ocorrido é que o concreto não é perfeitamente homogêneo em sua extensão, de forma que o corpo de prova extraído do topo deve possuir maior porosidade.

Medeiros *et al.* (2012) realizaram um estudo com o intuito de averiguar se há diferença significativa entre as camadas de um mesmo corpo de prova. Nesse estudo chegaram à conclusão de que não existe influência significativa nos resultados de profundidade de penetração de íons cloreto para as diferentes camadas de um mesmo corpo de prova. Porém, os corpos de prova utilizados por Medeiros *et al.* (2012) foram adensado em mesa vibratória, sendo que no presente estudo o adensamento foi realizado com haste metálica, o que pode justificar a diferença de homogeneidade das camadas. Além disso, outros fatores podem ter contribuído para Medeiros *et al.* (2012) poderem afirmar que não há diferença entre as camadas. Um desses fatores é a voltagem aplicada no ensaio, que foi de 30V, enquanto a ASTM C1202 (ASTM, 2012) recomenda a voltagem de 60V.

Para minimizar o efeito dessa variável de ruído e garantir a homogeneidade das amostras, resolveu-se descartar os corpos de prova extraídos do topo, utilizando apenas os 2 corpos de prova extraídos das camadas inferiores. Na Tabela 26 estão expressos os resultados médios de carga total passante, sendo possível encontrar no Apêndice B todos os resultados individuais, inclusive aqueles que foram descartados.

Tabela 26: Carga total passante média

Concreto	28 dias			91 dias		
	C	σ	CV	C	σ	CV
Ref - 0,4	3699,00	0,00	0,00%	3213,00	292,74	9,11%
5% - 0,4	3609,00	229,10	6,35%	2187,00	12,73	0,58%
10% - 0,4	3465,00	547,30	15,80%	1314,00	95,46	7,26%
Ref - 0,5	3757,50	248,19	6,61%	3231,00	76,37	2,36%
5% - 0,5	3951,00	190,92	4,83%	2367,00	12,73	0,54%
10% - 0,5	3141,00	356,38	11,35%	1300,50	95,46	7,34%
Ref - 0,6	4581,00	890,95	19,45%	3883,50	235,47	6,06%
5% - 0,6	3753,00	381,84	10,17%	2844,00	127,28	4,48%
10% - 0,6	2596,50	120,92	4,66%	1435,50	146,37	10,20%

Notas: C - Carga total passante (Coulomb)

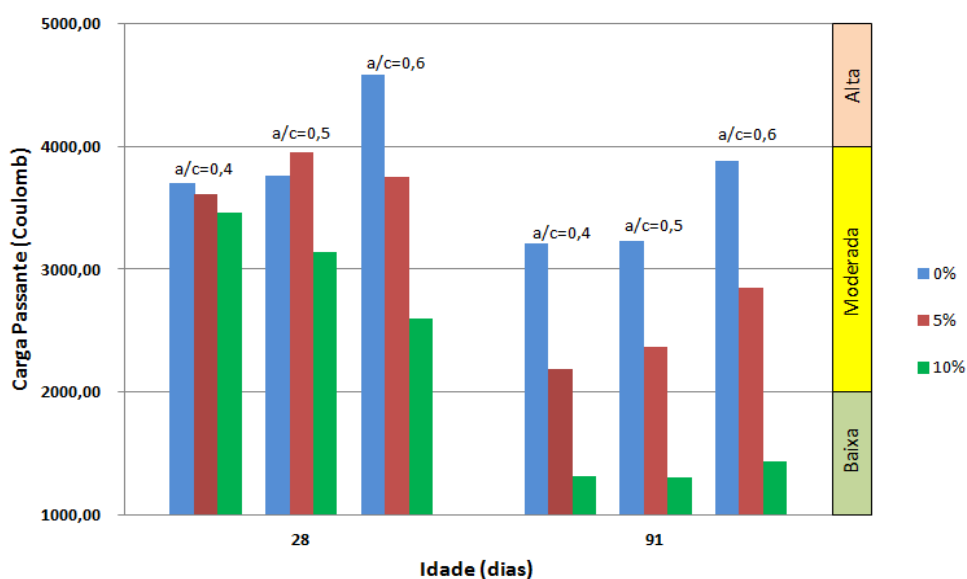
σ - Desvio padrão

CV - Coeficiente de Variação

Fonte: Acervo pessoal.

A partir da Tabela 26 construiu-se o gráfico apresentado na Figura 70. Nessa figura é possível avaliar o comportamento dos valores absolutos de carga total passante frente às variáveis idade, teor de adição e relação a/c.

Figura 70: Carga passante nas idades de 28 e 91 dias



Fonte: Acervo pessoal.

Para a idade de 28 dias é possível perceber que a adição de RBROTT teve maior influência sobre os concretos com relação a/c 0,6. Já para a idade de 91 dias todos os concretos, inclusive o concreto com relação a/c 0,4 foram influenciados de forma positiva e significativa devido ao aumento do teor de RBROTT.

Na Figura 70 também é possível avaliar os concretos de forma qualitativa de acordo com os valores de carga total passante. Entre todos os concretos, aquele que apresentou o pior resultado foi o concreto 0%-0,6 com idade de 28 dias, pois o risco de penetração de cloretos foi considerado alto. Nessa mesma idade os demais concretos se enquadraram no intervalo de probabilidade de corrosão moderada. Já na idade de 91 dias tanto os concretos referência como os concretos com 5% de adição apresentaram probabilidade de corrosão moderada. Em contrapartida, todos os concretos com 10% de adição aos 91 dias apresentaram baixo risco de penetração de cloretos, sendo estes os melhores resultados obtidos. O mesmo comportamento foi observado quando analisou-se a resistência à compressão dos concretos, pois as maiores resistências foram obtidas na idade de 91 dias e teor de adição de 10%.

Para avaliar de forma estatística a influência das variáveis (a/c, idade e teor de adição) sobre a carga total passante nos concretos torna-se necessário, além da análise dos valores absolutos, avaliar de forma estatística o comportamento do concreto frente a tais variáveis. Para isso, submeteu-se os resultados à Análise de Variância (ANOVA), realizada através do programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

4.2.2.2.1 Análise de variância da carga total passante

A análise de variância da carga total passante está apresentada na Tabela 27. Foi considerado um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Para avaliar se determinada variável ou interação entre variáveis teve influência sobre carga total passante, analisou-se o p-valor fornecido pela análise de variância. A variável ou interação é considerada como tendo influência significativa caso seu p-valor seja inferior à 0,05.

É possível observar na Tabela 27 que a relação a/c não teve influência significativa sobre a carga total passante assim como as interações entre a relação a/c – idade e também a/c-idade-%adição.

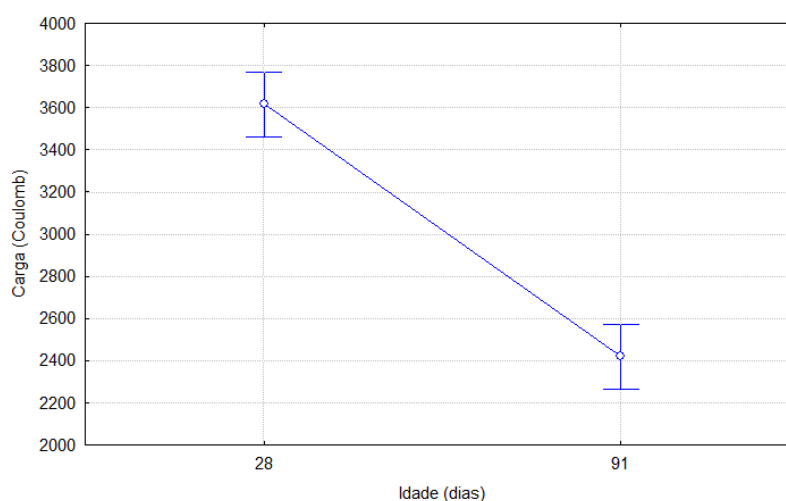
Tabela 27: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na carga total passante

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
a/c	495482	2	247741	2,565	0,104674	Não Significativo
idade	12906056	1	12906056	133,629	0,000000	Significativo
% adição	14020511	2	7010255	72,584	0,000000	Significativo
a/c - idade	342257	2	171128	1,772	0,198412	Não Significativo
a/c - % adição	1646591	4	411648	4,262	0,013366	Significativo
Idade - % adição	2027138	2	1013569	10,494	0,000953	Significativo
a/c - idade - % adição	444037	4	111009	1,149	0,365470	Não Significativo

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 71 é possível analisar de forma isolada o efeito da idade do concreto sobre a carga total passante.

Figura 71: Efeito isolado da idade sobre a carga total passante



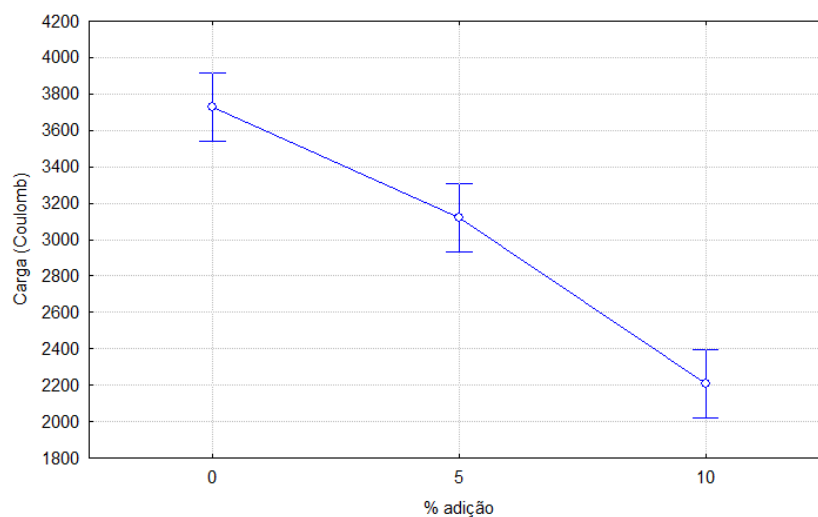
Fonte: Acervo pessoal.

De acordo com a Figura 72 verifica-se uma redução de 33,11% da carga total passante com a idade. A redução com a idade era um comportamento esperado, visto que o concreto com 91 dias está com seus compostos em estado mais avançado de hidratação se comparado ao concreto aos 28 dias, o que dificulta a penetração dos íons cloreto. Porém, esperava-se uma redução menor, visto que o cimento utilizado foi o CPV-ARI. No trabalho de Schneider (2005) é possível observar redução média da carga total passante de 12,33%

para concretos confeccionados com CPV-ARI sem adição (também no intervalo de 28 a 91 dias). Logo, é possível que a redução de 33,11% se deva principalmente aos concretos que receberam adição do RBROTT. Isso será mais bem observado na análise entre a interação do percentual de adição e idade, que será discutido posteriormente (ver Figura 73).

Para o presente estudo, a análise mais importante é o efeito da adição pozolânica (RBROTT) sobre a capacidade do concreto em resistir à penetração dos íons cloreto. Na Figura 72 é possível observar de forma isolada o efeito do aumento do teor de adição sobre a capacidade do concreto em resistir à penetração dos cloretos.

Figura 72: Efeito isolado do percentual de adição sobre a carga total passante

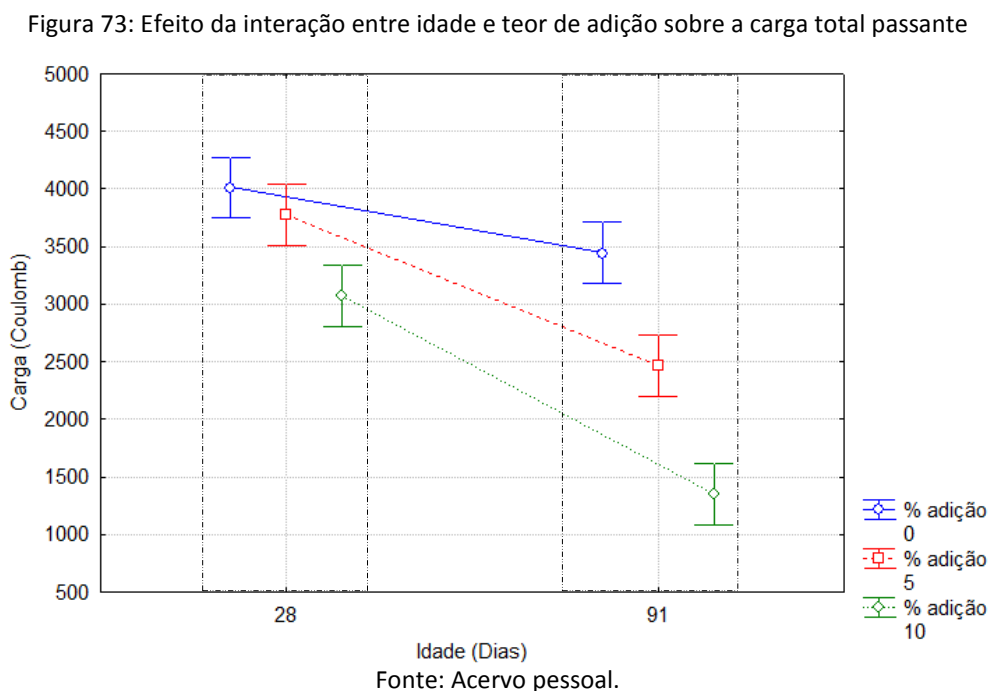


Fonte: Acervo pessoal.

Visto que a carga total passante diminuiu de maneira significativa com o aumento dos teores de adição, é possível concluir que o RBROTT foi capaz de reduzir a porosidade do concreto devido à possível reação pozolânica com os álcalis do cimento que formaram barreiras físicas capazes de reduzir a migração dos íons. Além da reação pozolânica, outro ponto importante e que pode ter influenciado de maneira significativa na redução da carga total passante é que os cloretos ao penetrarem no concreto tendem a se ligar quimicamente com o aluminato tricálcico (C_3A) formando um composto estável, como foi descrito por Uysal e Akyuncu (2012). Um dos compostos que participam da formação do C_3A é a alumina (Al_2O_3), que representa apenas 4,87% do CPV-ARI enquanto que o RBROTT possui 23,42%. Dessa forma, é

possível que a maior presença de Al_2O_3 tenha propiciado uma maior formação de C_3A , que foi capaz de se ligar quimicamente aos íons Cl^- e reduzir a carga total passante. No capítulo 4.2.2.5 este comportamento será mais bem discutido.

Na Figura 73 verifica-se a interação do percentual de adição e idade, que também se apresentou estatisticamente significativa sobre o comportamento da carga total passante.

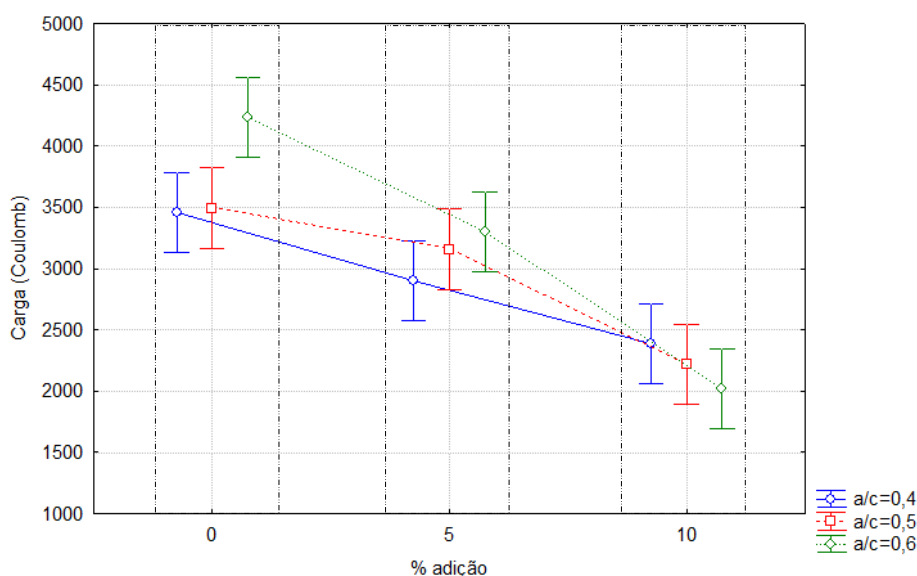


É possível observar que na idade de 28 dias, a carga total passante para os 3 teores de adição foram muito próximas, tendo como melhor resultado os concretos com 10% de adição. Já para a idade de 91 dias, observa-se uma diminuição da carga passante para os concretos com 5% e 10% de adição. O concreto referência apresentou uma redução na carga total passante de 14,20% dos 28 para os 91 dias. Já o concreto com 5% de adição apresentou uma redução de 34,61% da carga total passante enquanto o concreto com 10% de adição teve redução de 55,99%. O fato de os concretos com adição terem uma redução da carga total passante muito maior do que o concreto referência se deve possivelmente à reação mais lenta da pozolana se comparada às reações do cimento. Dessa forma, é possível concluir que a possível atividade pozolânica do RBROTT contribuiu para reduzir a penetração de cloretos, tendo maior eficácia para idades superiores. Shaikh e Supit (2015) observaram um

comportamento semelhante ao trabalharem com substituição do cimento por cinza volante. Houve uma redução da carga passante de apenas 15,31% no concreto referência dos 28 para os 90 dias, enquanto o concreto com 8% de cinza volante apresentou uma redução de 68,04% da carga passante.

Na Figura 74 é possível analisar a interação entre o percentual de adição e relação a/c.

Figura 74: Efeito conjunto do teor de adição e relação a/c sobre a carga total passante



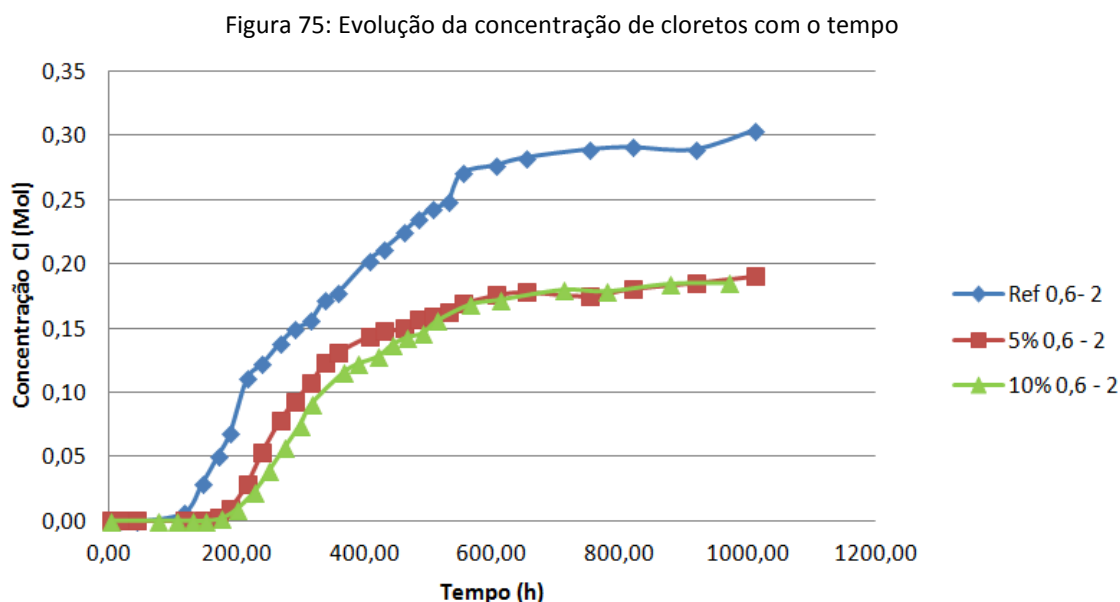
Fonte: Acervo pessoal.

Assim como na Figura 72 é possível observar que a carga total passante diminui devido ao aumento da adição. Além disso, verifica-se que a carga total passante para os concretos com 5% de adição e 10% de adição praticamente igualou a carga passante para as três relações a/c (0,4; 0,5; 0,6). Dessa forma é possível afirmar que um concreto com relação a/c 0,6 e 10% de adição apresentou a mesma capacidade de resistir à penetração de cloretos que o concreto com relação a/c 0,4 e 10% de adição. Isso comprova uma potencial atividade pozolânica e uma maior capacidade de refinar os poros de concretos com relações a/c maiores.

A informação mais importante que se pode extrair do gráfico apresentado na Figura 74 é que os concretos com relação a/c de 0,6 e 10% de adição apresentaram carga total passante inferior ao concreto referência-0,4. Ou seja, o concreto com menor consumo de cimento (relação a/c 0,6) superou o concreto com maior consumo de cimento (relação a/c 0,4) devido a uma possível adição pozolânica.

