

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo



Dissertação

**Concretos com substituição parcial do cimento pelo
resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais:
Análise quanto à ação de íons cloreto**

Fernando Ritiéle Teixeira

Pelotas, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

**Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do
beneficiamento de rochas ornamentais: Análise quanto à ação de íons cloreto**

Fernando Ritiéle Teixeira

Pelotas, 2019

Fernando Ritiéle Teixeira

Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais: Análise quanto à ação de íons cloreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ariela da Silva Torres
Coorientador: Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga

Pelotas, 2019

CATALOGAÇÃO

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T266c Teixeira, Fernando Ritiéle

Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais : análise quanto à ação de íons cloreto / Fernando Ritiéle Teixeira ; Ariela da Silva Torres, orientadora ; Charlei Marcelo Paliga, coorientador. — Pelotas, 2019.

142 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Tecnologia da arquitetura. 2. Concreto. 3. Reciclagem. 4. Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. 5. Cloretos. I. Torres, Ariela da Silva, orient. II. Paliga, Charlei Marcelo, coorient. III. Título.

CDD : 720

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Fernando Ritiéle Teixeira

Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais: Análise quanto à ação de íons cloreto

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 04 de junho de 2019.

Banca examinadora:

.....
Prof^a. Dr^a. Ariela da Silva Torres (Orientadora)
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga (Coorientador)
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof^a. Dr^a. Maria Tereza Fernandes Pouey
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof^a. Dr^a. Margarete Regina Freitas Gonçalves
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof. Dr. Fábio Kellermann Schramm
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Agradecimentos

Agradeço e dedico essa dissertação para todos que me ajudaram direta ou indiretamente no processo de sua construção.

À vocês meu muito obrigado!

***“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei;
não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.
As facilidades nos impedem de caminhar.
Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”
(Chico Xavier)***

Resumo

TEIXEIRA, Fernando Ritiele. **Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais: Análise quanto à ação de íons cloreto**. 2019.142f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Em decorrência do aumento populacional, da melhoria das condições de vida, da elevação dos níveis de consumo e da crescente industrialização dos países em desenvolvimento, estima-se que a produção de concreto apresentará expressivo crescimento ao longo das próximas décadas. O processo de produção do concreto é responsável por aproximadamente 5% das emissões mundiais de CO₂, poluente expressivo no meio ambiente. A partir destes conceitos, este trabalho avaliou a influência da substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) na resistência à compressão do concreto, absorção por capilaridade, absorção por imersão e penetração de íons cloreto em ambiente natural nas cidades de Pelotas e Rio Grande. Além disso, foi investigada a penetração de íons cloreto em ambiente de laboratório. Utilizou-se o RBRO proveniente de uma empresa beneficiadora de mármore e granitos localizada na região sul do Rio Grande do Sul. O resíduo foi caracterizado mineralogicamente por ensaios de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (EDX) e fisicamente por ensaios de granulometria à laser e massa específica. Adotou-se um traço de concreto de referência produzido com cimento CP V-ARI, a partir da dosagem pelo Método IPT/EPUSP. O resíduo foi utilizado em proporções de 5%, 7,5%, 10% e 12,5% de substituição em massa ao cimento. Os resultados tratados por análise estatística indicam a possibilidade de substituir até 7,5% do cimento pelo RBRO, atendendo simultaneamente os critérios de resistência à compressão, absorção de água e penetração de íons cloreto, gerando um concreto com resistência adequada às normas brasileiras e com potencial possibilidade de uso estrutural. Nesse teor de substituição houve um aumento da resistência mecânica, diminuição da permeabilidade e uma menor penetração de íons cloreto, devido ao processo de refinamento dos poros promovido pelo RBRO.

Palavras-chave: Tecnologia da arquitetura; Concreto; Reciclagem; Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais; Cloretos.

Abstract

TEIXEIRA, Fernando Ritielle. **Concretes with partial replacement of cement by the residue of ornamental rocks: Analysis of the action of chloride ions**. 2019. 142f. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) - Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

As a result of population growth, improved living conditions, rising consumption levels and growing industrialization in developing countries, it is estimated that concrete production will show significant growth over the coming decades. The concrete production process accounts for approximately 5% of the world's CO₂ emissions, a significant pollutant in the environment. Based on these concepts, this work evaluated the influence of the partial replacement of the Portland cement by the ornamental rock residue (RBRO) on concrete compressive strength, capillary absorption, immersion absorption and chloride ion penetration in natural environments in cities of Pelotas and Rio Grande. In addition, the penetration of chloride ions in a laboratory environment was investigated. The residue was characterized mineralogically by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (EDX) and physically by X-ray diffraction (XRD) tests. Laser particle size and specific mass tests. A trace of reference concrete produced with CP V-ARI cement was adopted from the IPT / EPUSP method. The residue was used in proportions of 5%, 7.5%, 10% and 12.5% of mass substitution to the cement. The results treated by statistical analysis indicate the possibility of replacing up to 7.5% of the cement by RBRO, simultaneously meeting the criteria of resistance to compression, water absorption and chloride ion penetration, generating a concrete with adequate resistance to Brazilian standards and with possibility of structural use. In this substitution content there was an increase in mechanical resistance, decrease in permeability and a lower penetration of chloride ions, due to the process of pore refinement promoted by the RBRO.

Keywords: Architecture technology; Concrete; Recycling; Residue of the processing of ornamental stones; Chlorides.

Lista de Figuras

Figura 1 – Difratoograma do RBRO	25
Figura 2 – Formas de penetração dos íons cloreto no concreto.....	35
Figura 3 - Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos	46
Figura 4 – Delineamento da pesquisa.....	53
Figura 5 – Fluxograma do programa experimental.....	54
Figura 6 –Distribuição granulométrica do agregado miúdo, conforme NBR NM 248:2003.	56
Figura 7 – Composição granulométrica do agregado graúdo, conforme NBR NM 248:2003.....	56
Figura 8 – Coleta do RBRO utilizada na pesquisa.....	58
Figura 9 – Preparação do RBRO	59
Figura 10 – Curva granulométrica do RBRO.....	60
Figura 11 – Difratoograma do RBRO.....	61
Figura 12 – Equações de dosagem.....	63
Figura 13 - Corpos de prova após ruptura.....	66
Figura 14 - Representação esquemática da realização do ensaio de durabilidade.....	67
Figura 15 - Local de armazenamento dos corpos de prova imersos em solução salina.....	67
Figura 16 - Corpos-de-prova imersos parcialmente em solução de NaCl.....	68
Figura 17 - Corpo-de-prova após ruptura por compressão diametral.....	69
Figura 18 - Corpo-de-prova após aspersão de solução de nitrato de prata.....	69
Figura 19 - Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos.....	70
Figura 20 - Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto....	71
Figura 21 - Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto....	71
Figura 22 - Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande.....	72
Figura 23 - Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande	72
Figura 24 - Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande.	73

Figura 25 - Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras.	76
Figura 26 - Temperatura em cada período de exposição das amostras.	76
Figura 27 - Umidade relativa para cada período de exposição.....	76
Figura 28 - Resistência à compressão	78
Figura 29 - Teste de Tukey da resistência aos 3 dias.....	81
Figura 30 – Teste de Tukey da resistência aos 7 dias.....	81
Figura 31 – Teste de Tukey da resistência aos 28 dias.....	82
Figura 32 – Absorção de água por capilaridade	83
Figura 33 - Teste de Tukey para a absorção por capilaridade	84
Figura 34 - Absortividade das amostras com 72 horas	85
Figura 35 - Correlação entre a resistência à compressão (28 dias) e a absorptividade	86
Figura 36 - Altura de ascensão capilar	87
Figura 37 - Correlação entre a resistência à compressão(28 dias) e a altura de ascensão capilar	87
Figura 38 – Absorção de água por imersão	88
Figura 39 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão.....	90
Figura 40 - Correlação entre a resistência à compressão e a absorção por imersão	91
Figura 41 – Correlação entre a absorção por imersão e capilaridade	91
Figura 42 – Penetração de íons cloreto após 6 meses de imersão	92
Figura 43 – Penetração de Íons cloreto após 12 meses de imersão.....	93
Figura 44 – Penetração de Íons cloreto após 6 meses de imersão.....	95
Figura 45 – Penetração de íons cloreto após 12 meses de exposição natural e imersão em solução salina.....	96
Figura 46 – Penetração de íons cloreto ao longo do tempo nas duas cidades.....	96

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais utilizado por diferentes autores, em porcentagem.....	24
Tabela 2 – diâmetro médio das partículas do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais utilizados por diferentes autores.....	26
Tabela 3 - Influência da substituição do aglomerante pelo RBRO na resistência à compressão.....	29
Tabela 4 – Caracterização dos agregados.....	55
Tabela 5 - Composição química e física do aglomerante.....	57
Tabela 6 - Resultado da caracterização do RBRO.....	59
Tabela 7 - Resultado do ensaio de EDX.....	61
Tabela 8 - Resultados do ajuste da curva de dosagem experimental.....	63
Tabela 9 – Traços unitários utilizados na confecção dos corpos de prova.....	64
Tabela 10 - Variáveis climáticas da cidade de Rio Grande/RS	74
Tabela 11 - Variáveis climáticas da cidade de Pelotas/RS	75
Tabela 12 - Média dos resultados de compressão axial em todas as idades dos concretos estudados.....	78
Tabela 13 – Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à compressão	80
Tabela 14 - Média dos resultados de absorção por capilaridade dos concretos estudados.....	83
Tabela 15 - Resultado de Análise de Variância – valor p– da absorção por capilaridade	84
Tabela 16 - Altura de ascensão capilar e raio médio dos capilares	87
Tabela 17 - Média dos resultados de absorção por imersão e índice de vazios dos concretos estudados.....	88
Tabela 18 - Resultado de Análise de Variância – valor p– da absorção por imersão	89
Tabela 19 – Penetração de cloretos e coeficiente de penetração após 6 meses de imersão.....	92
Tabela 20 - Resultado de Análise de Variância – valor p– da penetração de ions cloretos.....	93

Tabela 21 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Pelotas após 6 meses.....	94
Tabela 22 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Pelotas após 12 meses.....	94
Tabela 23 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Rio Grande após 6 meses de exposição.....	94
Tabela 24 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Rio Grande após 12 meses de exposição.....	95
Tabela 25 - Resultado de Análise de Variância – valor p– da penetração de íons cloreto.....	97
Tabela 26 - Variações de penetração de cloretos com as condições climáticas na cidade de Rio Grande.....	98
Tabela 27 - Variações de penetração de cloretos com as condições climáticas na cidade de Pelotas.....	99