4.2.2.3 Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987-14

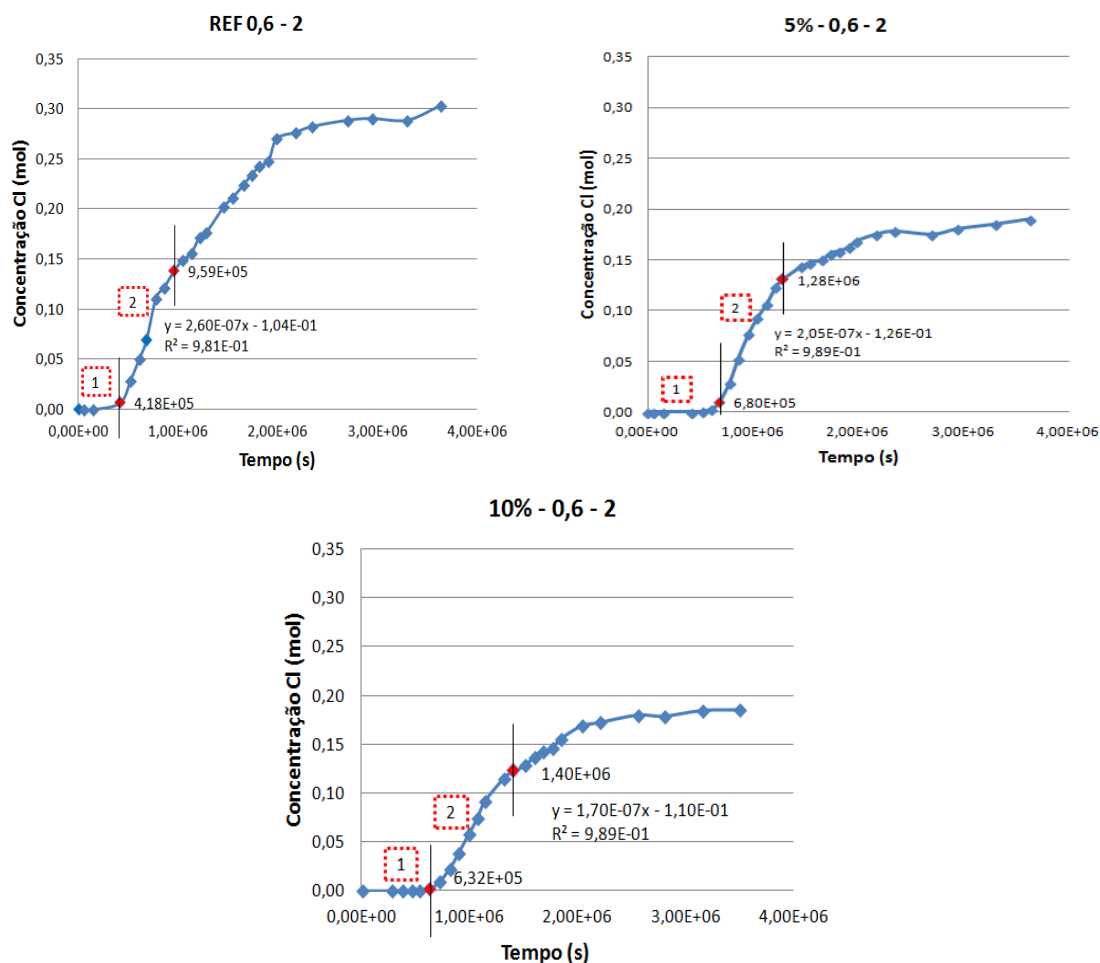
Os gráficos obtidos nesse ensaio seguiram o padrão de comportamento estabelecido pela UNE 83987 (UNE, 2014). Na Figura 75 pode ser visto como exemplo os gráficos gerados para os concretos com relação a/c 0,6.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 76 estão expressos os gráficos da forma como foram utilizados para obtenção dos coeficientes de difusão.

Figura 76: Gráficos utilizados para obtenção dos coeficientes de difusão.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 76 observa-se que no início do ensaio as concentrações de cloretos se mantêm praticamente constantes e próximas à zero. Essa etapa 1 é chamada de período não estacionário, sendo este o intervalo de onde se obteve o coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}). Após essa etapa, inicia-se a etapa 2, em que se observa um comportamento linear de aumento da concentração de cloretos até que este comportamento se encerre. A partir da etapa 2, de comportamento linear, foi obtido o coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s). No Apêndice D podem ser observados todos os gráficos obtidos de acordo com a UNE 83987 (UNE, 2014) para todos os concretos ensaiados.

Os valores médios de D_{ns} e D_s estão apresentados na Tabela 28, sendo obtidos a partir da média de dois valores extraídos de um mesmo concreto. No Apêndice C estão apresentados todas as leituras obtidas nesse ensaio e nos

Apêndices E e F estão apresentados os valores individuais de coeficiente de difusão.

Tabela 28: Coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário

Concreto	D _{ns}	σ	CV	D _s	σ	CV
Ref - 0,4	6,63E-08	4,54E-09	6,84%	1,64E-08	1,85E-09	11,33%
5% - 0,4	6,50E-08	8,16E-09	12,55%	2,15E-08	3,78E-10	1,76%
10% - 0,4	3,01E-08	4,05E-09	13,45%	1,35E-08	1,43E-09	10,61%
Ref - 0,5	1,23E-07	1,75E-08	14,20%	2,32E-08	2,17E-09	9,33%
5% - 0,5	6,75E-08	5,44E-09	8,06%	2,33E-08	8,83E-10	3,79%
10% - 0,5	4,95E-08	1,34E-09	2,72%	1,45E-08	1,31E-09	9,02%
Ref - 0,6	1,53E-07	3,49E-08	22,77%	3,70E-08	1,98E-09	5,34%
5% - 0,6	9,31E-08	8,74E-09	9,39%	2,69E-08	6,42E-10	2,39%
10% - 0,6	6,59E-08	3,95E-09	6,00%	2,19E-08	4,85E-10	2,22%

Notas: D_{ns} - Coeficiente de difusão no estado não estacionário (cm²/s)

D_s - Coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/s)

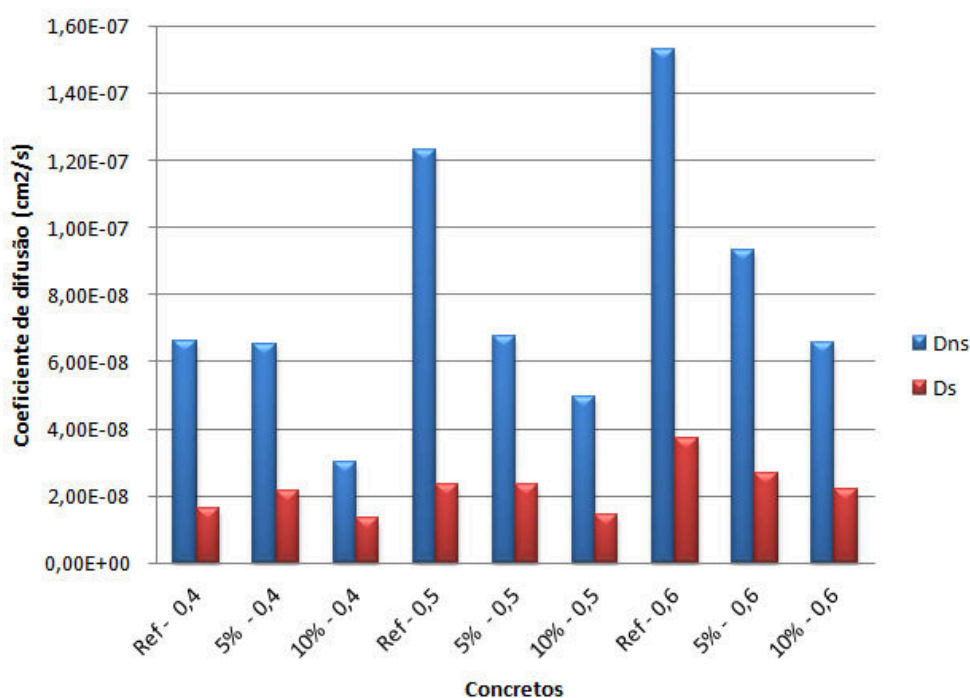
σ - Desvio padrão

CV - Coeficiente de Variação

Fonte: Acervo pessoal.

A partir da Tabela 28 construiu-se o gráfico apresentado na Figura 77 em que se pode observar o comportamento do coeficiente de difusão tanto no estado estacionário (D_s) como no estado não estacionário (D_{ns}).

Figura 77: Coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário



Fonte: Acervo pessoal.

Num primeiro momento observa-se que o coeficiente de difusão no estado não estacionário é maior do que o coeficiente de difusão no estado estacionário sendo que em média o D_{ns} foi 3,5 vezes superior aos valores apresentados por D_s . Outros autores como Ribeiro, Labrincha e Morelli (2012) encontraram esse mesmo comportamento. A norma UNE 83987 (UNE, 2014) disponibiliza em seus anexos um exemplo de cálculo dos coeficientes, sendo que o D_{ns} encontrado foi de $8,00E-08$ e o D_s foi de $2,75E-08$, ou seja, o D_{ns} foi 2,91 vezes superior ao D_s .

Em relação ao coeficiente de difusão no estado não estacionário, tanto os concretos com relação a/c 0,5 e 0,6 apresentaram diminuição do D_{ns} de acordo com o aumento do teor de adição. Já para os concretos com relação a/c 0,4, a adição de 5% proporcionou pouca redução do D_{ns} , enquanto os concretos com adição de 10% apresentaram valores inferiores aos concretos referência e aos concretos com 5% de adição, sendo este o menor valor de D_{ns} encontrado dentre todos os traços.

Para o coeficiente de difusão no estado estacionário, é possível verificar que a adição influenciou de forma mais evidente o concreto com relação a/c 0,6. Para esse concreto, tanto o teor de adição de 5% como 10% proporcionaram redução no coeficiente de difusão.

Para avaliar de forma estatística a influência das variáveis (a/c e teor de adição) sobre o coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) e estacionário (D_s) dos concretos torna-se necessário, além da análise dos valores absolutos já apresentados, avaliar de forma estatística tal comportamento. Será apresentado primeiro a análise dos valores de D_{ns} .

4.2.2.3.1 Análise de variância do coeficiente de difusão no estado não estacionário

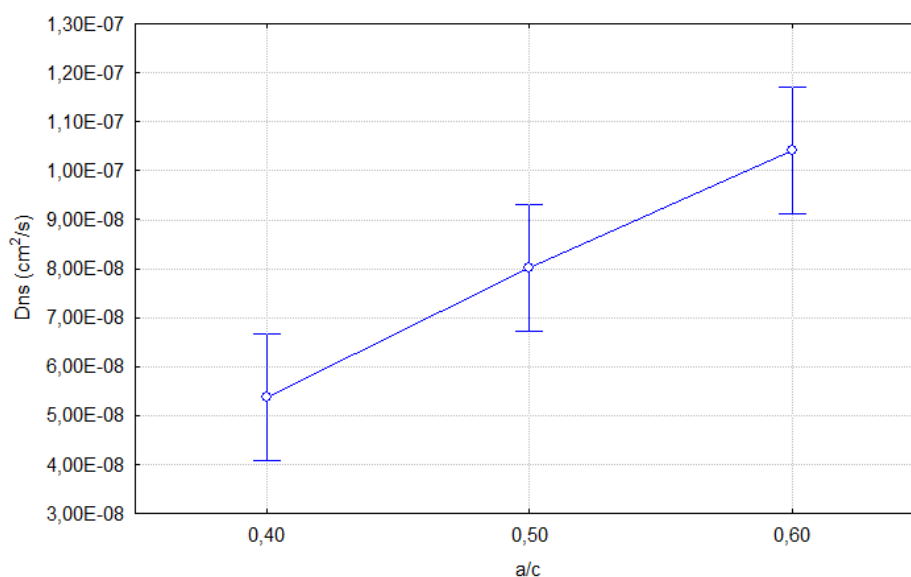
Na Tabela 29 observa-se que tanto a relação a/c quanto o percentual de adição tiveram influência sobre o coeficiente de difusão no estado não estacionário do concreto. Já a interação entre essas duas variáveis não apresentou valor significativo.

Tabela 29: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão (D_{ns})

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
a/c	0,000000	2	0,000000	19,4808	0,000537	Significativo
% adição	0,000000	2	0,000000	33,7800	0,000065	Significativo
a/c - %adição	0,000000	4	0,000000	3,1729	0,069346	Não Significativo

Fonte: Acervo pessoal.

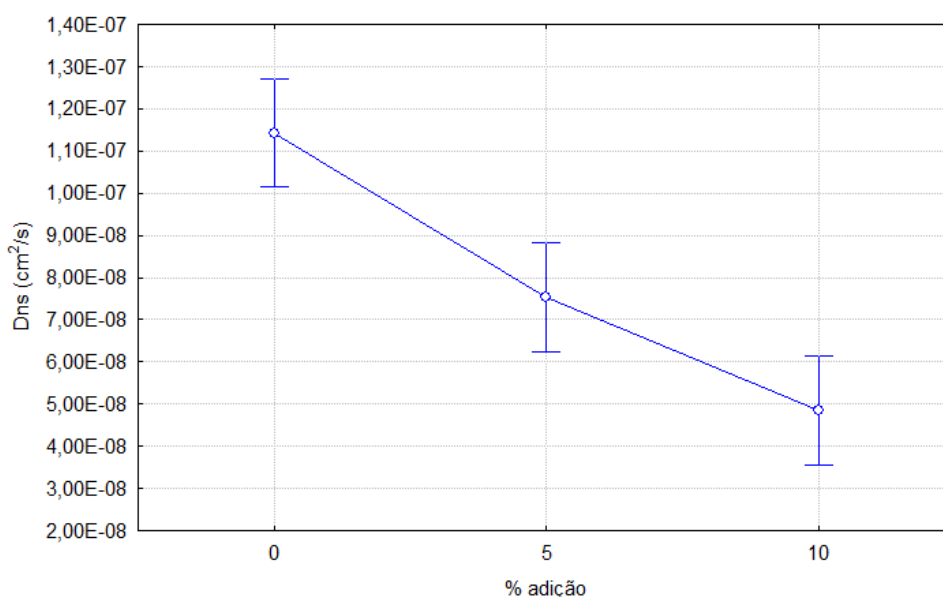
Na Figura 78 observa-se a influência da relação a/c sobre o coeficiente de difusão no estado não estacionário.

Figura 78: Efeito isolado da relação a/c sobre o coeficiente de difusão (D_{ns})

Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se que o coeficiente de difusão aumentou devido ao aumento da relação a/c. Esse comportamento já era esperado visto que o coeficiente de difusão mede a capacidade de os cloretos se difundirem pelo concreto, ou seja, quanto maior o coeficiente maior será a penetração de cloretos para um determinado período de tempo. Como o concreto com maior relação a/c tende a ser mais poroso, facilitando a penetração de agentes externos, consequentemente seu coeficiente de difusão também irá aumentar.

Na Figura 79 observa-se que o aumento do teor de adição diminuiu significativamente o coeficiente de difusão no estado não estacionário.

Figura 79: Efeito isolado do percentual de adição sobre o coeficiente de difusão (D_{ns})

Fonte: Acervo pessoal.

A redução do coeficiente de difusão foi de 34,20% para os concretos com 5% de adição e 57,59% para os concretos com 10% de adição quando comparados aos concretos referência. Este comportamento se deve a um possível refinamento dos poros devido à possível ação pozolânica do RBROTT que dificulta o ingresso dos mesmos no concreto, diminuindo assim o coeficiente de difusão.

Assim como no ensaio estabelecido pela ASTM 1202 (ASTM, 2012), outro ponto importante e que pode ter influenciado de maneira significativa na redução do D_{ns} é que os cloretos ao penetrarem no concreto tendem a se ligar quimicamente com o aluminato tricálcico (C_3A) formando um composto estável, como foi descrito por (UYSAI e AKYUNCU, 2012). Como o RBROTT possui em sua composição um percentual de alumina (Al_2O_3) superior a 20%, pode ser que a adição do RBROTT tenha propiciado a formação de C_3A , o que consequentemente interferiu na difusão dos íons para o interior do concreto. No capítulo 4.2.2.5 este comportamento será mais bem discutido.

4.2.2.3.2 Análise de variância do coeficiente de difusão no estado estacionário

Na Tabela 30 observa-se que tanto a relação a/c como o percentual de adição apresentaram influência sobre o coeficiente de difusão no estado estacionário

do concreto. Da mesma forma a interação entre essas variáveis foi considerada significativa sobre o comportamento do coeficiente de difusão no estado estacionário.

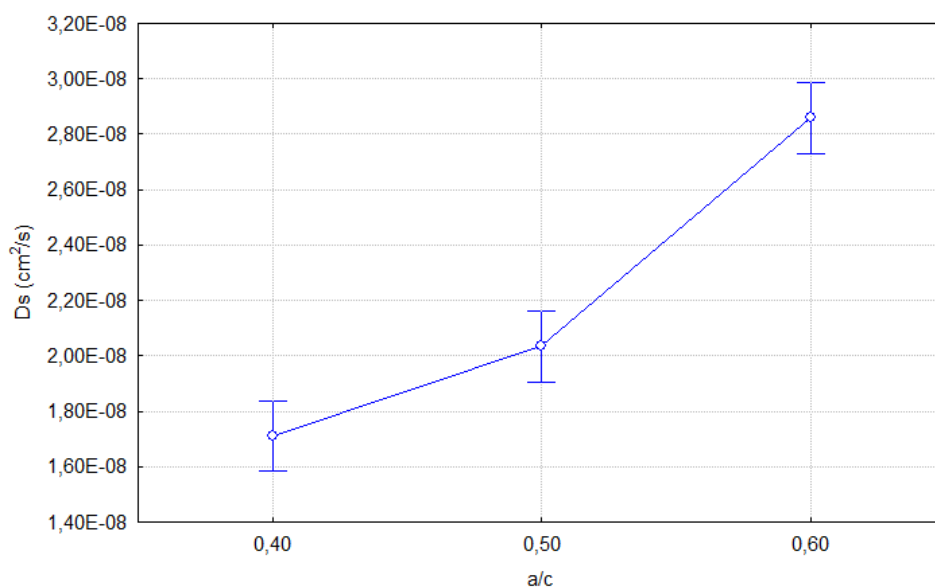
Tabela 30: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão (D_s).

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
a/c	0,000000	2	0,000000	108,879	0,000000	Significativo
% adição	0,000000	2	0,000000	69,804	0,000003	Significativo
a/c - %adição	0,000000	4	0,000000	17,647	0,000274	Significativo

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 80 observa-se de forma isolada o comportamento do coeficiente de difusão no estado estacionário de acordo com a variável relação a/c.

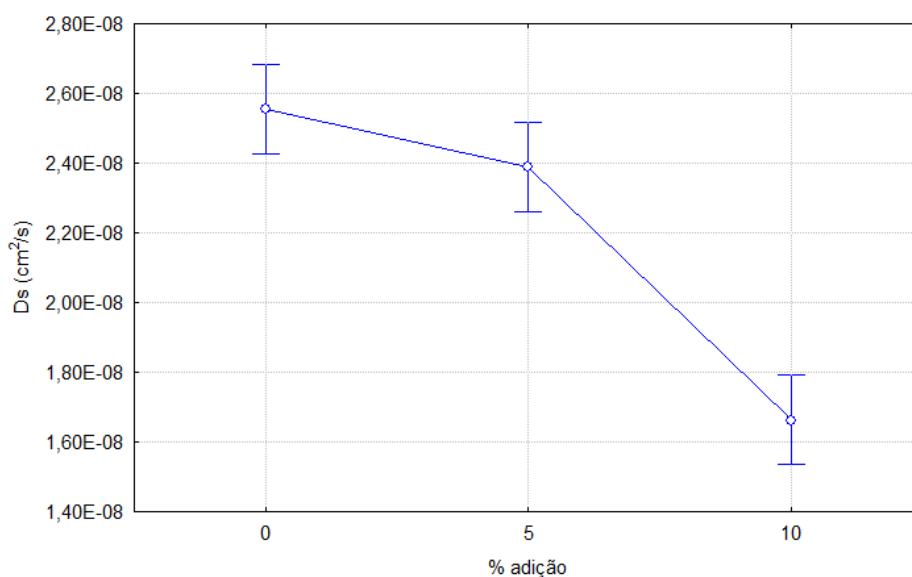
Figura 80: Efeito isolado da relação a/c sobre o coeficiente de difusão (D_s)



Fonte: Acervo pessoal.

Assim como no coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}), verifica-se que houve um aumento apreciável do D_s à medida que se aumentou a relação a/c. O provável motivo para esse comportamento é o aumento da porosidade do concreto devido ao aumento da relação a/c.

Na Figura 81 é possível observar a influência do teor de adição sobre o coeficiente de difusão no estado estacionário do concreto.

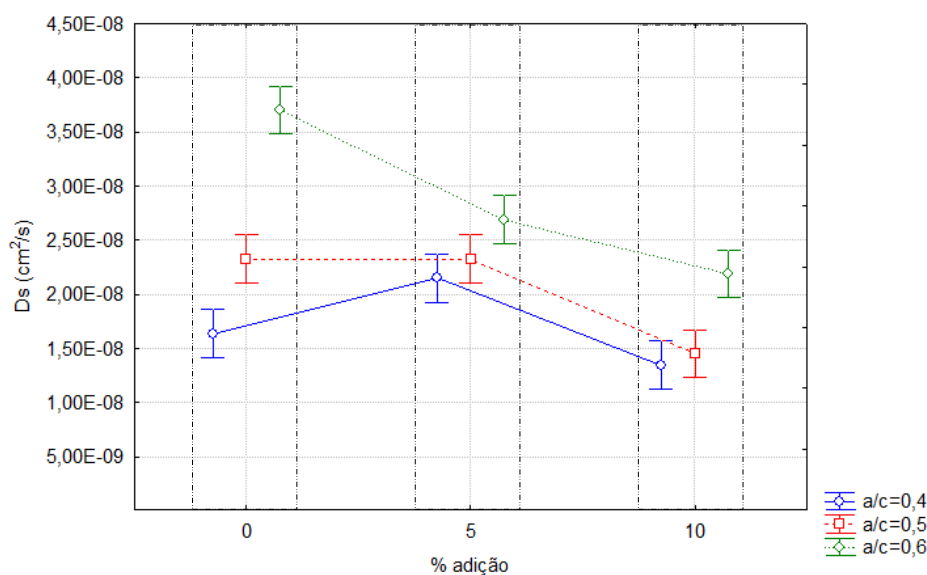
Figura 81: Efeito isolado do teor de adição sobre o coeficiente de difusão (D_s)

Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se que houve uma diminuição à medida que se aumentou o percentual de adição. Além disso, também é possível verificar que a diminuição devido à adição de 5% foi menos significativa quando comparada à influência da adição de 10%, sendo de 6,48% para os concretos com 5% de adição e 34,89% para os concretos com 10% de adição. Uma possível explicação é o fato de o percentual de 5% de adição ainda ser pouco para provocar um efeito de preenchimento dos poros de forma apreciável.

Para o D_{ns} , uma possível explicação para a influência do percentual de adição, além do efeito pozolânico, foi que os cloretos ao penetrarem no concreto tendem a se ligar quimicamente com o aluminato tricálcico (C_3A) formando um composto estável. Porém, segundo Castellote, Andrade e Alonso (2001), o D_s leva em consideração apenas o transporte iônico, enquanto D_{ns} também leva em conta a ligação dos cloretos com as fases da pasta. Com isso, o argumento de que a redução do coeficiente de difusão no estado estacionário se deve à ligação dos íons cloreto com o aluminato tricálcico não é válido. Talvez seja por esse motivo que o D_{ns} apresentou maiores reduções devido à adição do RBROTT do que o D_s . A comparação dos resultados obtidos está melhor representada na Tabela 33.

O efeito da interação entre o teor de adição e a relação a/c sobre o coeficiente de difusão no estado estacionário pode ser observado na Figura 82.

Figura 82: Efeito conjunto da relação a/c e teor de adição sobre o coeficiente de difusão (D_s)

Fonte: Acervo pessoal.

Verifica-se que a adição teve maior influência sobre o concreto com relação a/c 0,6, havendo redução de 40,81% do coeficiente de difusão do concreto referência para o concreto com 10% de adição. Isso se deve ao fato de que o concreto com relação a/c 0,6 é teoricamente o mais poroso, de tal forma que a pozolana é possivelmente capaz de preencher parte desses poros através das reações pozolânicas e reduzir o coeficiente de difusão. Para a relação a/c 0,5, a adição de 5% não foi capaz de reduzir o D_s se comparado ao concreto referência, porém a adição de 10% diminui o D_s em 37,53%.

O concreto com relação a/c 0,4 e 5% de adição apresentou um aumento do coeficiente de difusão de 31,09% quando comparado ao concreto referência e relação a/c 0,4. Uma possível explicação para esse comportamento seria a diferença no grau de homogeneização na etapa de moldagem dos corpos de prova para o concreto 0,4-5%. Possivelmente o corpo de prova do concreto 0,4-5% selecionado apresentou uma maior rede de poros, resultado em um concreto menos resistente. Este comportamento também foi observado nos resultados mecânicos de resistência à compressão (para o ensaio de resistência à compressão, esse mesmo traço apresentou valores espúrios, que foram excluídos). Mesmo havendo esse comportamento, o D_s para o concreto 0,4-5% se apresentou inferior aos concretos 0,5-5% e 0,6-5%, o que era de se esperar. Já o concreto com relação a/c 0,4 com 10% de adição apresentou o

menor coeficiente de difusão dentre todos os concretos, porém a redução foi de apenas 17,54% quando comparada ao concreto referência 0,4. Isso se deve ao fato de o concreto com relação a/c 0,4 possuir a menor porosidade dentre os concretos estudados, de tal maneira que a adição pozolanica surtiu menor efeito na redução dos poros.

4.2.2.3.3 Determinação da vida útil do concreto a partir do coeficiente de difusão no estado estacionário.

Com o intuito de evidenciar o efeito das adições sobre os concretos decidiu-se calcular a vida útil dos mesmos a partir do coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s). Para isso, utilizou-se a segunda lei de difusão de Fick de acordo com as Equações 11 e 12.

$$PC = 2(z)\sqrt{D_s \cdot t} \quad (\text{Equação 11})$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (\text{Equação 12})$$

PC: é a profundidade em que a concentração de cloretos atinge o limite para que ocorra a despassivação da armadura (cm);

Ds: é o coeficiente de difusão no estado estacionário;

t: é o tempo de vida útil, ou seja, o tempo em que ocorrerá a despassivação da armadura (anos);

erf(z): é a função Gaussiana de erros, a partir da qual se obtém o valor de z, que é tabelado;

Ccl: é a concentração de cloretos em função da profundidade e do tempo (%);

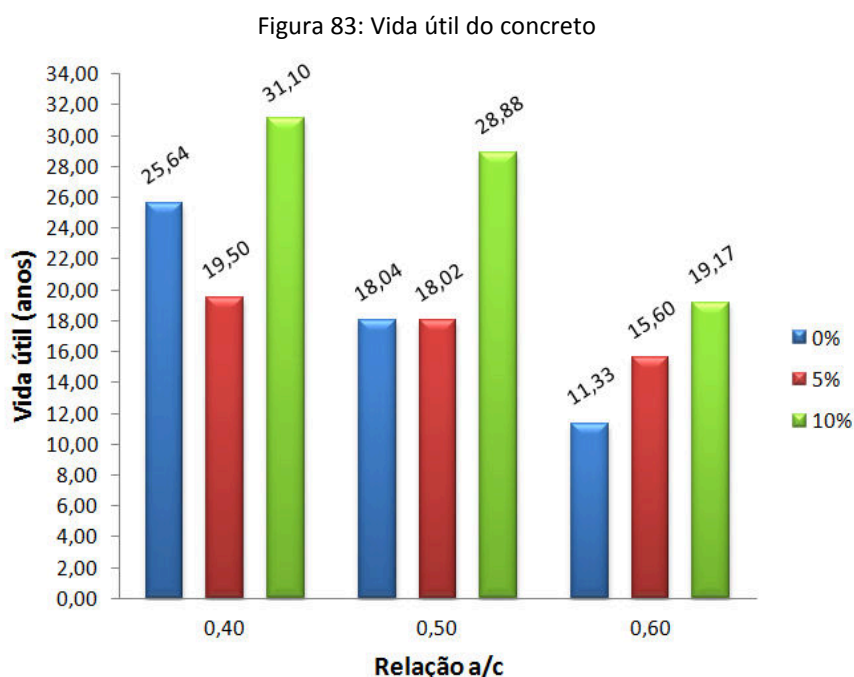
Cs: é a concentração de cloretos na superfície do concreto (%);

Co: é a concentração inicial de cloretos (%).

Para o valor de PC considerou-se o valor de 4 cm, que é o valor mínimo de cobrimento da armadura exigido pelo norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para ambientes com classe de agressividade III (ambiente marinho e industrial), tanto para lajes como para vigas e pilares. Para o valor de Ccl tomou-se a concentração de 0,4% de Cl- em relação à massa de cimento que, segundo Cascudo (1997) é o valor de consenso para a maioria das normas, posto como

índice máximo admitido (abaixo desse valor não ocorre despassivação da armadura). Já para o valor de C_s , que é a concentração de cloretos na superfície do concreto, tomou-se como valor 0,93% de cloretos em relação à massa de cimento. Esse valor foi obtido do trabalho desenvolvido por Helene (1993) para concretos submetidos à névoa salina. Para C_0 , que é a concentração inicial de cloretos (no tempo 0), tomou-se como valor 0%.

Na Figura 83 pode ser visto o gráfico que estabelece a vida útil de acordo com o tipo de concreto produzido, sendo a vida útil definida como o tempo necessário para que os cloretos penetrem 4 cm no concreto e deem início ao processo de corrosão da armadura. Vale ressaltar que os valores obtidos são função de parâmetros pré-determinados, sendo que na prática a vida útil do concreto pode ser maior ou menor, dependendo das condições de exposição.



Fonte: Acervo pessoal.

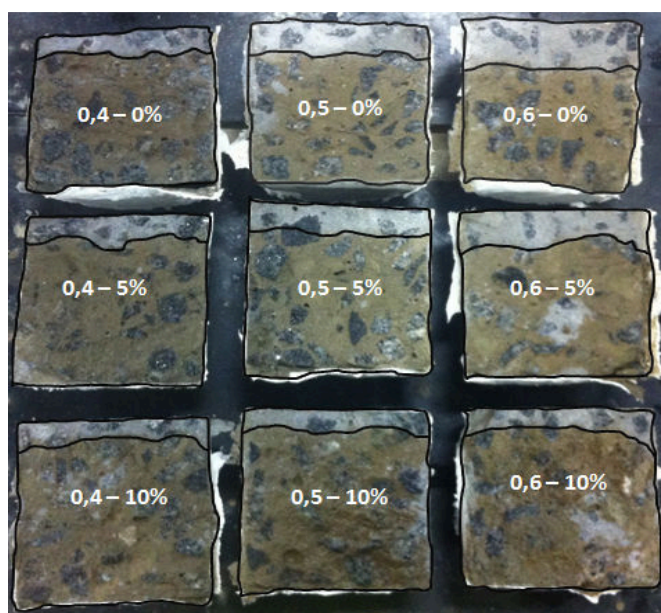
Na Figura 83 verifica-se que para todas as relações a/c o percentual de adição de 10% proporcionou os melhores resultados de vida útil. Para as relações a/c 0,4, 0,5 e 0,6 a adição de 10% proporcionou o aumento da vida útil em 21,29%, 60,09% e 69,19% respectivamente. Mais uma vez é possível observar que a adição de 10% proporcionou melhorias mais significativas para concretos com maior relação a/c devido ao fato de serem mais porosos. Para os concretos com adição de 5%, observa-se que para a relação a/c 0,6 houve um aumento

da vida útil de 37,69%. Já para os concretos com relação a/c 0,5 observou-se que o concreto com adição de 5% apresentou o mesmo resultado que o concreto referência. Para o concreto com relação a/c 0,4 houve redução na vida útil em 23,95% devido à adição de 5%, sendo que esta redução é devida possivelmente ao fato do concreto com relação a/c 0,4 e 5% de adição selecionado para o ensaio ter apresentado algum desvio em relação aos demais, possivelmente devido a algum erro ocorrido no processo de moldagem dos corpos de prova.

4.2.2.4 Ensaio de penetração de cloretos - NT Build 443-95

Para este ensaio foram utilizados 3 corpos de prova de 100x100mm para cada traço de concreto em cada idade. Aos 28 dias os corpos de prova foram imersos em solução salina, permanecendo nessa solução por 63 dias. Além dessa idade, os corpos de prova também foram ensaiados aos 91 dias de idade, permanecendo em solução por 63 dias. Para cada idade, rompeu-se os corpos de prova diametralmente e mediu-se a profundidade de penetração de cloretos utilizando nitrato de prata como indicador colorimétrico. Quando o nitrato de prata entra em contato com cloretos livres ocorre uma reação que se caracteriza por uma coloração branca. Na Figura 84 pode ser visto com clareza a profundidade de penetração dos cloretos.

Figura 84: Corpos de prova após aspersão de nitrato de prata



Fonte: Acervo pessoal.

Na Tabela 31 estão apresentados os valores médios das profundidades. No Apêndice G é possível verificar os valores individuais para cada corpo de prova.

Tabela 31: Profundidade de penetração

Concreto	28 dias			91 dias		
	P	σ	CV	P	σ	CV
Ref - 0,4	20,05	1,67	8,32%	16,64	0,40	2,39%
5% - 0,4	17,67	1,20	6,78%	15,83	1,21	7,67%
10% - 0,4	12,64	0,84	6,66%	10,81	0,70	6,52%
Ref - 0,5	24,57	0,94	3,85%	21,38	0,18	0,84%
5% - 0,5	21,17	0,32	1,52%	19,60	0,42	2,14%
10% - 0,5	13,17	0,46	3,53%	10,79	1,87	17,36%
Ref - 0,6	33,38	2,33	6,98%	30,40	1,04	3,42%
5% - 0,6	22,33	0,80	3,59%	22,79	1,36	5,98%
10% - 0,6	16,29	0,62	3,82%	14,10	1,04	7,35%

Notas: P - Profundidade de penetração (mm)

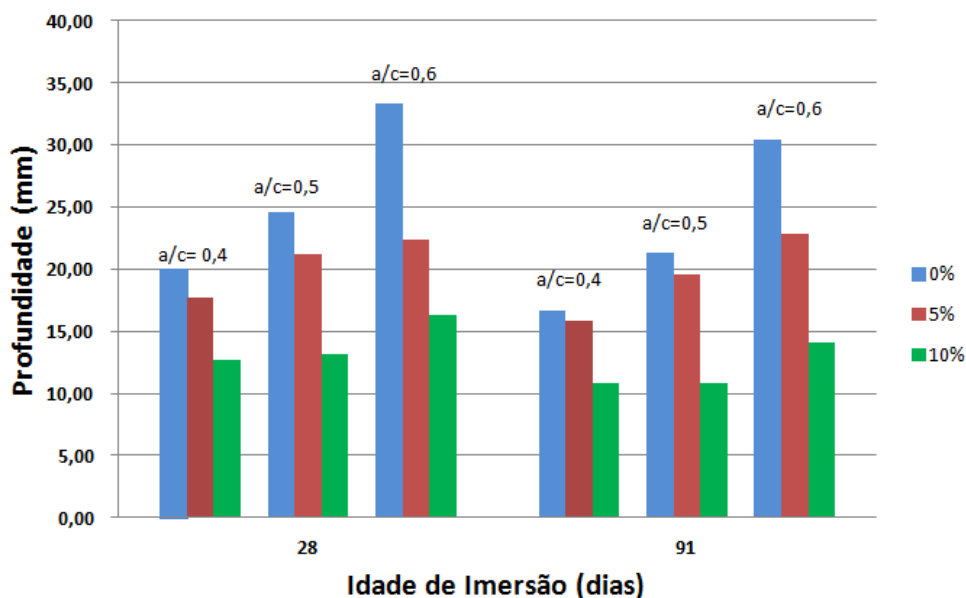
σ - Desvio padrão

CV - Coeficiente de Variação

Fonte: Acervo pessoal.

A partir da Tabela 31 construiu-se o gráfico apresentado na Figura 85.

Figura 85: Profundidade de penetração de cloretos



Fonte: Acervo pessoal.

É possível observar que a relação a/c teve maior influência na profundidade de penetração para os concretos referência, ou seja, os concretos sem adição de

RBROTT apresentaram aumento na profundidade de penetração à medida que se aumentou a relação a/c. Para os concreto com 5% e 10% de adição observa-se que a relação a/c teve menor influência na profundidade de penetração. Esse mesmo comportamento foi observado nos coeficientes de difusão encontrados no ensaio da UNE 83987 (UNE, 2014).

Na Figura 85 observa-se que a idade teve menor influência sobre a profundidade de penetração, diferente do que ocorreu no ensaio realizado de acordo com a ASTM C1202 (ASTM, 2012), que também foi realizado nas idades de 28 e 91 dias. Essa diferença se deve ao fato de que o ensaio realizado segundo a ASTM C1202 (ASTM, 2012) teve duração de apenas 6 horas, de forma que os resultados foram obtidos exatamente na idade do ensaio. Já o ensaio de imersão realizado segundo a NT Build 443-95 teve duração de 63 dias para cada idade, permitindo que os compostos do cimento continuassem em processo de hidratação durante o ensaio.

Para avaliar de forma estatística a influência das variáveis (a/c, idade e teor de adição) sobre a profundidade de penetração, realizou-se a análise de variância.

4.2.2.4.1 Análise de variância da profundidade de penetração de cloretos

A partir da análise estatística obteve-se a Tabela 32. Nela é possível observar que as três variáveis (a/c, idade e teor de adição) apresentaram, de forma isolada, influência sobre o comportamento da profundidade de penetração. Além das variáveis isolada, a interação entre a relação a/c e o percentual de adição também foram significativos, assim como a interação entre a idade e o percentual de adição.

Tabela 32: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na profundidade de penetração

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
a/c	532,02	2	266,01	213,20	0,000000	Significativo
idade	59,72	1	59,72	47,86	0,000000	Significativo
% adição	1195,60	2	597,80	479,11	0,000000	Significativo
a/c - idade	1,91	2	0,95	0,77	0,472598	Não significativo
a/c - % adição	185,11	4	46,28	37,09	0,000000	Significativo
Idade - % adição	10,96	2	5,48	4,39	0,019646	Significativo
a/c - idade - % adição	3,15	4	0,79	0,63	0,642900	Não significativo

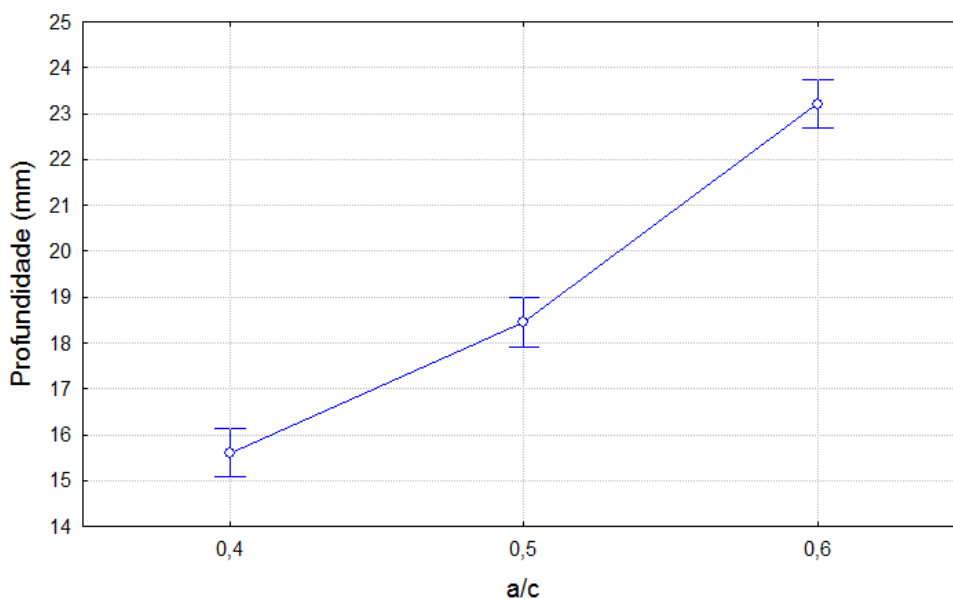
Fonte: Acervo pessoal.

Para avaliar de que forma essas variáveis influenciaram a profundidade de penetração, deve-se fazer a análise gráfica, buscando entender o comportamento da profundidade de penetração.

Vale lembrar que esse ensaio é o que mais representa uma situação real em que os cloretos penetraram por difusão nos concreto, pois nos demais ensaios apresentados anteriormente, os cloretos penetraram por migração devido a atração de uma carga positiva gerada por uma diferença de potencial aplicada.

Analizando a Figura 86 é possível verificar que, assim como nos demais ensaios já apresentados, o aumento da relação a/c proporcionou o aumento da profundidade de penetração, mostrando mais uma vez que o concreto teve um aumento da porosidade, permitindo que os íons penetrassem em profundidades maiores à medida que se aumentou a relação a/c .

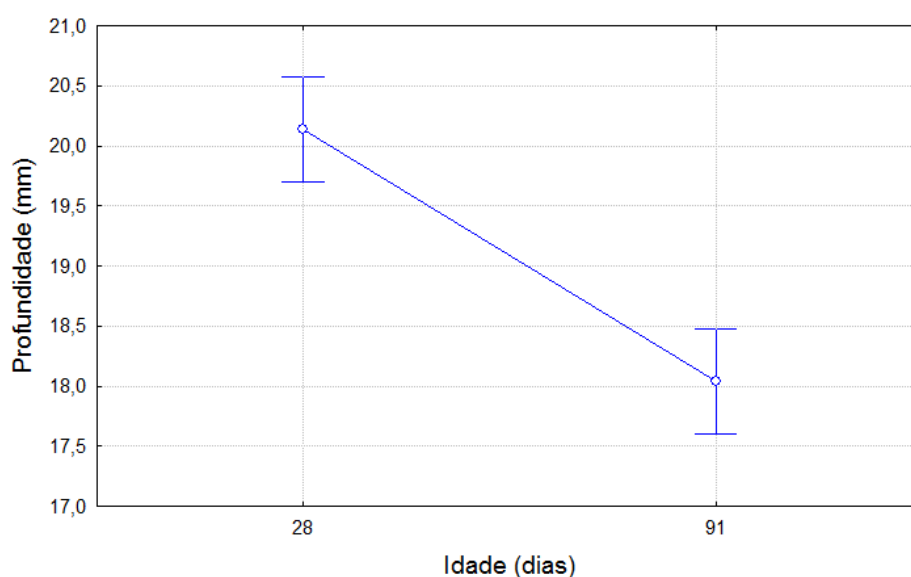
Figura 86: Efeito isolado da relação a/c sobre a profundidade de penetração



Fonte: Acervo pessoal.

Outro resultado que era esperado nesse ensaio é o comportamento de penetração devido ao aumento da idade. É sabido que o concreto com idade mais avançada apresenta o grau de hidratação dos compostos mais elevado o que diminui a porosidade do concreto e conseqüentemente dificulta o ingresso de agentes externos. Na Figura 87 verifica-se esse comportamento, em que a profundidade de penetração diminuiu com o aumento da idade.