Lista de Quadros

Quadro 1 – Fatores que Influenciam na penetração de íons cloreto no concreto.....	34
Quadro 2 - Mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.....	36
Quadro 3 - Estudos de concretos que incorporaram o resíduo de rochas ornamentais no concreto.....	48
Quadro 4 – Metodologia dos ensaios realizados	65

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Problema de pesquisa.....	19
1.2	Questões de pesquisa.....	21
1.3	Objetivos.....	21
1.4	Delimitação da pesquisa.....	22
1.5	Estrutura da pesquisa.....	22
2	Concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais....	24
2.1	Influência das propriedades físicas e químicas do RBRO no concreto.....	24
2.2	Influência do RBRO na porosidade e resistência à compressão do concreto.....	26
2.2.1	Porosidade.....	26
2.2.2	Resistência à compressão do concreto.....	28
2.3	Influência do RBRO na penetração de íons cloreto.....	30
2.4	Durabilidade do concreto.....	31
2.5	Penetração de íons cloreto em concretos.....	34
2.5.1	Fatores que Influenciam a Penetração de íons cloreto.....	37
2.6	Adições minerais para o concreto.....	41
2.7	Ensaio para avaliar os concretos frente à ação de íons cloreto.....	42
2.7.1	Ensaio natural.....	43
2.7.2	Ensaio acelerados.....	45
2.8	Estado da arte do tema da pesquisa.....	47
3	Programa experimental.....	52
3.1	Delineamento da pesquisa.....	53
3.2	Fluxograma do programa experimental.....	54
3.3	Caracterização dos materiais empregados.....	55
3.3.1	Agregados.....	55
3.3.2	Cimento.....	56
3.3.3	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO).....	57
3.3.3.1	Caracterização do RBRO.....	59
3.3.4	Água.....	62
3.3.5	Cloreto de sódio.....	62
3.4	Determinação dos traços de concreto.....	62
3.5	Ensaio.....	64

3.5.1 Ensaio mecânico.....	65
3.5.2 Ensaios físicos.....	66
3.5.3 Ensaios de durabilidade.....	66
3.5.3.1 Ensaios de penetração de íons cloreto em laboratório.....	67
3.4.3.2 Ensaio natural de penetração de cloretos nas cidades de Pelotas e Rio Grande.....	70
3.6 Caracterização climática das cidades de Pelotas/RS e Rio Grande/RS.....	73
3.7 Análise estatística dos resultados.....	77
4 Resultados.....	78
4.1 Resultados do comportamento mecânico.....	78
4.2 Resultados do comportamento físico.....	82
4.2.1 Absorção de água por capilaridade.....	82
4.2.2 Absorção de água por imersão.....	88
4.3 Resultados dos ensaios durabilidade.....	91
4.3.1 Penetração de cloretos em ambiente de laboratório.....	91
4.3.2 Penetração de cloretos em ambiente natural.....	93
4.4 Compilação de dados.....	100
5 Conclusões.....	102
5.1 Sugestão para trabalhos futuros.....	103
Referências.....	105
Apêndices.....	117

1 Introdução

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, com uma produção anual estimada em 23 bilhões de toneladas, o que corresponde a um consumo médio de aproximadamente 10 kg de concreto por pessoa por dia (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A fabricação de cimento, em particular, tem um considerável impacto ambiental devido ao elevado consumo energético e às emissões de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (MALHOTRA, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatham House (2018), em 2015 o cimento foi responsável por 8% das emissões mundiais de CO₂. As emissões de CO₂ oriundas da produção do cimento superam a do combustível de aviões (2,5%) e não está muito atrás das geradas pelo agronegócio global (12%).

A emissão de CO₂ na produção do cimento Portland comum é composta de duas fontes: a primeira é a descarbontação do carbonato de cálcio (CaCO₂) que libera aproximadamente 528 Kg CO₂ / t cimento, enquanto que a segunda fonte é referente à queima de combustíveis fósseis que libera cerca de 367 Kg CO₂ / t cimento, totalizando, aproximadamente, 895 kg de CO₂ / t cimento (EPA, 2015).

Conforme o último relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015), no Brasil, entre 2004 e 2014, em função do forte crescimento econômico e do investimento maciço do governo em obras de habitação e infraestrutura, o consumo de cimento saltou de 35 milhões de toneladas para mais de 70 milhões, representando um aumento de 100%. Diante deste panorama, as empresas produtoras de cimento investiram maciçamente em parques industriais. Nesse período, foram implantadas 36 novas fábricas, além das ampliações de unidades já existentes, sendo mais de R\$15 bilhões investidos em fábricas de cimento em todo o Brasil.

A indústria do cimento nacional tem tradição no uso de cimentos com adições. O aproveitamento de subprodutos de outras atividades e matérias-primas alternativas é realizado há mais de 50 anos, prática que, só mais recentemente, vem

sendo cada vez mais adotada no mundo. A produção de cimentos com adições ao clínquer, com materiais como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filler calcário, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, propicia a redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui a produção de clínquer e, conseqüentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação (SNIC, 2015).

Pesquisas têm se mostrado bastante promissoras quanto à incorporação de resíduos do setor industrial em concretos, como forma de reduzir o consumo de cimento e até melhorar as propriedades do mesmo. Essas pesquisas buscam desenvolver concretos com menor impacto ambiental, partindo de um processo de produção diferente do processo tradicional, porém com propriedades de durabilidade iguais ou superiores aos dos concretos convencionais (OLSSON,2018).