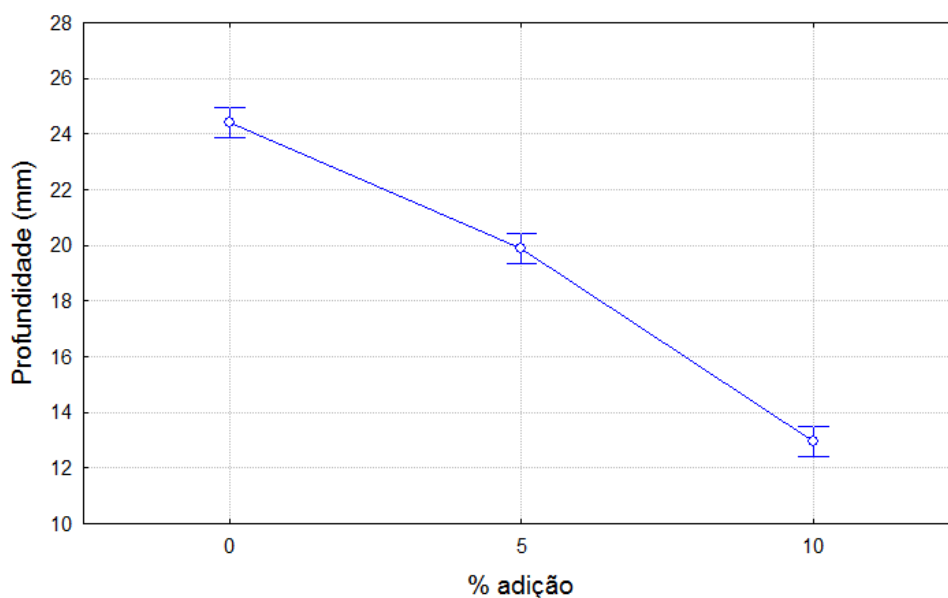
Figura 87: Efeito isolado da idade sobre a profundidade de penetração



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 88 é possível analisar a influência do teor de adição de forma isolada sobre a profundidade de penetração. Percebe-se que o aumento do teor de adição proporcionou a diminuição da profundidade de penetração assim como os resultados obtidos nos ensaios anteriores, provando mais uma vez que a adição de RBROTT dificultou o ingresso de íons cloreto no interior do concreto.

Figura 88: Efeito isolado do teor de adição sobre a profundidade de penetração

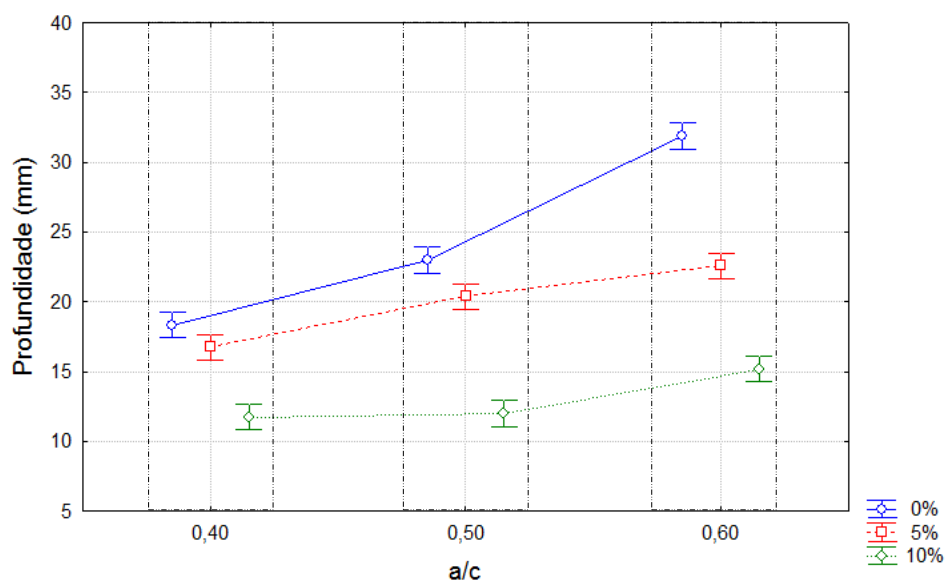


Fonte: Acervo pessoal.

A interação entre as variáveis a/c e percentual de adição também foi significativa sobre a profundidade de penetração. Na Figura 89 verifica-se a

diminuição da profundidade de penetração à medida que se aumenta o percentual de adição. Novamente, os concretos com relação a/c 0,6 foram os que sofreram a maior redução percentual devido à adição. O percentual de adição de 5% permitiu uma redução da profundidade de penetração em 29,26%, enquanto a adição de 10% permitiu a redução de 52,34%. Para os concretos com relação a/c 0,4 e 0,5 a redução da profundidade também foi identificada, principalmente para a adição de 10%. Para a adição de 10%, o concreto com relação a/c 0,5 teve uma redução de 47,87%, enquanto o concreto com relação a/c 0,4 apresentou redução de 36,08% na profundidade de penetração. Percebe-se que à medida que se reduz a relação a/c o efeito pozolânico é reduzido. Esse comportamento já era esperado, visto que a redução da relação a/c torna o concreto menos poroso, de forma que o RBROTT tem menor frente de atuação (possui menos poros para preencher).

Figura 89: Efeito conjunto da relação a/c e teor de adição sobre a profundidade de penetração

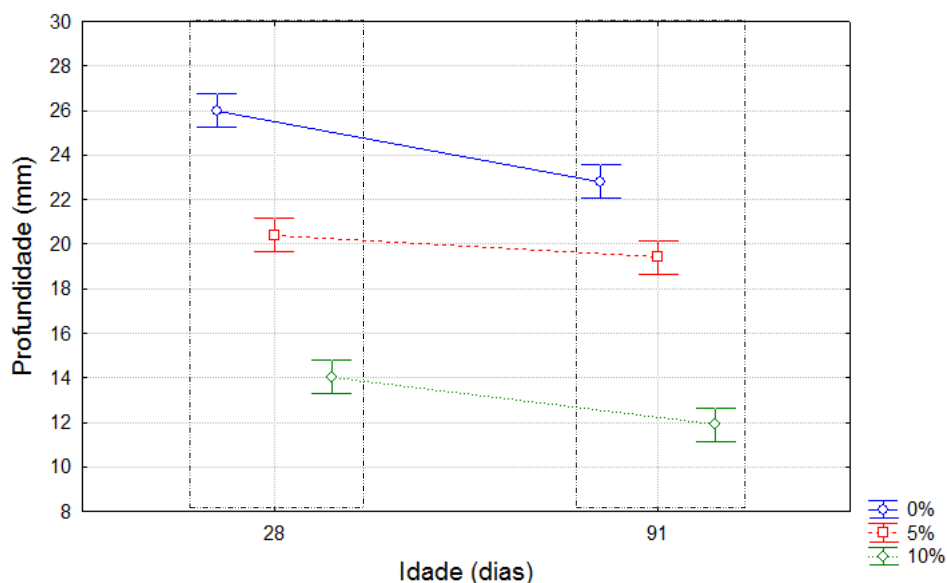


Fonte: Acervo pessoal.

A interação entre o percentual de adição e idade está apresentada na Figura 90. Mesmo sendo considerado significativo, o percentual de redução com o aumento da idade foi pequena quando comparada aos resultados obtidos segundo a ASTM C1202 (ASTM, 2012), sendo de 12,77% para os concretos referência, 4,81% para os concretos com 5% de adição e 16,96% para os concretos com 10% de adição. Esse comportamento se explica pelo fato de o ensaio ter duração longa (63 dias) permitindo que os compostos do cimento

continuassem em processo de hidratação durante o ensaio, diferente do que ocorre no ensaio segundo a ASTM C1202 (ASTM, 2012), que durou apenas 6h. Para a idade de 28 dias a adição de 5% provocou redução de 22,03% na profundidade de penetração e a adição de 10% provocou redução de 45,20%. Para a idade de 91 dias, a adição de 5% reduziu a profundidade de penetração em 14,91% e a adição de 10% proporcionou a redução de 47,83%.

Figura 90: Efeito conjunto da idade e teor de adição sobre a profundidade de penetração



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2.5 Comparação dos resultados obtidos para o concreto no estado endurecido

Nos capítulos anteriores observou-se através da análise de variância que em todos os ensaios o percentual de adição (0%, 5% e 10%) apresentou efeito significativo sobre as propriedades analisadas. Na Tabela 33 é apresentado comportamento geral dos resultados dos ensaios realizados. Foram considerados tanto aspectos mecânicos quanto aspectos relacionados com durabilidade dos concretos. Os resultados apresentados nessa tabela representam a média dos valores obtidos em diferentes idades e para diferentes relações a/c.

Tabela 33: Influência dos percentuais de adição nas propriedades dos concretos

Concretos	Resistência à compressão		Carga Passante (Coulomb)		Dns		Ds		Profundidade de Penetração	
	Valores médios (MPa)	Influência da adição (%)	Valores médios (Coulomb)	Influência da adição (%)	Valores médios (cm ² /s)	Influência da adição (%)	Valores médios (cm ² /s)	Influência da adição (%)	Valores médios (mm)	Influência da adição (%)
0% de adição	52,07	*	3727,50	*	1,14E-07	*	2,55E-08	*	24,40	*
5% de adição	54,06	↑ 3,82%	3118,50	↓ -16,34%	7,52E-08	↓ -34,20%	2,39E-08	↓ -6,48%	19,90	↓ -18,47%
10% de adição	57,00	↑ 9,47%	2208,75	↓ -40,74%	4,85E-08	↓ -57,59%	1,66E-08	↓ -34,89%	12,96	↓ -46,88%

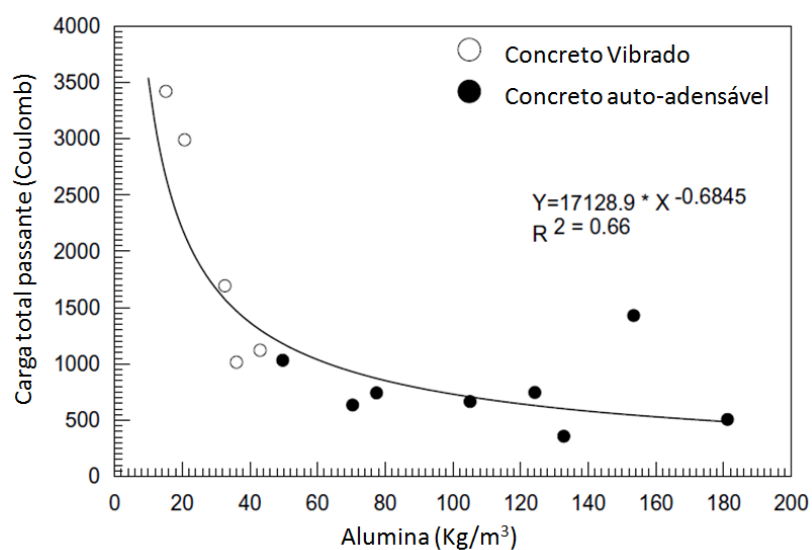
Fonte: Autor

É possível verificar que em todos os ensaios tanto o teor de 5% como 10% foram benéficos para as propriedades analisadas. Porém, observa-se que em todos os ensaios de penetração de cloretos as adições proporcionaram efeitos mais significativos do que os efeitos observados no ensaio de resistência à compressão, que teve um aumento médio de 3,82% e 9,47% para os percentuais de 5% e 10% respectivamente. Boga e Topçu (2012) observaram um comportamento semelhante a este ao analisar o efeito da substituição parcial do cimento por cinza volante, que é um material com atividade pozolânica conhecida. Para os maiores teores de substituição, que foram de 30% e 45% a resistência mecânica foi reduzida, porém os concretos com estes percentuais de substituição foram os que apresentaram a menor carga total passante, indicando uma maior resistência à penetração de cloretos.

É sabido que as pozolanas são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é um composto também formado no processo de hidratação do cimento, sendo o principal responsável pela resistência mecânica da pasta. A formação desse composto é capaz de refinar os poros do concreto, o que aumenta a resistência mecânica do mesmo e também reduz o ingresso de agentes externos, como os próprios íons cloreto. Porém, muitas vezes é negligenciado o fato de que partes dos íons cloreto ao penetrarem nos concretos se combinam com compostos à base de alumínio (C₃A – Aluminato tricálcico), de forma que esses íons não continuam a penetrar para o interior do concreto, caracterizando-se como cloretos combinados na mistura de concreto.

Dinakar, Babu e Santhanam (2008) realizaram um estudo para avaliar a influência de substituição de grande parte do cimento (até 85%) por cinza volante. Os resultados de carga total passante, obtidos pela ASTM 1202 (ASTM, 2012), indicaram os melhores resultados para os concretos com maior teor de substituição, porém esses mesmos concretos apresentaram os piores resultados para os ensaios de absorção de água, indicando um aumento da porosidade da pasta. Com isso, percebe-se uma contradição entre os resultados, pois se há um aumento da porosidade da pasta, deveria haver também um aumento da penetração dos íons cloreto e, consequentemente, um aumento da carga total passante. Os autores justificam esse comportamento devido à uma possível ligação dos íons cloreto com os compostos gerados no processo de hidratação do cimento, principalmente o aluminato tricálcico (C_3A), formando compostos estáveis. A formação de $C_3A - ((3CaO).(Al_2O_3))$ - no processo de hidratação do cimento é pequena, pois este possui pouca alumina (Al_2O_3) enquanto que a cinza volante possui uma quantidade bastante superior. Dinakar, Babu e Santhanam (2008) encontraram 6,56% de alumina no cimento e cerca de 31,74% de alumina na cinza volante. Com isso, é provável que a maior presença de alumina proveniente da pozolana tenha provocado uma maior quantidade de compostos C_3A nas misturas, evidenciando uma formação de cloretos combinados quimicamente, fato que pode ter sido preponderante nos resultados, com a diminuição da penetração de cloretos livres. Na Figura 91 é possível observar a influência da presença de alumina na carga total passante.

Figura 91: Influência da alumina na carga total passante



Fonte: Adaptado de Dinakar, Babu e Santhanam (2008).

Para o presente estudo, o cimento apresentou 4,87% de alumina, enquanto que o RBROTT apresentou 23,42%. Com isso, os melhores resultados apresentados para os concretos com adição de RBROTT em todos os ensaios de penetração de cloretos podem ser devido à maior formação de C_3A decorrente do maior percentual de Al_2O_3 contido no RBROTT, indicando uma possível diminuição de cloretos livres na mistura devido a uma combinação dos íons com o aumento do aluminato tricálcico nas misturas de concreto.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão geral

A partir dos resultados encontrados foi possível concluir que o RBROTT é um material pozzolânico, pois atendeu a todos os critérios físicos e químicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015) - Materiais pozzolânicos - Requisitos. Além disso, provou-se também que a adição desse material proporcionou melhorias significativas ao concreto, tanto em relação à resistência mecânica como em relação à resistência à penetração de íons cloretos.

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Atividade pozzolânica

A partir da NBR 12653 (ABNT, 2015) definiram-se os parâmetros para verificar se o RBROTT é uma material pozzolânico. Inicialmente verificou-se a composição química e a finura, sendo que o RBROTT apresentou-se como material silício aluminoso e atendeu aos limites químicos normatizados. Além de ser um material silício-aluminoso, o RBRO teve apenas 9,57% de material retido na peneira #325, sendo que a norma estabelece como valor máximo 20%. Também foram realizados ensaios para determinação da atividade pozzolânica pois, o fato de ser um material silício-aluminoso fino não garante que o RBROTT possua atividade pozzolânica. Inicialmente procedeu-se o ensaio de índice de atividade pozzolânica com cal, no qual foram moldados corpos de prova de 5x10 cm (traço contendo cal, RBROTT e areia), segundo as recomendações da NBR 5751 (ABNT, 2015). Para este ensaio a resistência mínima dos corpos de prova deveria ser de 6 MPa, sendo que a resistência apresentou valor de 7,24 MPa que é 20,6% maior do que o mínimo para ser considerado um material pozzolânico. Além disso, foi realizado o ensaio de atividade pozzolânica com cimento, no qual foram moldados corpos de prova para uma argamassa referência (sem RBROTT) e corpos de prova com aplicação do RBROTT, ambas foram confeccionadas segundo as recomendações da NBR 5752 (ABNT, 2014). A resistência da argamassa contendo RBROTT deveria ser de no mínimo 90% da resistência apresentada

pela argamassa referência, sendo que a argamassa com RBROTT apresentou resultado de 103% em relação à argamassa referência. Com isso, o RBROTT atendeu a todos os critérios da NBR 12653 (ABNT, 2015), podendo então ser considerado um material pozolânico. Realizou-se também o ensaio de atividade pozolânica pelo método de Luxán, cujo resultado mostrou que o RBROTT é um material pozolânico, apresentando pozolanicidade variável, assim como o metacaulim que também foi ensaiado.

5.2.2 Concreto no estado fresco

Para os concretos no estado fresco, verificou-se a consistência através do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone segundo a NBR NM 67 (ABNT, 98). Observou-se que com o aumento do teor de adição causou redução significativa do abatimento. Para os traços com relação a/c 0,4, 0,5 e 0,6 houve uma redução de 54,29%, 25,00% e 33,90% após a adição de 10% de RBROTT respectivamente.

5.2.3 Concreto no estado endurecido

5.2.3.1 Resistência à compressão

Os concretos foram confeccionados com três relações a/c distintas, 0,4, 0,5 e 0,6 e ensaiados em três idades, 28, 56 e 91 dias. Como era de se esperar, a resistência mecânica diminuiu com o aumento da relação a/c e aumentou com o aumento da idade. A análise mais importante para o presente estudo é o efeito da adição de 5% e 10% de RBROTT sobre o comportamento do concreto. Analisando o efeito isolado da adição sobre a resistência dos concretos, a resistência para o teor de adição de 0%, 5% e 10% apresentaram resistência média de 52,07, 54,06 e 57,00 MPa respectivamente, ou seja, a adição de 5% e 10% proporcionaram aumento de 3,82% e 9,47% na resistência mecânica dos concretos.

5.2.3.2 Resistência à penetração de cloretos – ensaio ASTM C1202-12

Esse ensaio foi realizado nas idades de 28 e 91 dias. Na idade de 28 dias a carga total passante para todos os teores de adição (0%, 5% e 10%) se apresentaram próximas (compreendidas no intervalo de 3000 a 4000

Coulomb). Porém, com o aumento da idade para 91 dias observou-se que os concretos com adição apresentaram redução mais significativa na carga total passante se comparado aos concretos referência. O concreto referência apresentou uma redução na carga total passante de apenas 14,20% dos 28 para os 91 dias. Já o concreto com 5% de adição apresentou uma redução de 34,61% da carga total passante enquanto o concreto com 10% de adição teve redução de 55,99%. O fato de os concretos com adição terem uma redução da carga total passante muito maior do que o concreto referência se deve possivelmente à reação pozolânica do RBROTT e também ao fato de o RBROTT ter um maior teor de alumina (Al_2O_3), que pode ter propiciado uma maior formação de C_3A e conseqüentemente ter diminuído a penetração dos íons cloreto.

5.2.3.3 Resistência à penetração de cloretos – ensaio UNE 83987-14

A partir do ensaio estabelecido pela UNE 83987 (UNE, 2014) obteve-se os coeficientes de difusão no estado estacionário (D_s) e não estacionário (D_{ns}). Tanto o D_{ns} como o D_s aumentaram devido ao aumento da relação a/c. Para o D_{ns} , houve um aumento de 48,82% para a relação a/c 0,5 e um aumento de 93,40% para a relação a/c 0,6 quando comparados ao concreto com relação a/c 0,4. Já para o D_s , houve um aumento de 18,89% para os concretos com relação a/c 0,5 e um aumento de 67,08% para os concretos com relação a/c 0,6, quando comparados aos concretos com relação a/c 0,4.

Em relação à influência do teor de adição, para o D_{ns} observou-se uma redução de 34,20% para o teor de adição de 5% e de 57,59% para a adição de 10%. Já o D_s , apresentou redução de apenas 6% para o teor de adição de 5%. Porém, para os concretos com adição de 10% a redução foi de 34,89%. Ao se analisar a influência da interação entre as variáveis a/c e teor de adição sobre o D_s foi possível observar que os concretos com relação a/c 0,6 foram os mais beneficiados pela adição, havendo redução do D_s de 39,29% para os concretos com 5% de adição e de 57,05% para os concretos com 10% de adição. Em relação ao D_{ns} , a interação entre a relação a/c e teor de adição não foi considerada estatisticamente significativa.

A partir do Ds estimou-se também a vida útil dos concretos, que apresentaram um aumento da vida útil devido à adição do RBROTT principalmente para o percentual de 10% de adição, que proporcionou um aumento de 21,29%, 60,09% e 69,19% para os concretos com relação a/c 0,4, 0,5 e 0,6, respectivamente.