Vários estudos apontam que a utilização desses materiais são capaz de gerar melhorias nas propriedades mecânicas, de durabilidade e de trabalhabilidade do concreto, além de reduzir os custos de sua produção e o impacto ambiental (HOPPE,2013; OLSSON,2018).

Entre esses subprodutos estão os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Garas et al. (2014) afirmam que a utilização do RBRO se mostra promissora na mitigação de impactos ambientais, no desenvolvimento sustentável da construção civil e no melhoramento de propriedades do concreto.

No que tange a produção do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), em 2016, a produção mundial estimada, de rochas ornamentais, atingiu 145 milhões de toneladas, com a China respondendo por cerca de 31,7%. O Brasil se posiciona em 4º lugar no ranking mundial de produção, com 5,9%. A produção brasileira de rochas ornamentais é da ordem de 8,5 milhões de toneladas por ano e as exportações atingem aproximadamente 2,4 milhões de toneladas por ano, colocando o país no seletto grupo dos principais produtores mundiais (MONTANI, 2017).

Deve se destacar que 41% dos blocos, em volume, são transformados em rejeitos, assim sendo, fica evidente que o processo de beneficiamento de rochas ornamentais é arcaico, quase artesanal, e com pouca tecnologia investida para minimizar a geração exorbitante de resíduo durante o processo de processamento das rochas (ABIROCHAS, 2017).

Sendo assim, torna-se importante conhecer as propriedades dos concretos produzidos com o RBRO em substituição ao aglomerante, a fim de avaliar a viabilidade de sua utilização para a produção de concretos em escala industrial. Um aspecto primordial, sobre o qual não se tem muitos estudos, é a durabilidade desses concretos frente à ação de íons cloreto, sendo a ação dos mesmos, um dos principais responsáveis pelo processo de corrosão das armaduras.

Os íons cloreto podem ter origem na mistura do concreto a partir de aditivos ou águas contaminadas e também penetrando no concreto depois de endurecido. Nos trabalhos desenvolvidos, quase que na sua totalidade são apresentados resultados das propriedades mecânicas e a sua viabilidade técnica na produção de concretos, tais como os trabalhos de Ashish (2018), Rodrigues, Brito e Sardinha (2015) e Bacarji et al. (2013), que investigaram o efeito da substituição do aglomerante pelo RBRO na resistência mecânica. As pesquisas que estudam a durabilidade dos concretos produzidos com o RBRO frente à ação de íons cloreto ainda são poucas.

Nesse contexto de pesquisas que buscam alternativas construtivas sustentáveis e socialmente responsáveis, é de extrema importância o conhecimento do comportamento do concreto produzido com o RBRO frente à ação de íons cloreto. Sendo assim, poderá ser possível desenvolver concretos que possam incorporar o resíduo, reduzir as emissões de CO₂ e atender as exigências de durabilidade e resistência mecânica para produzir concretos com fins estruturais.

1.1 Problema de pesquisa

O concreto, atualmente, é o material de construção mais popular no mundo devido ao seu custo relativamente barato e a sua versatilidade, sendo adaptável a uma ampla variedade de campos da construção civil. Portanto, o papel do concreto na promoção do desenvolvimento da sociedade continuará, sem dúvida, a desempenhar um papel crucial no futuro (ERDEM; BLANKSON, 2014).

Em relação ao RBRO, de acordo com Demirel e Alyamac (2018), com o crescimento imobiliário das últimas décadas, o uso de rochas ornamentais nas edificações aumentou expressivamente. Assim, à medida que a produção das mesmas cresce a quantidade de resíduos do seu beneficiamento descartados de forma ambientalmente inadequada se torna cada vez mais comum e maior em

volume. Ao utilizar esse passivo ambiental em outros setores, o ganho econômico pode ser alcançado e a poluição ambiental pode ser mitigada.

Segundo Sato, Galina e Teixeira (2018) é de extrema importância a preocupação com estudos que tornem o setor de rochas mais sustentável do ponto de vista ambiental, proporcionando um destino mais adequado aos rejeitos produzidos por este setor e que também proporcione o emprego do resíduo do ponto de vista técnico, garantindo a qualidade e a durabilidade do produto que venha a incorporar estes rejeitos.

Soliman (2013) ao avaliar os efeitos da utilização do resíduo do beneficiamento do mármore em diversos teores compreendidos entre 2,5 e 20 %, relata que a resistência à compressão do concreto aumentou em média 25 % para substituições de até 10 %. Já substituições acima de 10 % foram responsáveis por uma redução da resistência à compressão em aproximadamente 26 %. A substituição de cimento por resíduos de mármore em proporções entre 5 e 10 %, além de melhorar as propriedades mecânicas do concreto, reduz as emissões de CO₂ e os custos de produção do concreto em 12 % e 17 %, respectivamente.

Paralelo à problemática apresentada, a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado devido à ação de íons cloreto representa, na atualidade, um sério problema econômico. Em obras públicas, a recuperação dos danos causados pela ação dos íons cloreto gira em torno 800 milhões por ano (DOTTO, 2012).

Nesse contexto, justifica-se o desenvolvimento desse trabalho pela importância socioambiental e econômica, pois, essa pesquisa, busca desenvolver um concreto onde parte do cimento seja substituído por RBRO, matéria prima essa que além de ser abundante em nossa região, não necessita passar pelo processo de sinterização para formar compostos responsáveis pela resistência mecânica do cimento, sendo possível, produzir concretos com menores consumo de cimento por m³ e conseqüentemente com um preço mais acessível, mantendo os requisitos de durabilidade e resistência. Em função das características dos resíduos envolvidos no estudo e do processo de produção, sem a utilização de fornos rotativos, este estudo, contribuirá de fato para a diminuição dos impactos ambientais causados pelas indústrias do concreto.

1.2 Questões de pesquisa

Reconhecendo a necessidade do estudo das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto produzido com substituição parcial do cimento pelo RBRO para aplicação em concretos estruturais, a seguinte questão de pesquisa foi elaborada:

Qual a influência da substituição do cimento pelo RBRO na produção de concretos quanto a penetração de íons cloretos?

A partir da questão principal, as seguintes questões secundárias foram definidas:

- A substituição parcial do cimento pelo RBRO na produção de concretos, irá propiciar um concreto com desempenho igual ou superior ao concreto de referência quanto a penetração de íons cloretos?
- Qual a influência dos diferentes teores de substituição do cimento pelo RBRO na profundidade de penetração de íons cloreto?
- Como os teores de substituição influenciam no comportamento mecânico, físico e de penetração de íons cloreto no concreto?

1.3 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais quanto à ação de íons cloreto.

Com a finalidade de se atingir o objetivo principal, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar o melhor teor de substituição do cimento pelo RBRO, que atenda simultaneamente os critérios de resistência à compressão, absorção de água e penetração de íons cloreto .
- Avaliar o desempenho físico e mecânico dos concretos produzidos com RBRO em substituição parcial ao aglomerante;

1.4 Delimitação da pesquisa

Existem vários fatores que interferem nas propriedades do concreto, como o tipo de cimento, a relação água/cimento, o agregado graúdo e miúdo, o uso de aditivos, as adições minerais empregadas, os métodos e condições de ensaios utilizados, entre tantos outros. Entretanto, foi preciso determinar os limites que nortearam o programa experimental, com os seguintes itens em destaque:

- Como primeira limitação desta pesquisa, tem-se o ambiente urbano para o ensaio natural das amostras de concreto. Estas tiveram como local de exposição a região do porto de Pelotas/RS e a Vila Maria na cidade de Rio Grande/RS (Classe II de agressividade ambiental), de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Devido a isto, os resultados alcançados neste trabalho são válidos para ambientes com características climáticas e de agressividade ambiental semelhantes às localidades em questão;
- O RBRO é resultado do desdobramento das rochas pelo tear de fios diamantados, ou seja, o material não abrange todos os resíduos gerados nas distintas etapas do beneficiamento.

1.5 Estrutura da pesquisa

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo está inserida a introdução, a problemática do estudo e sua importância, as questões da pesquisa, os objetivos, a hipótese de pesquisa e o seu delineamento.

No capítulo dois está contemplado o estado da arte, que consistiu na realização de uma pesquisa exploratória a partir de uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o tema. São apresentados conceitos fundamentais e resultados de pesquisas realizadas, que foram utilizados como norteadores para o desenvolvimento deste estudo, com ênfase em comportamento de concretos produzidos com RBRO, conceito de vida útil, indicadores de durabilidade e penetração de cloretos em estruturas de concreto armado.

O capítulo três contempla o programa experimental, onde é feita uma descrição da metodologia utilizada para a obtenção dos resultados, bem como do conjunto de materiais, técnicas e procedimentos utilizados na pesquisa.

O quarto capítulo apresenta os resultados, análises obtidas e o tratamento estatístico dos dados e as conclusões da pesquisa.

O quinto capítulo traz as conclusões da pesquisa, apontando a influência das variáveis estudadas.

Após o Capítulo 5, são apresentadas as Referências Bibliográficas, onde encontram-se as obras mencionadas no texto.

Por fim, está exposto o apêndice.

2 Concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

2.1 Influência das propriedades físicas e químicas do RBRO no concreto

De acordo com Negredo (2018), o RBRO é considerado inerte, em função do longo processo de formação das rochas que as torna estáveis em condições normais. Sendo assim, não são necessários ensaios mais específicos para avaliar a sua reatividade, devendo ser levado em conta, basicamente, a caracterização mineralógica e composição química.

Na Tabela 1, estão apresentados alguns resultados de estudos da composição química de diferentes resíduos oriundos de rochas ornamentais e que todos eles se mostraram inertes, conforme requisito da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 1 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais utilizado por diferentes autores, em porcentagem

Autores	Rocha	SiO₂	CaO	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O
Mittri (2016)	Mármore e Granito	66,82	3,44	13,5	3,79	0,93	0,06	3,83	-
Sato, Galina e Teixeira (2018)	Mármore e Granito	18,65	63,72	4,91	2,97	0,75	2,87	0,8	-
Ghorbani et al. (2019)	Granito	70,2	3,7	15,8	1,9	0,6	0,6	3,7	2,1
Ghorbani et al. (2018)	Mármore	1,3	85,3	0,6	0,4	0,6	0,3	0,1	0,1
Petry et al. (2017)	Mármore e Granito	58,48	10,48	9,83	1,67	1,22	0,11	1,01	0,61
Dietrich, Teles e Vieira (2017)	Mármore e Granito	66,8	3,44	13,5	3,79	0,93	0,06	3,83	3,5
Rodrigues (2015)	Mármore	1,39	54,5	0,32	0,14	0,64	< 0,10	<0,06	0,04
Abd Elmoaty (2013)	Granito	85,5	2,1	4,9	0,4	2,5	1,2	-	-

Fonte: Autor

Com base na Tabela 1, é possível concluir que no resíduo de granito (RG) a composição química tem predominância de sílica (SiO_2) e feldspato alumina (Al_2O_3). Por outro lado, no resíduo do mármore (RM) o elemento que predomina é o óxido de cálcio (CaO) e sílica (SiO_2).