5.2.3.4 Resistência à penetração de cloretos – ensaio NT BUILD 443-95

Esse ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias, tendo duração de 63 dias para cada idade. Como era de se esperar, a profundidade de penetração apresentou menores valores para os concretos ensaiados na idade de 91 dias quando comparados aos concretos ensaiados aos 28 dias. Além disso, outro resultado que já era esperado é o aumento da profundidade de penetração devido ao aumento da relação a/c. Em ambas as idades de ensaio a adição se mostrou benéfica, reduzindo a profundidade de penetração. Para a idade de 28 dias a adição de 5% provocou redução de 22,03% na profundidade de penetração e a adição de 10% provocou redução de 45,20%. Para a idade de 91 dias, a adição de 5% reduziu a profundidade de penetração em 14,91% e a adição de 10% proporcionou a redução de 47,83%.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Produzir concretos com maiores teores de adição de RBROTT;
- Produzir concretos com substituição parcial do cimento pelo RBROTT;
- Produzir clínquer com substituição parcial da matéria prima por RBRO;
- Avaliar outras propriedades ligadas à durabilidade dos concretos, como por exemplo, resistência à carbonatação, resistência ao ataque de sulfatos, etc.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010. gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com Cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Determinação da Finura por Meio da Peneira 45 μm . Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: 2015: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.). **Panorama mundial do setor de rochas ornamentais e de revestimento em 2013.** São Paulo. 2014.

ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais). Brasil é destaque no mercado internacional de rochas ornamentais. **ABINews**, Nº 1 – Janeiro/Março de 2015. São Paulo. 2015.

AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**. v 24, p. 2658–2663, 2010.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**. v 42, p. 810-819, 2007.

ALVES, M. S. **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2008.

AHN, Y.B.; JANG, J.G.; LEE, H.K. Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**. v 72, p. 27-38, 2016.

ASTM C1202-12: **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability Resist Chloride Ion Penetration**, Philadelphia, 2012.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

APONTE, D. F.; BARRA M.; VÁZQUEZ, E. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. **Construction and Building Materials**. v 30, p. 537-546, 2012.

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de Vidros Sodo-Cálcicos a Partir de Resíduos de Rochas Ornamentais**. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Maceió. Alagoas, 2008.

BASTOS, R. S.; ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L. ; DEGEN M. K. **Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção**. Congresso Brasileiro do Concreto, 55. 2013, Gramado, Rio Grande do Sul. Anais: IBRACON, 2013.

BAUER, L. A. **Materiais de construção**. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 488p, 2000.

BRETON. Disponível em:

<http://www.breton.it/granite/pt/product/M%C3%A1quinas_m%C3%BAltos_fios/PARA_GON_1600> Acessado em: 12 de julho de 2016.

BOGA, A. R.; TOPCU, I. B. Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v 31, p. 258-264, 2012.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. **Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas**. In: Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis, 1997, Canela. Anais. Rio Grande do Sul: ANTAC, 1997.

CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alípaz, S. (Org.). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231, 2006.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras de concreto – Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1ed. São Paulo: PINI, 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber - Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**. v 31, p. 1411 –1420, 2001.

CHIODI FILHO; KISTEMANN, D. **O Setor de Rochas Ornamentais no Brasil**. Informativo. Rio de Janeiro. 2014.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. RS. 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. v.1, p. 345-378, 2005.

DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L.; ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S. **Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento**. Anais. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. 2013.

DELORENCE, F. **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Informativos. Brasília – DF. 2006.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo. 2015.

Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. **Cement & Concrete Composites**. v. 30, p. 880–886, 2008.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**. v 44, p. 1-6, 2013.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Rio Grande do Sul. 2013.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2014.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do Resíduo de Corte de Granito (Rcg) como Adição para Produção de Concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2000.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**.

Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2001.

JALAL, M.; POULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI D. COMPARATIVE study on effects of Class F fly ash, nano silica and sílica fume on properties of high performance self compacting concrete. **Construction and Building Materials**. v. 94, p. 90-104, 2015.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. v.1, p. 728-760, 2007.

LÚXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. v. 19, p. 63-68, 1989.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONROS, G.; MORALES, J.; SANCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. v 32, p. 617–622, 2010.

MEDEIROS, M. H. F.; BORBA, A. Y.; FILHO, J. H; HELENE, P. R. L. **Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas**. Revista Escola de Minas – REM, Ouro Preto. v.65, p. 475-481, 2012.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos**. Engenharia Civil. Ouro Preto. MG. 2013.

MEDEIROS M. H. F.; REAL L. V.; RICHTER K.; SOUA W. B.; KLEIN N. B. **Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície**. Revista eletrônica de engenharia. Paraná. v. 8, p 54-63. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: PINI, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 448p. 2013.

NT BUILD 492, Concrete, mortar and cement-based repairmaterials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, **Nordtest method**, 1999.

NT BUILD 443, Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, **Nordtest method**, 1995.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H.K.; MOHNOT, J.K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z. HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. 1 ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 2012.

RODRIGUES, C. S. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. Tese (doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

SANGALLI, T.; BRITES, B. G.; NEIVOCK, M. P.; FORMAGINI, S. **Confecção de concreto autoadensável com a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de granito e mármore**. Anais. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. 2013.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2005.

SHAIKH, F. U. A.; SUPIT, S. W. M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). **Construction and Building Materials**. v 82, p. 192–205, 2015.

SIRIRUANG, C.; TOOCHINDA, S.; JULNIPITAWONG, P.; TANGTERMSIRIKUL, S. CO₂ capture using fly ash from coal fired power plant and applications of CO₂-captured fly ash as a mineral admixture for concrete. **Journal of Environmental Management**. v 170, p. 70 – 78, 2016.

SOARES, R. B. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos com a Incorporação de Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2014.

SIDDIKI, R.; KADRI, E. Effect of metakaolin and foundry sand on the near surface characteristics of concrete. **Construction and Building Materials**. v 25, p. 3257–3266, 2011.

SOUZA, J. G. **Análise ambiental do processo de Extração e beneficiamento de rochas Ornamentais com vistas a uma produção Mais limpa: aplicação em cachoeiro de Itapemirim – es**. TCC (Curso de Especialização em Análise Ambiental). Faculdade de Engenharia da UFJF. Juiz de Fora. 2007.

ULIANA, J. G. ; BASTOS, R. S. ; CALMON, J. L. ; TRISTÃO, F. A. ; VIEIRA, G. L. ; RODRIGUES, J. A. **Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem gralha de aço**. Anais. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. 2013.

ULIANA, J. G. **Tratamento Térmico da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Aplicação Como Pozolana em Matrizes Cimentícias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2014.

UNE 83987-14. Durabilidad Del hormigón. Métodos de ensayo. **Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro em el hormigón endurecido . Método multirrégimen**, 2014.

VAZZOLER, J. S. **Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia** . Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2015.

Apêndices

Resultados individuais dos ensaios

Apêndice A

Resistência à compressão individual dos corpos de prova - NBR 5739/2007.

Resistência à compressão (MPa)											
28 dias				56 dias				91 dias			
a/c	Ref.	5%	10%	a/c	Ref.	5%	10%	a/c	Ref.	5%	10%
0,4	56,95	64,57	62,50	0,4	58,97	64,07	61,57	0,4	64,82	62,57	63,07
	53,84	60,51	63,82		62,44	62,81	63,56		67,91	64,39	54,25
	56,29	61,02	63,25		50,60	61,32	62,19		65,07	65,43	67,18
	53,49	57,73	63,56		58,19	60,15	61,94		63,74	66,32	67,69
	55,37	58,86	62,32		59,41	61,14	56,68		66,95	55,06	68,32
0,5	52,63	52,63	53,19	0,5	57,94	50,05	50,05	0,5	54,06	53,59	61,89
	52,68	52,68	53,36		56,31	51,56	53,73		54,22	50,22	57,79
	51,55	51,55	53,56		52,52	52,68	48,86		55,11	49,55	61,51
	51,57	51,57	53,92		56,56	52,75	46,72		54,11	49,66	60,82
	51,03	51,03	51,93		54,93	54,23	56,57		55,31	44,60	65,07
0,6	40,44	48,30	49,23	0,6	41,92	50,20	53,56	0,6	41,16	48,77	56,64
	40,12	49,30	50,75		40,22	49,98	49,68		43,36	51,31	56,06
	40,42	48,26	49,76		42,55	47,56	46,41		45,28	48,30	55,81
	40,90	48,55	49,88		42,83	50,05	52,03		42,17	48,76	57,06
	39,98	46,55	50,45		43,91	48,30	47,82		40,67	44,65	56,59

Apêndice B

Carga total passante (Coulomb) – ASTM C1202-12

Ensaio na idade de 28 dias														
Concreto	Tempo (min.)													Q total (Coulomb)
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
	Corrente (mA)													
REF 0,4 - 1	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	4383
REF 0,4 - 2	0,13	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	3699
REF 0,4 - 3	0,13	0,14	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	3699
REF 0,5 - 1	0,16	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	4464
REF 0,5 - 2	0,14	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	3933
REF 0,5 - 3	0,13	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	3582
REF 0,6 - 1	0,20	0,24	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	5949
REF 0,6 - 2	0,17	0,21	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	5211
REF 0,6 - 3	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	3951
5% - 0,4 - 1	0,16	0,19	0,21	0,22	0,24	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	5553
5% - 0,4 - 2	0,12	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	3771
5% - 0,4 - 3	0,12	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	3447
5% - 0,5 - 1	0,17	0,20	0,22	0,23	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	5427
5% - 0,5 - 2	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	4086
5% - 0,5 - 3	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	3816
5% - 0,6 - 1	0,18	0,21	0,23	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	5589
5% - 0,6 - 2	0,13	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	4023
5% - 0,6 - 3	0,12	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	3483
10% - 0,4 - 1	0,14	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	4419
10% - 0,4 - 2	0,12	0,14	0,15	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	3852
10% - 0,4 - 3	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	3078
10% - 0,5 - 1	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	3582
10% - 0,5 - 2	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	2889
10% - 0,5 - 3	0,11	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	3393
10% - 0,6 - 1	0,12	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	4041
10% - 0,6 - 2	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	2511
10% - 0,6 - 3	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	2682

Ensaio na idade de 91 dias														
Concreto	Tempo (min.)													Q total (Coulomb)
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
	Corrente (mA)													
REF 0,4 - 1	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	3870
REF 0,4 - 2	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	3420
REF 0,4 - 3	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	3006
REF 0,5 - 1	0,10	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	3591
REF 0,5 - 2	0,10	0,12	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	3285
REF 0,5 - 3	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	3177
REF 0,6 - 1	0,14	0,17	0,20	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	4995
REF 0,6 - 2	0,12	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	4050
REF 0,6 - 3	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	3717
5% - 0,4 - 1	0,08	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2565
5% - 0,4 - 2	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	2178
5% - 0,4 - 3	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	2196
5% - 0,5 - 1	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2610
5% - 0,5 - 2	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	2358
5% - 0,5 - 3	0,09	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	2376
5% - 0,6 - 1	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	2808
5% - 0,6 - 2	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	2934
5% - 0,6 - 3	0,09	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	2754
10% - 0,4 - 1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	1215
10% - 0,4 - 2	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	1233
10% - 0,4 - 3	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	1395
10% - 0,5 - 1	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	1611
10% - 0,5 - 2	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	1368
10% - 0,5 - 3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	1233
10% - 0,6 - 1	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	1791
10% - 0,6 - 2	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	1539
10% - 0,6 - 3	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	1332

Apêndice C - Leituras UNE 83987-14

Ref 0,4 -1					Ref 0,4 -2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl- (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl- (mol)	Temperatura (°C)
1,00	1,20	0,06	0,00	25,70	1,00	0,84	0,05	0,00	25,30
76,00	1,72	0,10	0,00	26,10	76,00	0,65	0,09	0,00	26,10
105,00	3,44	0,07	0,00	26,90	105,00	2,83	0,08	0,00	27,00
129,50	2,82	0,10	0,00	24,60	129,50	2,63	0,12	0,00	24,20
149,00	2,81	0,14	0,00	25,20	149,00	1,84	0,11	0,00	25,50
175,50	5,81	0,30	0,00	25,90	175,50	1,58	0,07	0,00	26,10
198,50	8,08	0,92	0,01	25,40	198,50	1,66	0,08	0,00	25,80
226,50	9,22	1,77	0,03	26,00	226,50	2,77	0,17	0,00	26,30
249,50	9,77	2,63	0,04	26,50	249,50	4,17	0,31	0,00	26,90
274,50	10,10	3,28	0,05	27,90	274,50	5,78	0,54	0,01	27,50
297,50	10,51	4,90	0,08	28,30	297,50	8,24	1,41	0,02	28,40
316,50	10,72	4,61	0,07	27,70	316,50	9,08	1,91	0,03	28,00
365,50	10,82	5,68	0,09	28,20	365,50	10,07	3,76	0,06	28,20
389,50	10,79	6,56	0,10	28,20	389,50	10,24	4,72	0,07	28,30
420,50	12,06	7,20	0,11	28,60	420,50	10,90	5,40	0,08	28,60
442,50	11,44	7,70	0,12	28,50	442,50	11,00	6,28	0,10	28,70
464,80	11,70	7,94	0,12	28,20	464,80	11,53	6,68	0,10	28,30
490,30	11,20	8,10	0,13	27,90	490,30	11,27	7,24	0,11	28,00
512,30	11,71	8,54	0,13	27,20	512,30	11,29	8,11	0,13	27,10
564,80	11,81	9,30	0,15	28,60	564,80	11,08	9,18	0,14	28,50
611,30	11,50	9,47	0,15	28,60	611,30	11,10	9,79	0,15	28,60
710,30	11,81	9,94	0,16	25,80	710,30	11,34	10,67	0,17	25,60
778,30	11,50	10,12	0,16	26,90	778,30	11,00	11,14	0,18	26,90
876,80	11,91	10,52	0,17	26,50	876,80	11,45	11,79	0,19	26,80
969,80	11,64	10,64	0,17	24,80	969,80	11,37	12,03	0,19	24,70

Ref 0,5 -1					Ref 0,5 -2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	0,73	0,04	0,00	24,20	1,00	0,82	0,03	0,00	24,30
15,00	0,86	0,07	0,00	24,70	15,00	0,87	0,05	0,00	24,40
41,00	1,18	0,12	0,00	25,60	41,00	1,32	0,10	0,00	25,60
116,00	1,37	0,10	0,00	25,90	116,00	1,93	0,11	0,00	25,70
145,00	3,44	0,33	0,00	26,90	145,00	5,90	0,53	0,01	26,90
169,50	6,28	0,68	0,01	24,30	169,50	8,35	1,09	0,01	24,50
189,00	7,82	1,61	0,02	25,60	189,00	9,12	2,09	0,03	25,70
215,50	9,25	2,94	0,04	26,10	215,50	9,71	3,50	0,05	26,00
238,50	9,84	4,31	0,07	26,00	238,50	10,12	4,92	0,08	26,00
266,50	10,15	5,63	0,09	26,50	266,50	10,35	6,17	0,10	26,50
289,50	10,04	6,73	0,11	27,00	289,50	10,45	6,96	0,11	26,80
314,50	10,32	7,25	0,11	27,90	314,50	10,67	7,71	0,12	27,40
337,50	11,07	8,09	0,13	28,70	337,50	10,82	9,05	0,14	28,40
356,50	10,97	8,50	0,13	28,30	356,50	10,86	9,38	0,15	27,80
405,50	11,08	9,56	0,15	28,10	405,50	10,94	10,84	0,17	27,70
429,50	11,19	9,99	0,16	28,30	429,50	10,64	11,20	0,18	28,20
460,50	12,56	10,49	0,17	28,60	460,50	11,51	11,90	0,19	28,50
482,50	11,29	10,98	0,17	28,60	482,50	11,23	12,30	0,19	28,30
504,80	11,77	11,29	0,18	28,30	504,80	11,28	12,96	0,21	27,80
530,30	11,62	11,68	0,18	27,80	530,30	11,56	13,33	0,21	27,90
552,30	11,72	12,25	0,19	27,00	552,30	11,55	14,32	0,23	27,10
604,80	11,70	12,91	0,20	28,20	604,80	11,21	15,16	0,24	27,90
651,30	11,77	13,25	0,21	28,10	651,30	11,27	15,72	0,25	28,50
750,30	11,31	13,47	0,21	25,80	750,30	11,24	16,49	0,26	25,80
818,30	11,23	13,67	0,22	27,20	818,30	11,20	16,88	0,27	27,20
916,80	11,60	13,68	0,22	26,70	916,80	11,22	17,07	0,27	26,70
1009,80	11,80	13,92	0,22	24,60	1009,80	11,40	18,01	0,29	25,20

Ref 0,6 -1					Ref 0,6 -2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	0,64	0,02	0,00	24,30	1,00	0,82	0,04	0,00	23,60
15,00	0,75	0,04	0,00	24,60	15,00	0,85	0,07	0,00	24,80
41,00	0,82	0,07	0,00	25,30	41,00	0,99	0,11	0,00	25,50
116,00	0,89	0,13	0,00	26,10	116,00	3,83	0,55	0,01	26,40
145,00	4,75	0,55	0,01	27,00	145,00	8,50	1,96	0,03	27,00
169,50	7,40	1,52	0,02	24,00	169,50	9,81	3,31	0,05	24,60
189,00	8,20	2,74	0,04	25,60	189,00	10,20	4,43	0,07	25,50
215,50	10,05	4,21	0,07	25,90	215,50	10,66	7,08	0,11	26,20
238,50	10,27	6,48	0,10	25,90	238,50	10,63	7,75	0,12	25,90
266,50	10,28	7,62	0,12	26,50	266,50	10,50	8,76	0,14	26,50
289,50	10,49	9,50	0,15	27,20	289,50	10,75	9,45	0,15	27,20
314,50	10,44	9,70	0,15	27,80	314,50	11,00	9,87	0,16	27,80
337,50	10,51	10,92	0,17	28,50	337,50	11,10	10,89	0,17	28,20
356,50	11,08	11,25	0,18	27,80	356,50	10,86	11,18	0,18	27,90
405,50	10,52	12,00	0,19	27,90	405,50	10,94	12,79	0,20	28,10
429,50	11,22	13,00	0,21	28,20	429,50	10,79	13,33	0,21	28,10
460,50	12,75	13,63	0,22	28,80	460,50	10,92	14,15	0,22	28,60
482,50	11,39	14,05	0,22	27,90	482,50	11,70	14,77	0,23	27,70
504,80	11,08	14,39	0,23	27,70	504,80	11,24	15,29	0,24	28,40
530,30	11,11	14,78	0,23	27,90	530,30	10,94	15,64	0,25	27,50
552,30	11,58	15,54	0,25	26,70	552,30	11,60	17,01	0,27	27,10
604,80	11,26	16,27	0,26	27,80	604,80	11,30	17,40	0,28	28,50
651,30	11,56	16,50	0,26	28,20	651,30	11,18	17,77	0,28	27,90
750,30	11,18	16,59	0,26	25,80	750,30	11,45	18,16	0,29	25,80
818,30	11,07	16,77	0,27	27,20	818,30	11,34	18,27	0,29	27,20
916,80	11,53	16,73	0,27	26,10	916,80	11,38	18,16	0,29	26,70
1009,80	11,80	17,03	0,27	24,90	1009,80	11,85	19,07	0,30	25,00

5% 0,4-1					5% 0,4-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	0,88	0,03	0,00	24,50	1,00	0,75	0,02	0,00	24,00
15,00	0,95	0,05	0,00	24,90	15,00	0,70	0,05	0,00	24,90
41,00	1,32	0,10	0,00	25,60	41,00	1,00	0,10	0,00	25,50
116,00	2,00	0,07	0,00	26,10	116,00	0,97	0,09	0,00	25,90
145,00	3,90	0,10	0,00	26,80	145,00	3,07	0,09	0,00	26,80
169,50	3,38	0,10	0,00	23,70	169,50	2,63	0,08	0,00	23,90
189,00	3,67	0,23	0,00	25,40	189,00	2,38	0,14	0,00	25,50
215,50	7,68	0,61	0,01	25,70	215,50	4,64	0,33	0,00	25,70
238,50	8,84	1,57	0,02	25,40	238,50	6,15	0,65	0,01	25,60
266,50	9,72	2,74	0,04	26,10	266,50	7,80	1,28	0,02	26,20
289,50	10,24	3,78	0,06	26,80	289,50	9,04	1,96	0,03	26,90
314,50	10,54	4,69	0,07	27,60	314,50	10,04	2,74	0,04	26,60
337,50	10,84	5,72	0,09	28,20	337,50	10,14	4,05	0,06	28,00
356,50	10,82	6,17	0,10	27,70	356,50	10,32	4,59	0,07	27,60
405,50	11,03	7,57	0,12	27,30	405,50	10,59	6,29	0,10	27,30
429,50	10,98	8,10	0,13	27,50	429,50	10,84	6,89	0,11	28,10
460,50	11,17	8,30	0,13	28,50	460,50	11,00	7,33	0,12	28,60
482,50	12,08	8,79	0,14	27,80	482,50	11,94	7,83	0,12	27,70
504,80	11,67	9,20	0,15	27,40	504,80	11,58	8,19	0,13	27,90
530,30	11,55	9,33	0,15	27,40	530,30	11,44	8,30	0,13	27,50
552,30	11,91	9,99	0,16	26,50	552,30	11,75	9,12	0,14	26,80
604,80	11,64	10,51	0,17	27,50	604,80	11,59	9,78	0,15	27,20
651,30	11,73	10,09	0,16	28,20	651,30	11,68	9,92	0,16	28,70
750,30	11,45	10,85	0,17	25,60	750,30	11,59	10,25	0,16	25,60
818,30	11,58	11,21	0,18	27,20	818,30	11,28	10,67	0,17	27,00
916,80	11,50	11,77	0,19	25,50	916,80	11,48	10,98	0,17	26,00
1009,80	11,64	11,59	0,18	25,00	1009,80	11,49	11,34	0,18	24,90