Ramos et al. (2013), em um estudo que consistia na produção de argamassas substituindo o cimento por resíduo de granito, atribuíram a redução no ingresso de cloretos nas misturas ao fato da formação de cloroaluminatos, provenientes da combinação da alumina (Al_2O_3), presente no resíduo, com os íons cloreto, formando o sal de Friedel (C-A-H).

Mittri (2016), do mesmo modo, notou que a utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais proporcionou uma redução significativa de penetração de íons cloreto para o interior do concreto, devido à combinação dos íons cloreto com o aluminato tricálcico (C_3A). Sendo assim, a composição química do RBRO exerce influência direta na capacidade de diminuir a presença de íons cloreto livres no interior do concreto, uma vez que a capacidade de fixação de cloretos na forma de sal de Friedel está relacionada com o teor de alumina (Al_2O_3) presente no resíduo.

Na Figura 1 é apresentada a caracterização mineralógica com o difratograma típico do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, que demonstra a inexistência de reatividade, em decorrência da mesma apresentar um pico cristalino bem definido de sílica (SiO_2) e ausência de halo amorfo, portanto, não dispõe de fração vítrea passível de reatividade química com os compostos do cimento.

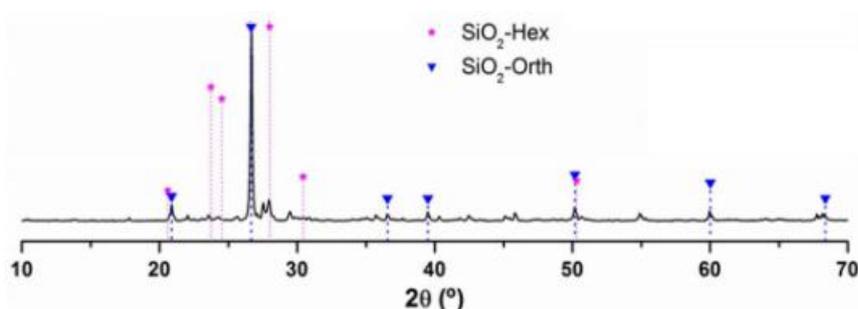


Figura 1 – Difratograma do RBRO
Fonte: Dietrich, Teles e Vieira (2017)

Na Tabela 2 estão apresentados os diâmetros médios das partículas dos resíduos utilizados por alguns pesquisadores.

Tabela 2– diâmetro médio das partículas do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais utilizados por diferentes autores

Autores	Tipo de rocha	Diâmetro médio das Partículas (μm)
Dietrich, Teles e Vieira (2017)	Mármore e Granito	22,00
Petry et al. (2017)	Mármore e Granito	21,30
Degen (2017)	Mármore e Granito	6,33
Barros (2008)	Mármore e Granito	22,00
Ramos et al. (2013)	Granito	13,05
Khodabakhshian et al. (2018)	Mármore	4,74

Fonte: Autor

A finura influencia nas propriedades mecânicas e de durabilidade, uma vez que o aumento da finura e da área específica do resíduo aumenta a eficiência como agente de nucleação para a precipitação dos produtos hidratados (HOPPE FILHO, 2008).

No estudo de Singh, Nagar e Agrawal (2016) foi comprovado que a utilização do resíduo de rochas ornamentais em substituição ao agregado miúdo em teores de até 25% reduz a penetração de íons cloreto, devido ao efeito filler e a melhor capacidade de ligação entre as partículas, pois os grãos do resíduo apresentam um formato angular e rugoso, que melhoram a aderência entre a pasta e o agregado, melhorando a microestrutura do concreto.

2.2 Influência do RBRO na porosidade e resistência à compressão do concreto

A seguir é demonstrada a influência do RBRO sobre algumas propriedades do concreto.

2.2.1 Porosidade

A penetração de substâncias agressivas no concreto é governada pela estrutura dos poros da pasta de cimento. Sendo que o concreto é um material com porosidade aberta e, por esse motivo, existe a possibilidade de transporte através do sistema de poros. O transporte de matéria está frequentemente envolvido na deterioração do concreto (HASHOLT; JENSEN, 2015).

A porosidade refere-se à totalidade dos vazios e a absorção está relacionada

com os poros que tem comunicação com o exterior, sendo a permeabilidade relacionada à continuidade da rede de poros, formando canais. A permeabilidade tem relação direta com a durabilidade do concreto, pois a água está geralmente envolvida em todas as formas de deterioração (NEVILE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville e Brooks (2013), a existência da porosidade torna o concreto um material permeável, sendo a permeabilidade definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. A permeabilidade é influenciada por fatores como:

- Grau de hidratação: quanto maior o grau de hidratação do cimento, menor a porosidade, ou seja, quanto mais velho o concreto, menos permeável;
- Relação água/cimento: quanto menor a relação água/cimento, menor a porosidade;
- Adensamento: quanto melhor o adensamento, menor índice de ar aprisionado;
- Cura: concretos bem curados possuem maior grau de hidratação do cimento.