5% 0,5-1					5% 0,5-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	0,58	0,02	0,00	24,20	1,00	0,72	0,03	0,00	24,20
15,00	1,18	0,05	0,00	24,50	15,00	0,84	0,05	0,00	24,50
41,00	1,08	0,09	0,00	25,60	41,00	1,19	0,07	0,00	25,60
116,00	1,22	0,07	0,00	26,20	116,00	1,71	0,10	0,00	26,00
145,00	3,08	0,15	0,00	26,60	145,00	2,92	0,09	0,00	26,70
169,50	4,12	0,29	0,00	23,80	169,50	2,90	0,09	0,00	23,90
189,00	5,06	0,46	0,00	25,50	189,00	3,30	0,23	0,00	25,40
215,50	7,57	1,09	0,02	25,80	215,50	5,85	0,56	0,01	25,30
238,50	9,18	2,46	0,04	25,10	238,50	8,10	1,36	0,02	24,70
266,50	9,84	3,56	0,05	25,80	266,50	9,35	2,58	0,04	26,00
289,50	10,23	4,67	0,07	27,00	289,50	10,17	3,79	0,06	26,80
314,50	10,51	5,32	0,08	27,30	314,50	10,45	4,39	0,07	26,10
337,50	10,83	6,33	0,10	28,00	337,50	10,85	5,31	0,08	27,30
356,50	10,79	6,58	0,10	27,60	356,50	10,96	6,07	0,09	27,20
405,50	11,17	7,92	0,12	27,50	405,50	11,16	7,00	0,11	26,40
429,50	11,16	8,26	0,13	28,20	429,50	11,14	7,26	0,11	27,80
460,50	11,35	8,35	0,13	28,60	460,50	11,30	7,50	0,12	28,40
482,50	12,39	8,68	0,14	27,50	482,50	11,98	7,86	0,12	27,10
504,80	11,81	8,74	0,14	27,10	504,80	11,88	8,09	0,13	27,50
530,30	11,64	8,81	0,14	27,10	530,30	11,77	8,12	0,13	27,10
552,30	11,86	9,40	0,15	26,60	552,30	11,92	8,71	0,14	26,90
604,80	11,79	9,75	0,15	27,20	604,80	11,78	9,08	0,14	27,50
651,30	11,68	9,89	0,16	28,00	651,30	11,84	9,26	0,15	27,80
750,30	11,61	10,16	0,16	25,50	750,30	11,60	9,32	0,15	25,50
818,30	11,52	10,22	0,16	27,00	818,30	11,63	9,61	0,15	27,00
916,80	11,67	10,34	0,16	26,30	916,80	11,70	9,94	0,16	26,00
1009,80	11,80	10,51	0,17	24,70	1009,80	11,74	10,03	0,16	24,50

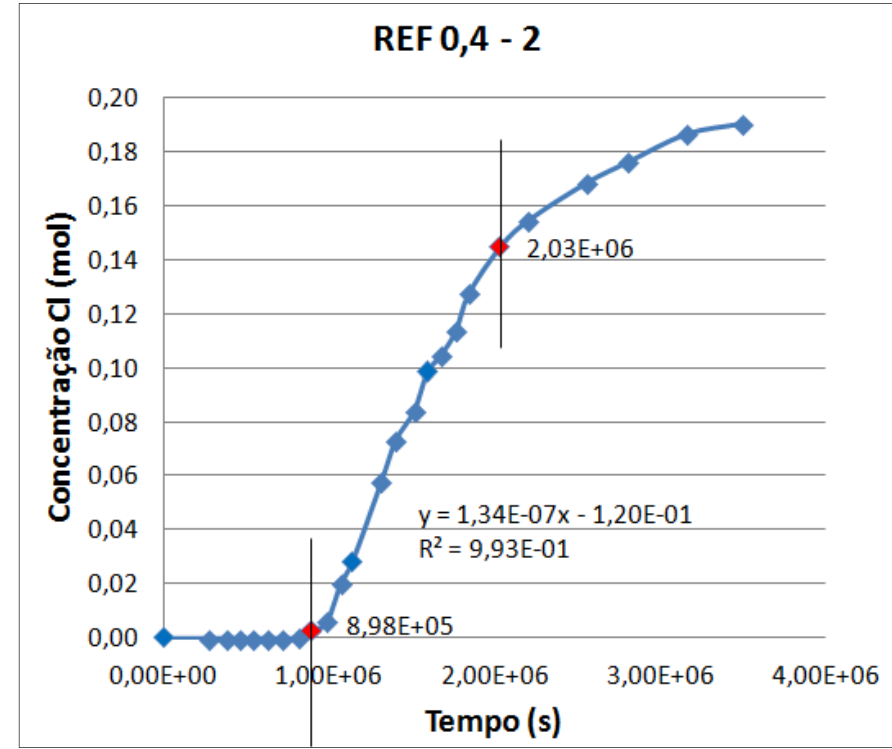
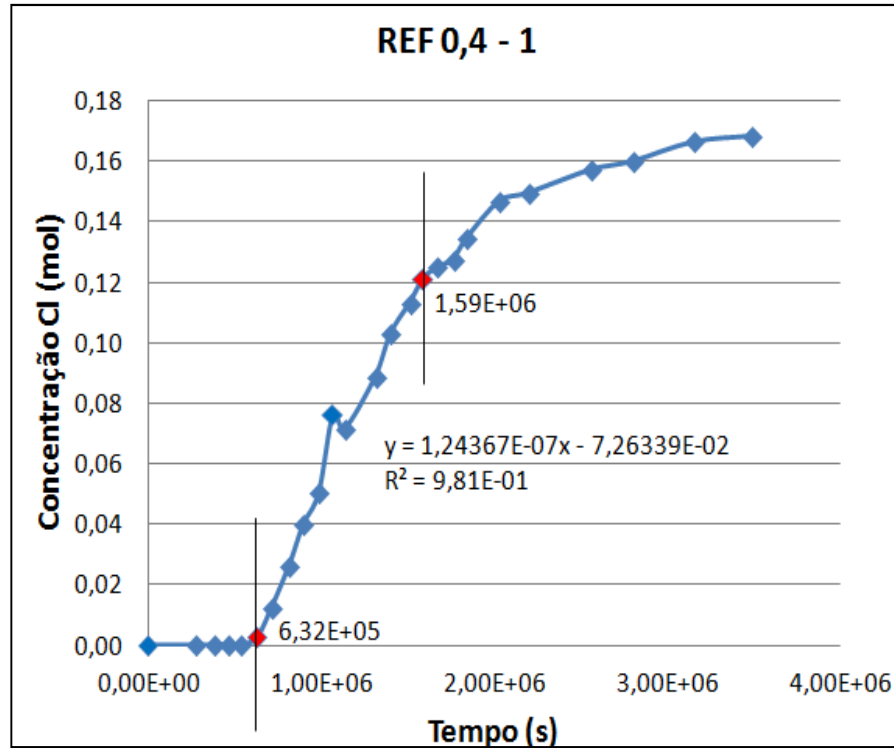
5% 0,6-1					5% 0,6-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	0,64	0,02	0,00	24,10	1,00	0,69	0,02	0,00	24,10
15,00	1,36	0,04	0,00	24,60	15,00	1,35	0,05	0,00	24,50
41,00	1,24	0,08	0,00	25,60	41,00	1,20	0,07	0,00	25,50
116,00	1,03	0,06	0,00	25,90	116,00	1,32	0,09	0,00	26,00
145,00	3,19	0,19	0,00	26,50	145,00	2,50	0,17	0,00	25,90
169,50	4,80	0,42	0,00	24,00	169,50	4,30	0,33	0,00	23,60
189,00	6,48	0,86	0,01	25,30	189,00	6,04	0,75	0,01	25,40
215,50	8,81	2,17	0,03	25,40	215,50	8,38	1,94	0,03	25,20
238,50	9,76	3,75	0,06	24,80	238,50	9,55	3,43	0,05	25,40
266,50	10,38	4,94	0,08	25,70	266,50	10,10	4,98	0,08	26,10
289,50	10,49	6,15	0,10	26,60	289,50	10,45	5,94	0,09	26,30
314,50	10,87	6,66	0,10	27,50	314,50	10,70	6,82	0,11	27,40
337,50	11,14	7,78	0,12	27,70	337,50	10,96	7,82	0,12	27,60
356,50	11,18	8,17	0,13	27,40	356,50	11,10	8,30	0,13	26,90
405,50	11,30	9,25	0,15	26,10	405,50	11,16	9,09	0,14	27,00
429,50	11,17	9,61	0,15	27,50	429,50	11,12	9,32	0,15	27,60
460,50	11,34	9,86	0,16	28,40	460,50	11,30	9,52	0,15	28,20
482,50	11,96	10,23	0,16	27,90	482,50	11,71	9,91	0,16	27,60
504,80	11,91	10,40	0,16	27,70	504,80	11,80	10,05	0,16	27,50
530,30	11,80	10,68	0,17	27,10	530,30	11,54	10,27	0,16	26,90
552,30	11,99	11,32	0,18	26,20	552,30	11,71	10,68	0,17	26,80
604,80	11,88	11,14	0,18	27,50	604,80	11,54	11,09	0,18	27,30
651,30	11,95	11,50	0,18	28,10	651,30	11,75	11,26	0,18	27,80
750,30	11,80	11,37	0,18	25,50	750,30	11,70	11,07	0,17	25,60
818,30	11,19	11,55	0,18	26,90	818,30	11,51	11,41	0,18	26,80
916,80	11,56	11,55	0,18	26,10	916,80	11,10	11,70	0,19	26,50
1009,80	11,80	11,61	0,18	24,50	1009,80	11,72	12,02	0,19	24,00

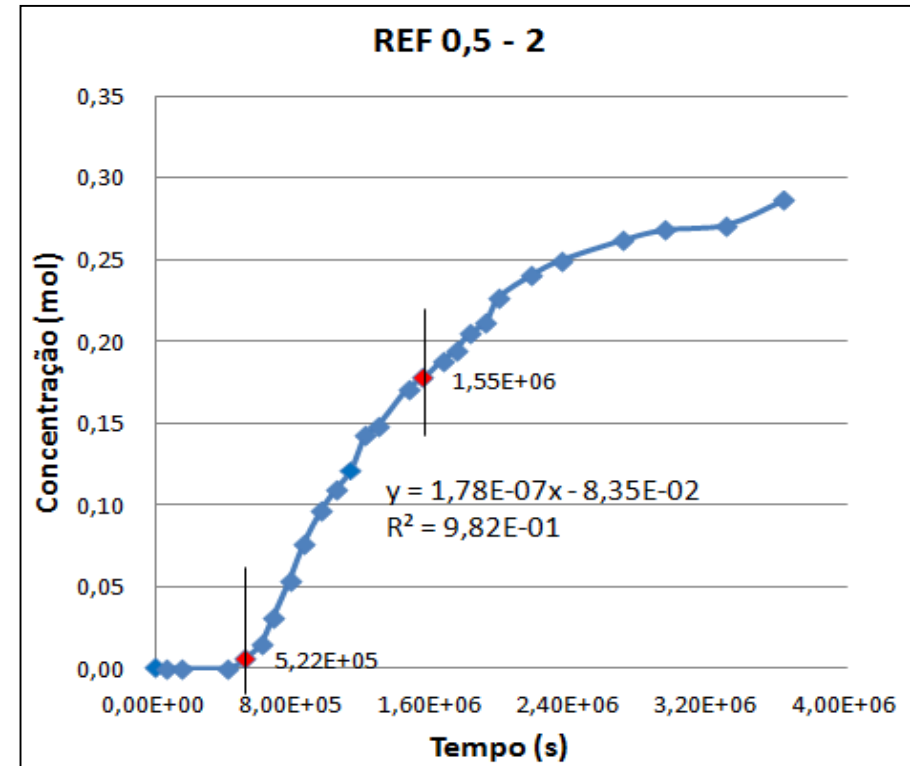
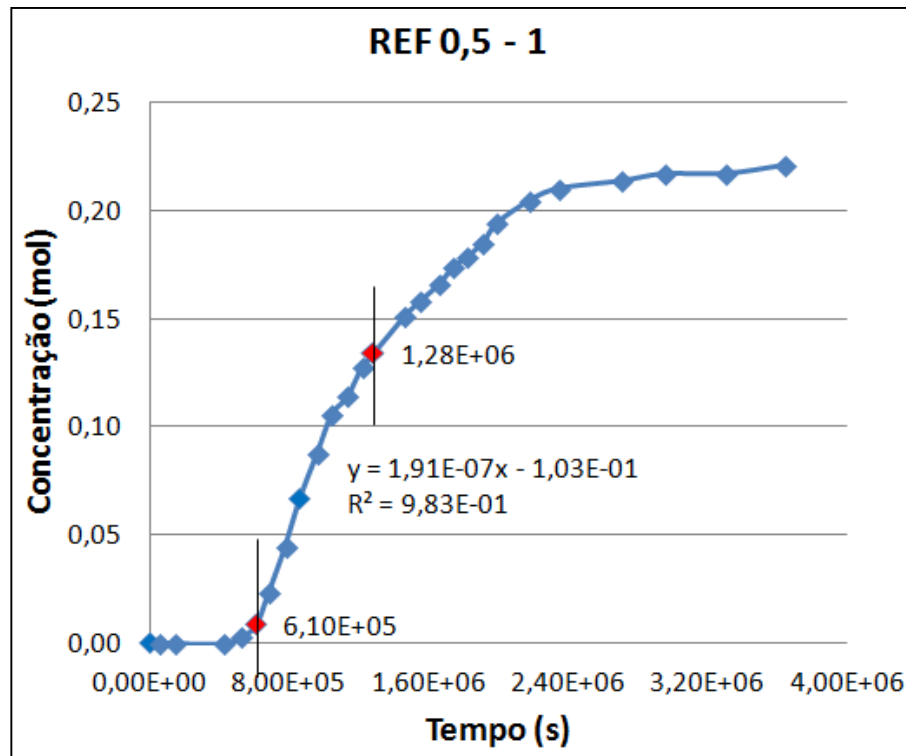
10% 0,4-1					10% 0,4-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	1,70	0,08	0,00	25,60	1,00	1,63	0,07	0,00	25,70
76,00	2,75	0,14	0,00	26,00	76,00	1,73	0,09	0,00	25,80
105,00	4,72	0,17	0,00	26,60	105,00	4,09	0,13	0,00	26,50
129,50	4,07	0,12	0,00	24,30	129,50	3,88	0,12	0,00	24,00
149,00	3,62	0,11	0,00	25,50	149,00	2,88	0,12	0,00	25,50
175,50	3,72	0,15	0,00	25,50	175,50	3,32	0,12	0,00	25,60
198,50	4,13	0,11	0,00	25,50	198,50	3,86	0,11	0,00	25,60
226,50	3,87	0,11	0,00	26,10	226,50	3,08	0,08	0,00	25,90
249,50	4,91	0,20	0,00	25,90	249,50	3,16	0,10	0,00	26,10
274,50	6,78	0,41	0,00	26,40	274,50	4,43	0,17	0,00	27,00
297,50	8,26	0,77	0,01	27,10	297,50	5,94	0,32	0,00	27,50
316,50	9,12	1,16	0,02	26,50	316,50	7,10	0,51	0,01	26,90
365,50	10,04	2,63	0,04	26,70	365,50	9,29	1,41	0,02	27,10
389,50	10,42	3,40	0,05	28,10	389,50	9,93	2,04	0,03	27,60
420,50	11,95	3,91	0,06	28,40	420,50	10,44	2,60	0,04	28,10
442,50	11,23	4,56	0,07	28,00	442,50	11,00	3,30	0,05	27,60
464,80	11,30	5,07	0,08	26,80	464,80	11,06	3,78	0,06	27,80
490,30	11,35	5,75	0,09	26,80	490,30	11,37	4,43	0,07	27,10
512,30	11,39	6,92	0,11	27,00	512,30	11,66	5,46	0,09	26,90
564,80	11,44	7,98	0,13	27,10	564,80	11,40	6,38	0,10	27,90
611,30	11,66	8,82	0,14	27,70	611,30	11,48	7,04	0,11	28,30
710,30	11,45	9,83	0,16	25,60	710,30	11,61	8,28	0,13	25,60
778,30	11,44	10,32	0,16	27,00	778,30	11,40	8,89	0,14	27,00
876,80	11,24	11,13	0,18	26,20	876,80	11,21	9,75	0,15	26,30
969,80	11,51	11,95	0,19	24,30	969,80	11,75	10,42	0,16	24,30

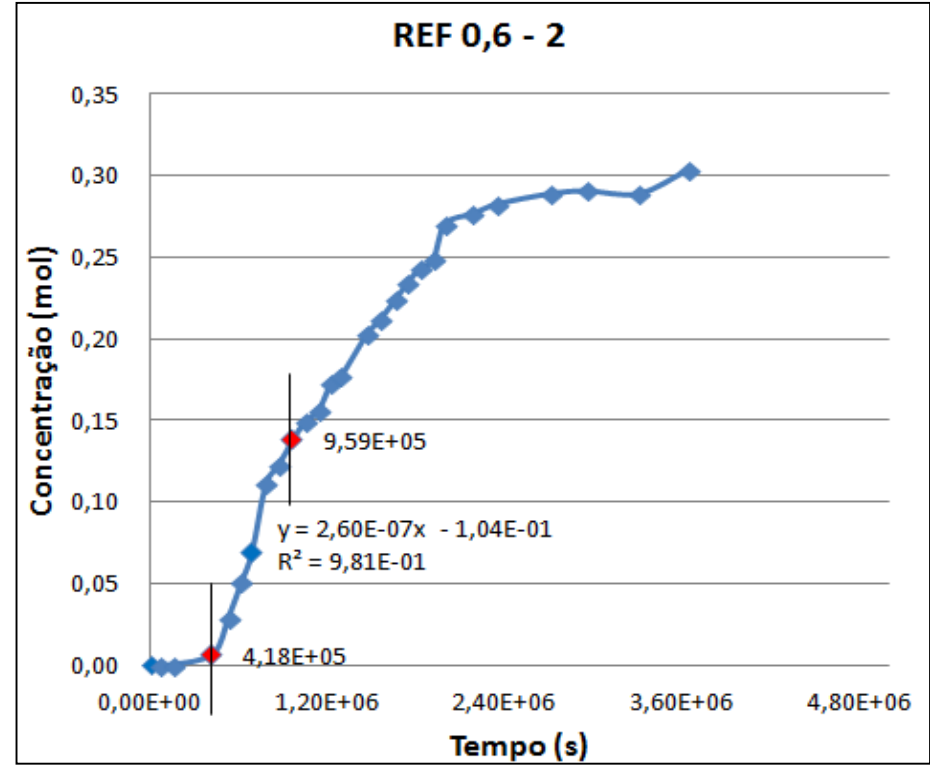
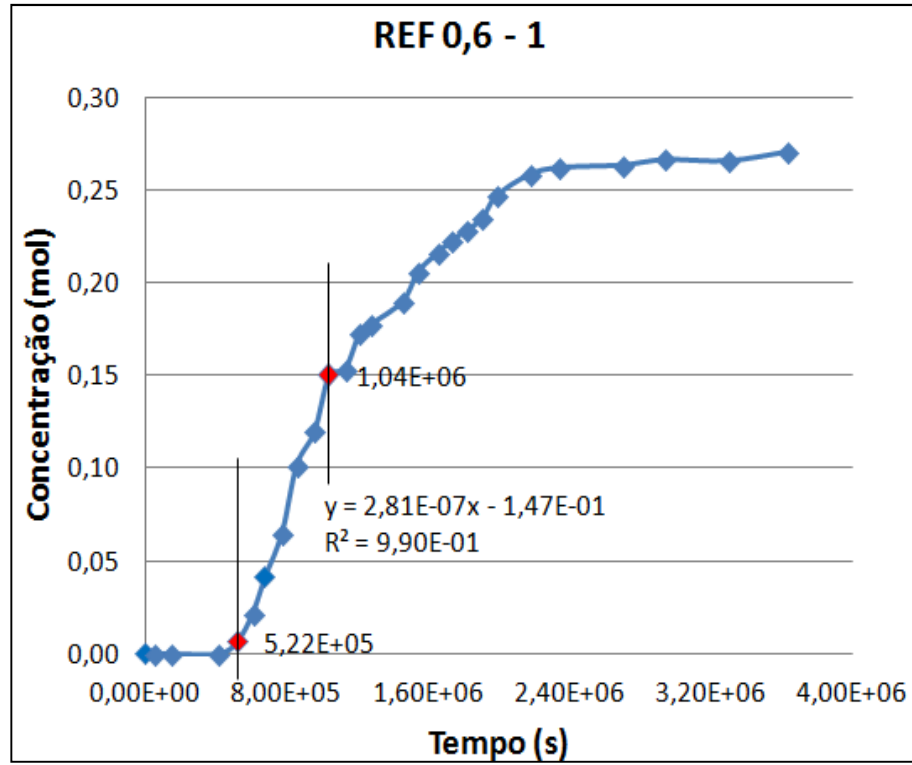
10% 0,5-1					10% 0,5-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	1,46	0,06	0,00	25,40	1,00	1,13	0,07	0,00	25,40
76,00	2,59	0,09	0,00	26,00	76,00	1,40	0,08	0,00	25,90
105,00	3,31	0,09	0,00	26,30	105,00	2,91	0,08	0,00	26,50
129,50	2,68	0,08	0,00	24,00	129,50	2,73	0,09	0,00	23,70
149,00	3,02	0,08	0,00	25,40	149,00	2,33	0,10	0,00	25,40
175,50	4,46	0,23	0,00	25,20	175,50	3,84	0,18	0,00	25,60
198,50	6,07	0,40	0,00	25,50	198,50	5,58	0,32	0,00	25,60
226,50	7,93	0,80	0,01	25,50	226,50	7,47	0,58	0,01	25,80
249,50	8,97	1,37	0,02	26,10	249,50	8,40	1,06	0,01	26,10
274,50	9,59	2,03	0,03	26,30	274,50	9,32	1,70	0,02	26,30
297,50	10,14	3,02	0,05	27,10	297,50	10,10	2,58	0,04	27,40
316,50	10,43	3,53	0,05	27,20	316,50	10,25	3,24	0,05	26,10
365,50	10,87	5,07	0,08	27,10	365,50	10,74	4,98	0,08	27,30
389,50	10,90	5,64	0,09	27,90	389,50	10,80	5,70	0,09	28,60
420,50	11,25	5,99	0,09	28,50	420,50	11,30	6,06	0,09	28,20
442,50	11,82	6,56	0,10	27,90	442,50	11,91	6,88	0,11	28,00
464,80	11,71	7,20	0,11	27,20	464,80	11,58	7,26	0,11	27,20
490,30	11,73	7,52	0,12	26,90	490,30	11,62	7,76	0,12	26,90
512,30	11,84	8,39	0,13	27,00	512,30	11,67	8,58	0,14	27,00
564,80	11,51	9,20	0,15	27,70	564,80	11,57	9,11	0,14	27,40
611,30	11,57	9,80	0,15	27,60	611,30	11,60	9,60	0,15	27,60
710,30	11,73	10,15	0,16	25,60	710,30	11,66	9,79	0,15	25,60
778,30	11,62	10,51	0,17	26,90	778,30	11,37	10,19	0,16	26,70
876,80	11,18	11,00	0,17	26,20	876,80	11,42	10,38	0,16	26,20
969,80	11,70	11,41	0,18	24,40	969,80	11,63	10,79	0,17	23,90