O tamanho dos poros na pasta de cimento varia em várias ordens de grandeza. Os poros podem ser classificados como poros aéreos aprisionados (formados durante a consolidação do concreto); poros incorporados ao ar (obtidos usando aditivos incorporadores de ar); poros capilares (da água livre no concreto); e gel poros (devido ao gel de água). Os três primeiros tipos de poros exercem maior influência na durabilidade do concreto (DYER, 2015; RIBEIRO; CASCUDO, 2018).

Poros maiores que 0,1 microns (10^{-7} metro) contribuem para o transporte de massa por difusão, migração iônica, capilaridade e permeabilidade, enquanto poros menores afetam apenas o processo de difusão gasosa e a migração de íons (RIBEIRO; CASCUDO, 2018; NEVILE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, a zona de transição exerce influência direta no transporte dos íons cloro através do processo de difusão, que penetra para o interior da massa de concreto através da zona de transição, atingindo grandes profundidades e reduzindo a durabilidade do concreto (DYER, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014; RIBEIRO; CASCUDO, 2018).

Negredo (2018) avaliou a porosidade de concretos com substituição do cimento Portland de alta resistência inicial - CP V ARI - pelo RBRO. O autor

substituiu o RBRO em teores de 0%, 5%,15% e 25% em massa ao cimento. A porosimetria foi avaliada através da técnica de intrusão de mercúrio, sendo que os traços com substituição de 5 e 15 % apresentaram menor porosidade que o traço de referência.

Do mesmo modo, Rana, Kalla e Csetenyi (2015) determinaram através da porosimetria por intrusão de mercúrio que teores de substituição do cimento pelo resíduo do mármore superior a 10% acarretam um aumento dos poros. Em contrapartida, teores de substituição de até 10% resultaram em poros de menor dimensão e interconectados.

Elmoaty (2013) concluiu em seu estudo que o uso de 7,5% de resíduo do mármore em substituição ao aglomerante não afeta significativamente a porosidade do concreto. Teores de substituição superiores a 7,5% provocam um aumento na porosidade do concreto.

2.2.2 Resistência à compressão do concreto

A resistência do concreto é definida pela resistência da pasta, pela resistência da ligação pasta-agregado, pelo formato e resistência dos agregados, sendo que para os concretos convencionais a resistência da pasta é o principal fator (NEVILE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Sabe-se que existe uma relação inversa entre porosidade e resistência de sólidos. Nos concretos, a porosidade depende da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento, podendo-se dizer que para um mesmo grau de hidratação do cimento a resistência depende quase que exclusivamente da relação água/cimento, ou seja, a resistência é afetada principalmente pela relação água/cimento (DYER, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville e Brooks (2013), além da relação água/cimento exercem influência sobre a resistência à compressão os seguintes fatores:

- Idade do concreto: quanto maior a idade, maior a resistência, já que o grau de hidratação do cimento será maior;
- Tipo de cimento: cimentos mais finos reagem rapidamente, desenvolvendo maiores resistências iniciais;

- Temperatura ambiente: temperaturas baixas diminuem a velocidade de desenvolvimento da resistência podendo interromper as reações, enquanto temperaturas mais altas tendem a acelerar;
- Agregados normais: exercem influência indireta, nos concretos convencionais, pela alteração da necessidade de água para se obter uma determinada consistência;
- Condições de cura: concretos bem curados possuem maior grau de hidratação do cimento.

A Tabela 3 resume alguns trabalhos que avaliaram o efeito do teor de substituição de cimento por RBRO na resistência à compressão simples do concreto.

Tabela 3 - Influência da substituição do aglomerante pelo RBRO na resistência à compressão

Autores	Tipo de Rocha	Teor ótimo (%)
Ghorbani et al. (2018)	Marmore e Granito	10
Ashish (2018)	Marmore e Granito	10
Khodabakhshian et al.(2018)	Marmore e Granito	5
Sing et al. (2017)	Mármore	15
Rodrigues (2015)	Mármore	10
Rana, Kalla e Csetenyi (2015)	Mámore e Granito	10
Abd Elmoaty (2013)	Granito	5
Bacarji et al. (2013)	Mámore e Granito	5
Ergun (2011)	Granito	7,5

Fonte: autor

Ashish (2018) avaliou a influência da substituição parcial do cimento pelo resíduo do mármore na resistência à compressão, em teores de 0%, 10% e 15%, concluindo que houve um aumento de resistência mecânica para o teor de substituição de 10%, comparado com o concreto referência. O autor relatou que esse efeito se deu em função do efeito fíler, que aumentou a resistência da zona de transição em volta dos agregados.

Rodrigues (2015) utilizou 0%, 5%, 10% e 15% do resíduo do beneficiamento do mármore em substituição ao cimento para examinar o comportamento mecânico do concreto. Melhorias na resistência do concreto foram observados em teores de substituição de até 10%. Segundo o autor, as melhorias no comportamento mecânico foram atribuídas ao efeito fíler, que densificou a zona de transição.

Bacarji et al. (2013) utilizaram 0%, 5%, 10% e 20% do resíduo do beneficiamento do granito e do mármore em substituição ao cimento Portland.