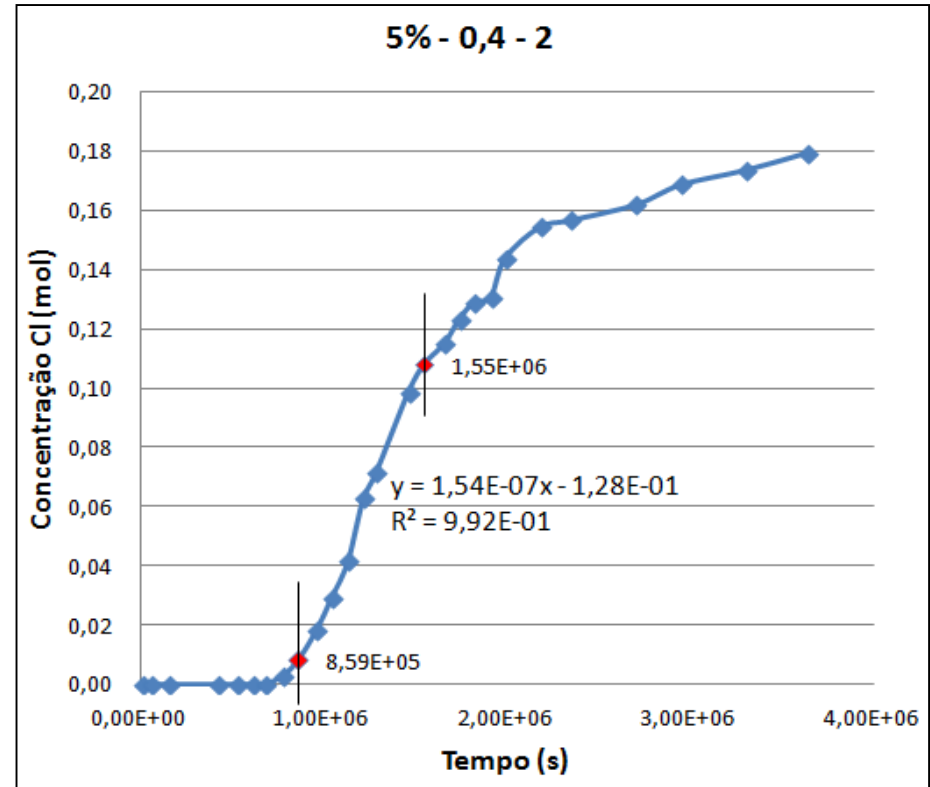
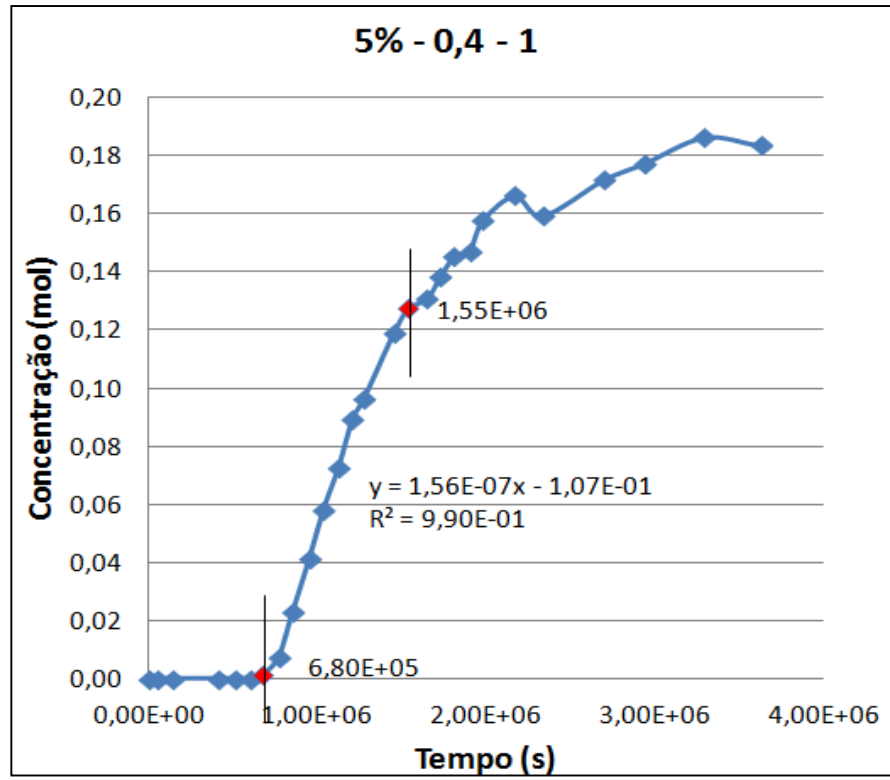
10% 0,6-1					10% 0,6-2				
Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)	Horas	DDP (V)	Condutividade (mS/cm)	Concentração Cl ⁻ (mol)	Temperatura (°C)
1,00	1,24	0,08	0,00	25,60	1,00	1,20	0,07	0,00	25,50
76,00	2,35	0,11	0,00	25,90	76,00	1,03	0,09	0,00	26,00
105,00	3,43	0,11	0,00	26,60	105,00	2,16	0,10	0,00	26,50
129,50	3,07	0,11	0,00	23,80	129,50	2,51	0,10	0,00	24,30
149,00	4,68	0,17	0,00	25,30	149,00	2,21	0,10	0,00	25,40
175,50	7,33	0,80	0,01	25,60	175,50	4,48	0,28	0,00	25,60
198,50	8,86	1,65	0,02	25,70	198,50	7,63	0,71	0,01	25,70
226,50	9,70	2,98	0,05	26,00	226,50	9,00	1,56	0,02	25,50
249,50	10,11	3,84	0,06	26,10	249,50	9,64	2,57	0,04	26,50
274,50	10,58	4,77	0,07	27,30	274,50	10,31	3,74	0,06	27,40
297,50	10,85	5,52	0,09	27,00	297,50	10,62	4,78	0,07	27,10
316,50	10,88	6,33	0,10	27,30	316,50	10,57	5,85	0,09	26,90
365,50	10,75	7,48	0,12	27,60	365,50	10,99	7,34	0,12	27,50
389,50	11,20	7,99	0,13	28,00	389,50	10,98	7,79	0,12	27,90
420,50	11,35	8,22	0,13	28,40	420,50	11,22	8,14	0,13	28,30
442,50	11,07	8,60	0,14	27,30	442,50	10,88	8,71	0,14	28,00
464,80	11,70	8,90	0,14	27,10	464,80	11,71	9,07	0,14	27,60
490,30	11,73	9,92	0,16	26,90	490,30	11,62	9,27	0,15	26,80
512,30	11,84	9,80	0,15	27,00	512,30	11,82	9,86	0,16	26,80
564,80	11,61	10,24	0,16	27,40	564,80	11,74	10,67	0,17	26,70
611,30	11,70	10,59	0,17	27,70	611,30	11,57	10,90	0,17	27,60
710,30	11,75	10,72	0,17	25,60	710,30	11,64	11,38	0,18	25,60
778,30	11,50	11,13	0,18	26,90	778,30	11,51	11,31	0,18	26,90
876,80	11,28	11,34	0,18	26,30	876,80	11,11	11,67	0,18	26,40
969,80	11,48	11,68	0,18	24,40	969,80	11,41	11,71	0,19	24,40

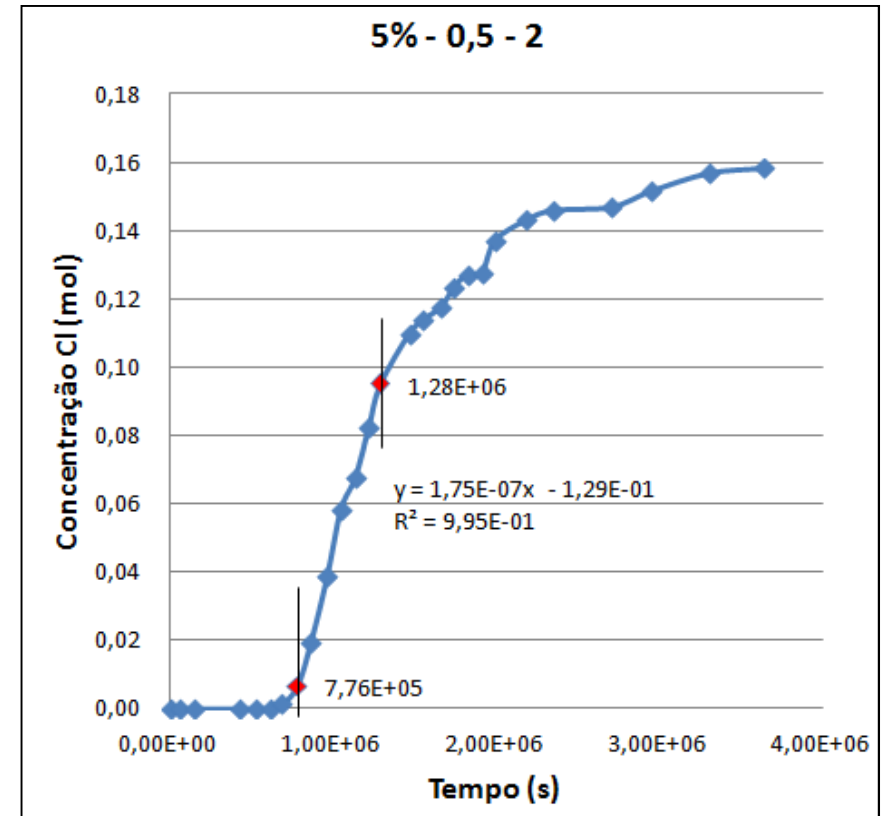
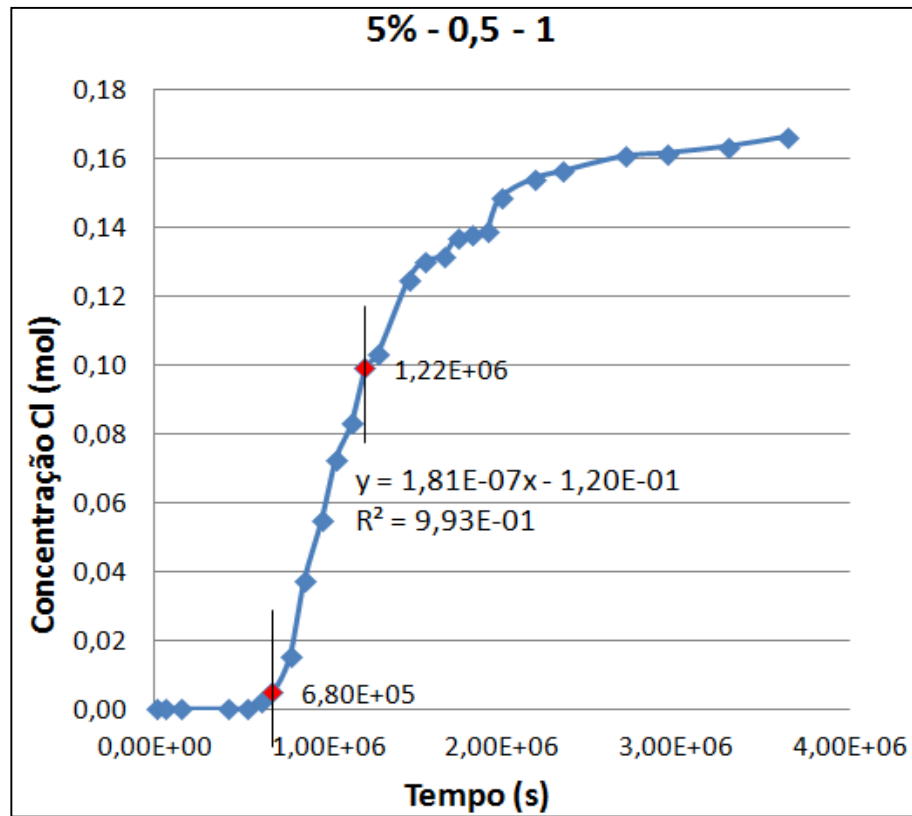
Apêndice D – Gráficos UNE 83987-14

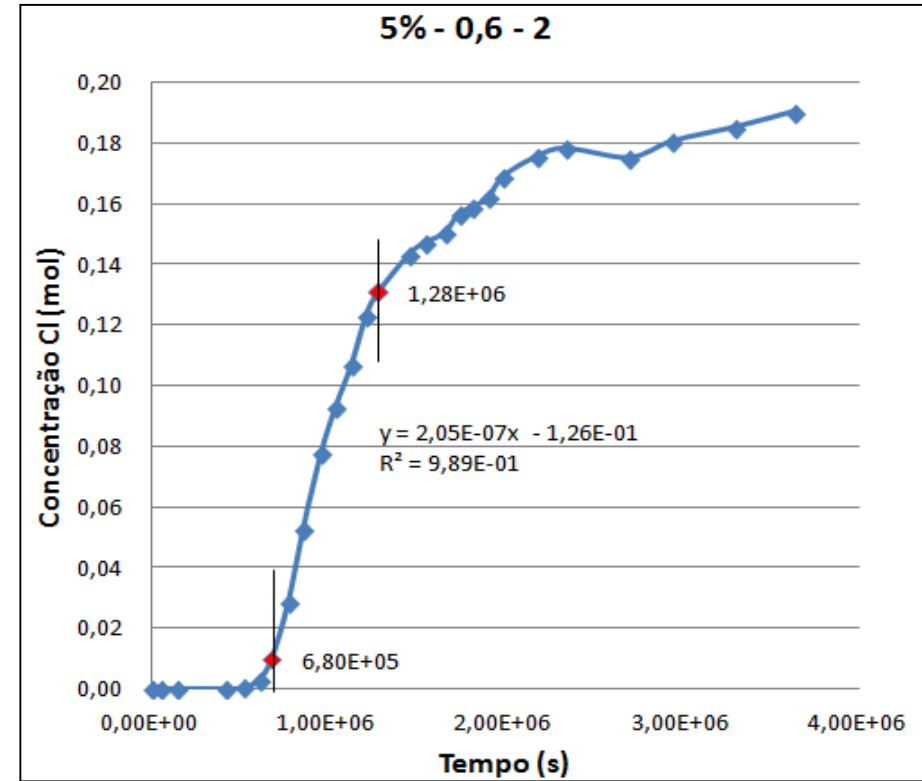
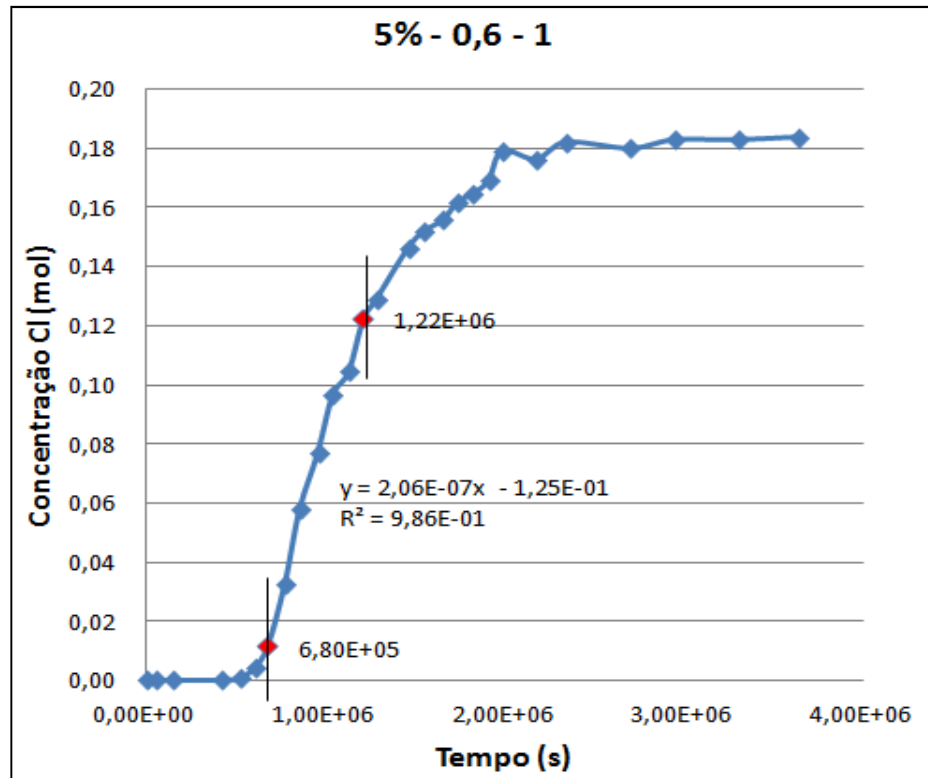


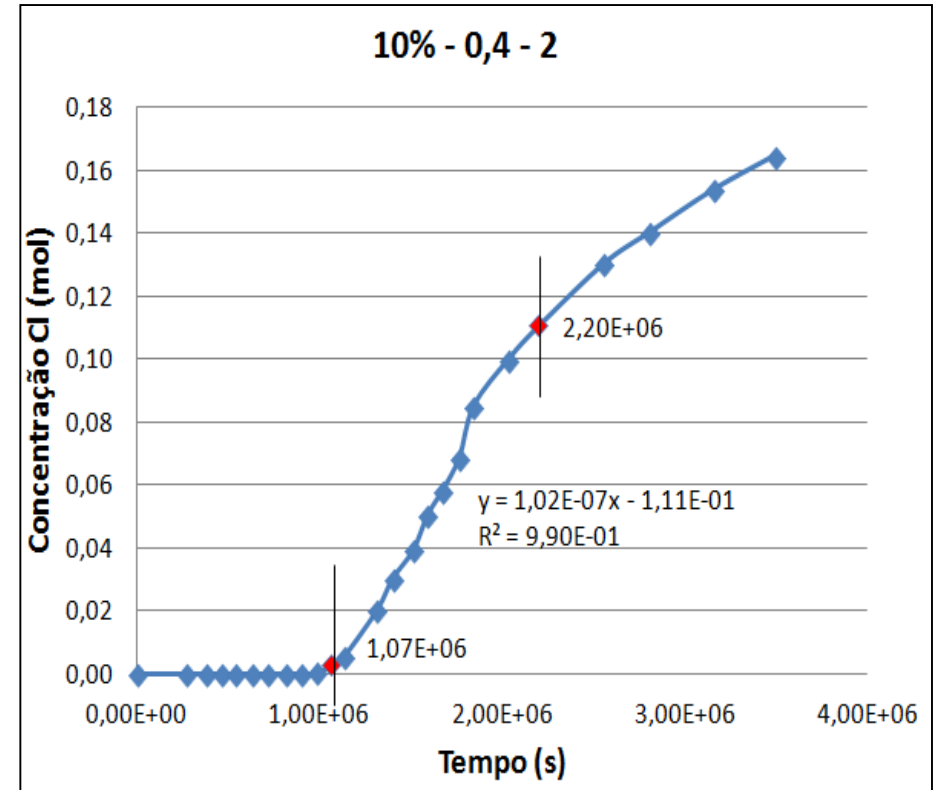
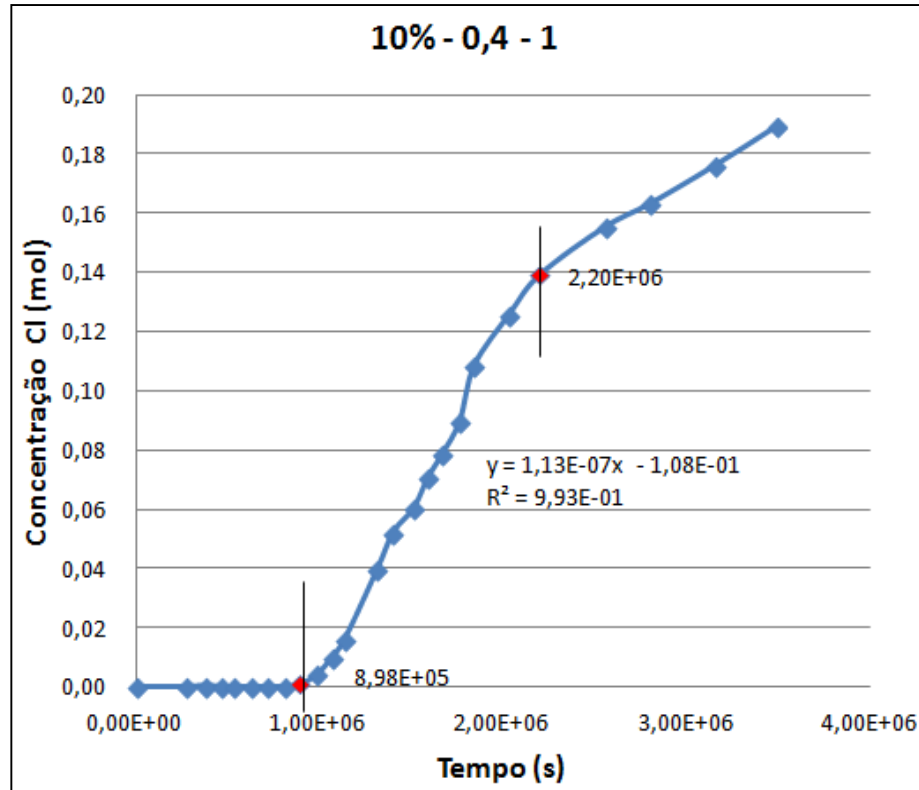


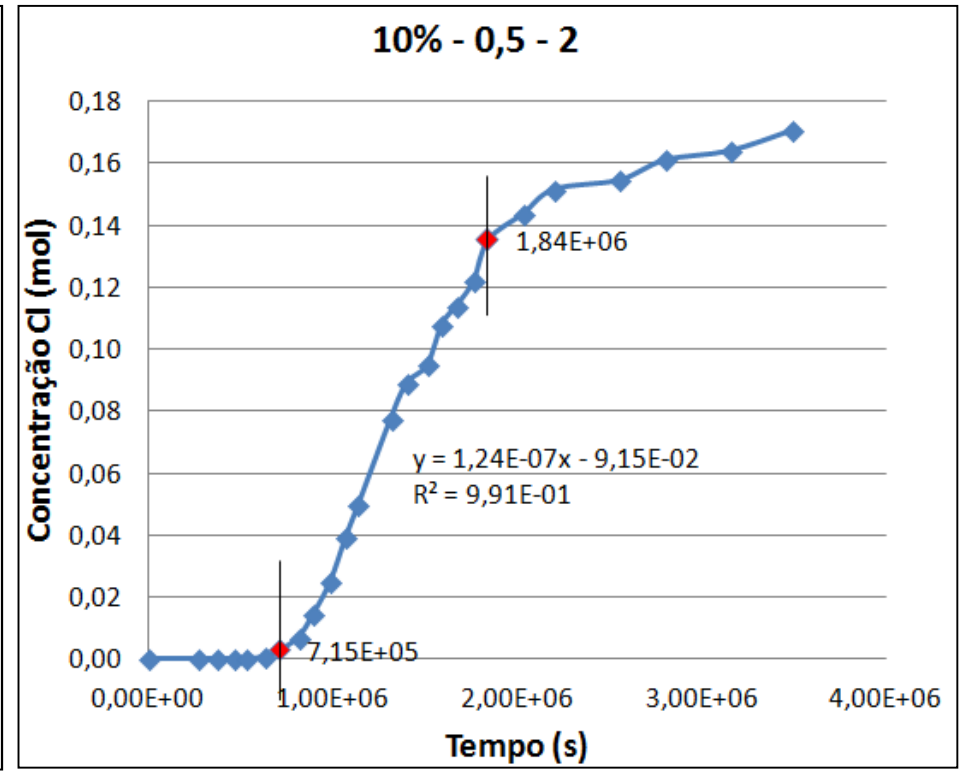
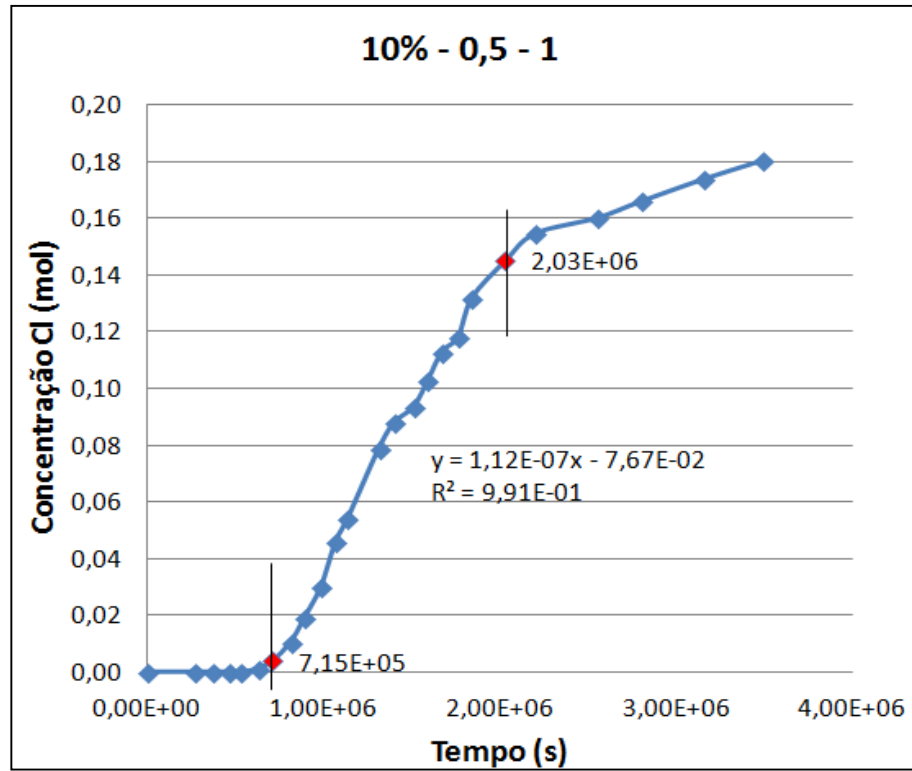


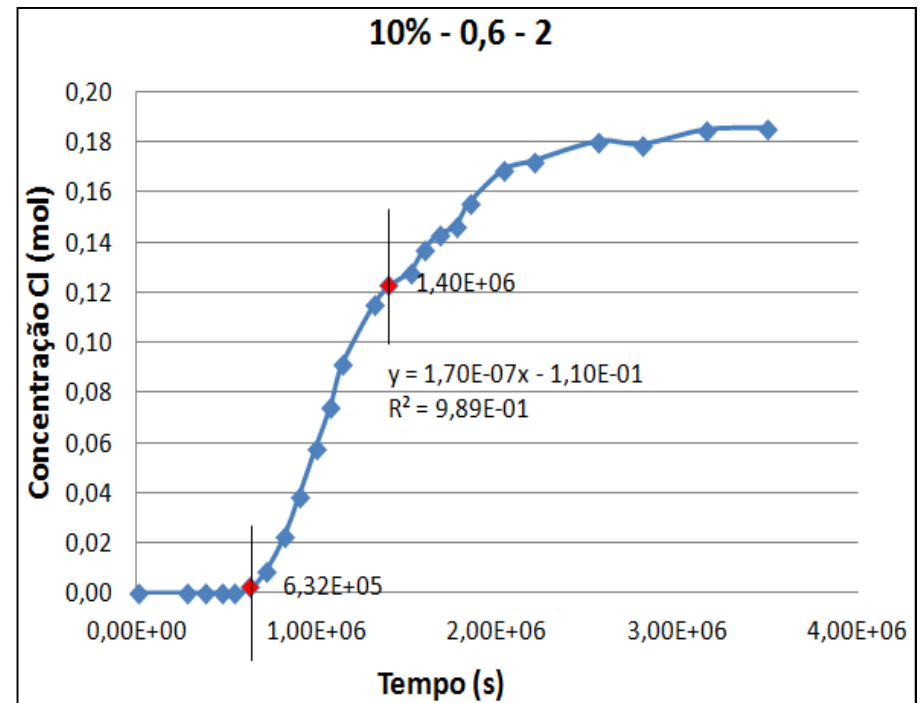
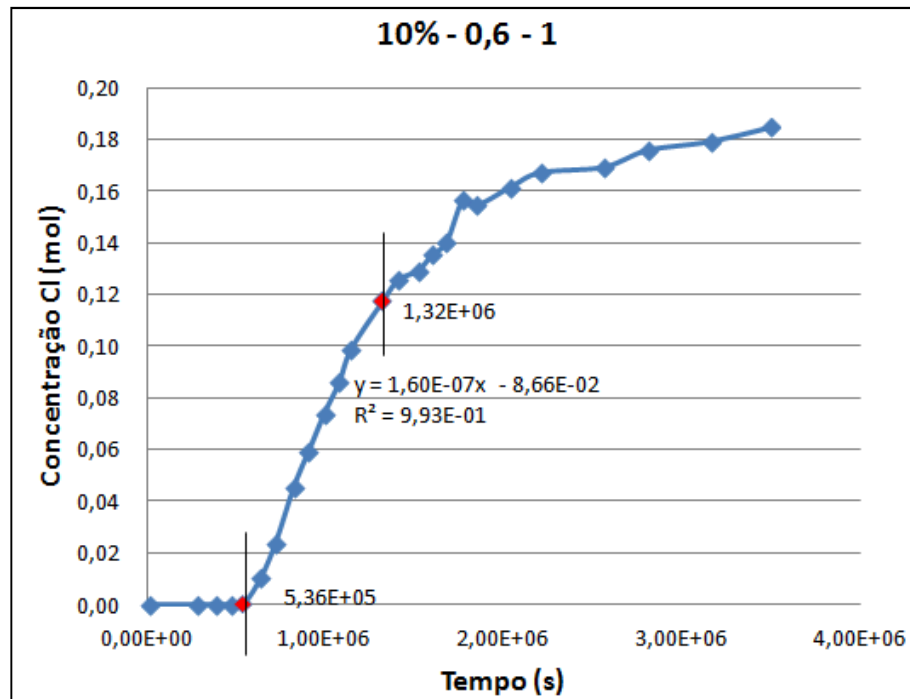












Apêndice E - Coeficiente de difusão no estado estacionário.

Concreto	Coeficiente - A (mols/s)	$\Delta\phi$ (V)	Área - S (cm ²)	Espessura - e (cm)	T (K)	Cl-	D_s (cm ² /s)	D_s médio (cm ² /s)
Ref 0,4 - 1	1,24E-07	9,94	66,60	2,0345	299,97	0,001	1,5E-08	1,63507E-08
Ref 0,4 - 2	1,34E-07	9,55	65,31	2,08975	300,02	0,001	1,77E-08	
Ref 0,5 - 1	1,91E-07	9,53	65,67	2,06325	299,85	0,001	2,48E-08	2,3241E-08
Ref 0,5 - 2	1,78E-07	9,83	66,95	2,04075	299,77	0,001	2,17E-08	
Ref 0,6 - 1	2,81E-07	8,78	65,61	2,0025	299,73	0,001	3,84E-08	3,70139E-08
Ref 0,6 - 2	2,60E-07	9,16	64,09	2,0455	299,80	0,001	3,56E-08	
5% - 0,4 - 1	1,56E-07	9,44	62,72	2,102	299,51	0,001	2,18E-08	2,15003E-08
5% - 0,4 - 2	1,54E-07	9,37	63,69	2,09325	299,53	0,001	2,12E-08	
5% - 0,5 - 1	1,81E-07	9,03	66,86	2,0295	299,46	0,001	2,39E-08	2,32693E-08
5% - 0,5 - 2	1,75E-07	9,39	65,38	2,02375	299,27	0,001	2,26E-08	
5% - 0,6 - 1	2,06E-07	9,70	64,34	2,1095	299,32	0,001	2,73E-08	2,68723E-08
5% - 0,6 - 2	2,05E-07	9,66	66,13	2,09725	299,28	0,001	2,64E-08	
10% - 0,4 - 1	1,13E-07	9,99	65,20	2,12675	299,43	0,001	1,45E-08	1,34794E-08
10% - 0,4 - 2	1,02E-07	10,06	65,03	2,035	299,55	0,001	1,25E-08	
10% - 0,5 - 1	1,12E-07	10,34	64,20	2,05125	299,44	0,001	1,36E-08	1,45184E-08
10% - 0,5 - 2	1,24E-07	10,06	65,88	2,10125	299,42	0,001	1,54E-08	
10% - 0,6 - 1	1,60E-07	9,30	65,94	2,102	299,51	0,001	2,15E-08	2,18785E-08
10% - 0,6 - 2	1,70E-07	9,36	65,07	2,026	299,52	0,001	2,22E-08	

Apêndice F - Coeficiente de difusão no estado não estacionário.

Concreto	t (s)	ΔE (V)	Campo Normalizado ($\Delta\phi$)	Espessura – e (cm)	T (K)	φ	D_{ns} (cm²/s)	D_{ns} médio (cm²/s)
Ref 0,4 - 1	5,80E+05	2,70	1,33	2,03	299,97	51,29	6,95E-08	6,63119E-08
Ref 0,4 - 2	8,92E+05	2,10	1,00	2,09	300,02	38,79	6,31E-08	
Ref 0,5 - 1	5,36E+05	1,91	0,93	2,06	299,85	35,83	1,11E-07	1,23288E-07
Ref 0,5 - 2	4,66E+05	1,74	0,85	2,04	299,77	32,97	1,36E-07	
Ref 0,6 - 1	5,20E+05	1,55	0,77	2,00	299,73	30,00	1,29E-07	1,53325E-07
Ref 0,6 - 2	3,96E+05	1,57	0,77	2,05	299,80	29,65	1,78E-07	
5% - 0,4 - 1	6,82E+05	2,48	1,18	2,10	299,51	45,73	7,08E-08	6,50294E-08
5% - 0,4 - 2	8,28E+05	2,41	1,15	2,09	299,53	44,67	5,93E-08	
5% - 0,5 - 1	6,59E+05	2,29	1,13	2,03	299,46	43,75	7,14E-08	6,75416E-08
5% - 0,5 - 2	7,34E+05	2,29	1,13	2,02	299,27	43,83	6,37E-08	
5% - 0,6 - 1	6,03E+05	2,02	0,96	2,11	299,32	37,16	9,93E-08	9,30831E-08
5% - 0,6 - 2	6,11E+05	2,24	1,07	2,10	299,28	41,42	8,69E-08	
10% - 0,4 - 1	9,52E+05	3,95	1,86	2,13	299,43	72,02	3,3E-08	3,01166E-08
10% - 0,4 - 2	1,08E+06	3,68	1,81	2,04	299,64	70,05	2,73E-08	
10% - 0,5 - 1	6,81E+05	3,37	1,64	2,05	299,44	63,67	4,85E-08	4,94562E-08
10% - 0,5 - 2	7,34E+05	3,23	1,54	2,10	299,42	59,64	5,04E-08	
10% - 0,6 - 1	5,38E+05	3,25	1,54	2,10	299,51	59,86	6,86E-08	6,58553E-08
10% - 0,6 - 2	6,43E+05	2,64	1,31	2,03	299,52	50,58	6,31E-08	

Apêndice G

Leituras individuais de profundidade – NT BUILD 443-95

Ensaio com início aos 28 dias								
Concreto	Profundidade (mm)							Profundidade Média (mm)
REF 0,4 - 1	21,00	19,00	21,00	22,00	23,00	22,00	25,00	21,86
REF 0,4 - 2	17,50	18,50	19,00	18,50	22,00	18,00	16,50	18,57
REF 0,4 - 3	20,50	20,00	22,00	20,00	19,00	18,50	18,00	19,71
REF 0,5 - 1	23,00	25,00	23,50	23,00	24,00	28,00	23,00	24,21
REF 0,5 - 2	25,00	22,00	21,00	24,00	24,50	25,00	25,50	23,86
REF 0,5 - 3	25,50	25,00	26,50	26,00	26,00	24,50	26,00	25,64
REF 0,6 - 1	38,00	35,00	38,00	39,00	33,00	37,00	32,50	36,07
REF 0,6 - 2	32,00	32,00	35,00	29,00	31,00	32,00	34,00	32,14
REF 0,6 - 3	32,00	32,50	34,00	30,00	30,00	31,50	34,50	32,07
5% - 0,4 - 1	18,00	17,00	15,00	15,00	17,00	17,00	15,00	16,29
5% - 0,4 - 2	18,00	22,00	18,50	17,00	16,50	19,00	18,00	18,43
5% - 0,4 - 3	19,00	18,00	19,50	18,00	19,50	17,00	17,00	18,29
5% - 0,5 - 1	20,00	21,00	21,50	19,50	23,00	22,50	20,50	21,14
5% - 0,5 - 2	23,00	23,00	23,50	20,50	22,50	20,50	17,50	21,50
5% - 0,5 - 3	21,00	21,50	22,00	22,00	20,00	20,50	19,00	20,86
5% - 0,6 - 1	21,00	21,00	25,00	20,00	23,50	19,50	25,00	22,14
5% - 0,6 - 2	23,50	23,50	22,00	21,50	19,00	23,00	19,00	21,64
5% - 0,6 - 3	23,00	22,00	22,50	22,50	25,00	22,50	25,00	23,21
10% - 0,4 - 1	13,00	12,00	12,50	11,00	13,00	14,00	14,50	12,86
10% - 0,4 - 2	13,50	15,00	13,50	13,50	13,00	12,50	12,50	13,36
10% - 0,4 - 3	9,50	12,00	12,00	11,50	12,00	12,00	13,00	11,71
10% - 0,5 - 1	13,00	14,00	12,00	13,00	11,00	12,50	13,00	12,64
10% - 0,5 - 2	12,50	14,00	11,50	12,00	14,50	13,50	13,50	13,07
10% - 0,5 - 3	12,00	13,00	14,50	13,00	14,50	14,00	14,50	13,64
10% - 0,6 - 1	18,00	16,50	12,00	14,50	18,00	17,00	13,00	15,57
10% - 0,6 - 2	15,50	17,00	18,00	16,50	15,50	17,00	16,50	16,57
10% - 0,6 - 3	16,00	15,50	18,00	16,00	15,50	19,00	17,00	16,71

Ensaio com início aos 91 dias								
Concreto	Profundidade (mm)							Profundidade Média (mm)
REF 0,4 - 1	16,00	15,00	14,50	17,00	16,00	15,00	20,00	16,21
REF 0,4 - 2	19,00	18,00	15,50	16,50	17,50	17,50	15,00	17,00
REF 0,4 - 3	17,00	19,00	18,00	15,50	15,00	16,50	16,00	16,71
REF 0,5 - 1	21,00	22,00	24,00	19,50	20,50	21,00	21,50	21,36
REF 0,5 - 2	23,50	22,00	22,00	19,50	21,00	19,50	21,00	21,21
REF 0,5 - 3	22,50	21,00	20,50	20,00	22,00	20,50	24,50	21,57
REF 0,6 - 1	30,50	31,50	31,00	32,00	32,00	31,50	32,00	31,50
REF 0,6 - 2	29,50	22,00	31,00	32,00	29,00	32,50	30,00	29,43
REF 0,6 - 3	31,50	30,00	28,50	30,00	30,00	31,00	31,00	30,29
5% - 0,4 - 1	14,50	17,00	19,00	20,00	17,50	16,00	16,50	17,21
5% - 0,4 - 2	13,50	15,00	16,50	15,00	14,50	15,50	17,50	15,36
5% - 0,4 - 3	18,00	14,00	15,50	16,00	14,50	12,50	14,00	14,93
5% - 0,5 - 1	20,00	21,00	20,50	19,50	19,00	21,00	19,50	20,07
5% - 0,5 - 2	17,00	19,00	25,00	17,00	17,00	19,00	22,00	19,43
5% - 0,5 - 3	19,00	19,00	18,00	20,00	21,00	19,00	19,00	19,29
5% - 0,6 - 1	23,50	29,50	27,50	20,00	21,00	19,00	25,00	23,64
5% - 0,6 - 2	22,00	24,00	20,50	25,50	25,50	22,50	24,50	23,50
5% - 0,6 - 3	22,50	20,00	21,00	20,00	22,50	22,50	20,00	21,21
10% - 0,4 - 1	10,00	11,00	10,50	10,50	9,50	10,00	8,50	10,00
10% - 0,4 - 2	9,00	10,00	10,00	12,00	12,50	14,50	10,00	11,14
10% - 0,4 - 3	14,00	10,00	9,00	13,00	13,00	9,00	11,00	11,29
10% - 0,5 - 1	10,00	13,50	16,00	13,00	12,00	10,00	12,00	12,36
10% - 0,5 - 2	8,00	8,00	9,00	10,00	8,00	9,50	8,50	8,71
10% - 0,5 - 3	13,50	12,00	11,50	11,00	9,00	10,50	11,50	11,29
10% - 0,6 - 1	12,50	11,50	12,50	15,50	11,50	15,50	12,50	13,07
10% - 0,6 - 2	15,00	14,50	14,00	13,50	14,50	14,00	13,00	14,07
10% - 0,6 - 3	17,00	13,50	17,00	15,00	16,00	12,50	15,00	15,14