Foram observados efeitos positivos nas características mecânicas do concreto, incluindo resistência à abrasão, módulo de elasticidade, resistência à compressão e reologia do concreto em teores de substituição de até 5%.

Elmoaty (2013) verificou a influência da substituição do cimento pelo resíduo do beneficiamento do granito nas propriedades mecânicas, sendo o cimento substituído pelo resíduo em teores de 5%, 7,5%, 10% e 15%, com relação água/cimento de 0,45. Os resultados mostraram um aumento na resistência à compressão para a substituição de até 5%. O autor atribuiu o aumento da resistência para o teor de 5% ao efeito fíler. No entanto, segundo o autor, a redução da resistência para teores de substituição maiores de 5% foi devido à falta de produtos de hidratação do cimento.

2.3 Influência do RBRO na penetração de íons cloreto

Os cloretos são elementos abundantes na natureza. Podem ser encontrados junto aos agregados extraídos de regiões que no passado foram marinhas, água, aditivos aceleradores de pega que contenham CaCl_2 , atmosferas marinhas, água do mar, regiões contaminadas por poluentes industriais ou limpeza de pisos e fachadas com ácido muriático (SILVA, 2006).

Já os íons cloreto presentes no concreto podem ser oriundos de diversas fontes. Os íons podem ser incorporados no concreto já no seu estado fresco pelo emprego de aditivos aceleradores de pega a base de cloretos de cálcio ou pela contaminação da água de amassamento e agregados empregados. Já no estado endurecido a contaminação acontece pelo ingresso dos íons cloreto presentes no meio externo, principalmente em ambientes marinhos, industriais ou pelo uso de sais de degelo no caso dos países com neve (MEDEIROS et al., 2010)

No estudo de Negrodo (2018), foi realizada a substituição parcial do cimento pelo RBRO nos teores de 0%, 5%, 15 e 25% e investigou-se o coeficiente de difusão dos concretos, sendo que os teores de 5% e 25% não apresentaram diferença estatisticamente significativa em relação ao concreto de referência.

Do mesmo modo, Dietrich, Teles e Vieira (2017) estudaram a penetração de cloretos em concretos com adição de RBRO. As relações a/c utilizadas foram 0,45, 0,55 e 0,65 e as porcentagens de adições de RBRO foram 5%, 10% e 15% em massa ao cimento. Os corpos de prova foram submetidos a ciclos de imersão e

secagem em solução de 5% de NaCl. A autora verificou que o teor de 5% de adição de RBRO foi o mais vantajoso em relação à penetração de íons cloreto. Esse resultado ocorreu devido ao efeito de empacotamento de partículas e descontinuidade entre poros em virtude dos finos de RBRO.

Rana, Kalla e Csetenyi (2015) constataram uma menor concentração dos íons cloreto no interior do concreto contendo 5 a 10% de resíduo do mármore em substituição ao cimento, em relação ao concreto de referência. Segundo os autores, essa redução da penetração dos íons cloro foi ocasionada pelo efeito filer, que refinou a estrutura dos poros.

Ramos et al. (2013) concluíram que a substituição do cimento pelo RBRO em até 20% aumentou a resistência à penetração dos íons cloreto devido à densificação da microestrutura. O autor também atribuiu a redução no ingresso de cloretos nas misturas em decorrência da formação de cloroaluminatos, provenientes da combinação da alumina (Al_2O_3), presente no resíduo, com os íons cloreto, formando o sal de Friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$).

2.4 Durabilidade do concreto

Um projeto bem elaborado deve proporcionar segurança às estruturas e assegurar-lhes desempenho eficiente em serviço, além de aparência aceitável. Dessa maneira, devem ser observadas as exigências relacionadas à capacidade projetada, bem como às condições em uso habitual e, em especial, as especificações referentes à durabilidade.

Nesse sentido, os erros de projeto, em conjunto com a utilização de materiais inapropriados, representam uma parcela relevante das ocorrências relacionadas ao aparecimento de manifestações patológicas. Outro aspecto importante para a durabilidade das estruturas é a avaliação do grau de agressividade do meio ambiente. A fim de que sejam elaboradas especificações adequadas, torna-se essencial entender o comportamento dos materiais que compõem a estrutura quando submetida a diversas condições de exposição (ADAMATTI et al., 2016).

A durabilidade pode ser entendida como a capacidade do material em suportar as solicitações para as quais foi concebido ao longo de um determinado período, em decorrência de um ou mais processos patológicos instalados de natureza físico-mecânica, química, biológica ou eletroquímica. Os mecanismos de

degradação, deterioração ou envelhecimento comprometem o desempenho do material, componente ou sistema, reduzindo ou anulando sua aptidão ao uso nas condições de serviço (RIBEIRO; CASCUDO, 2018).

O comitê 201 do ACI (1991) define a durabilidade do concreto de cimento Portland como a capacidade de resistir a ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, assim o concreto durável manterá sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente. Já a NBR 6118 (ABNT, 2014) define a durabilidade de estruturas de concreto armado como sendo a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Sendo assim, um concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhes foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperadas durante um período de vida previsto. Como qualquer tipo de material, a elevada durabilidade do concreto não implica uma vida útil indefinida, nem deve suportar qualquer tipo de ação, pois, com as interações com o meio ambiente, a microestrutura e as propriedades dos materiais mudam ao longo do tempo (RIBEIRO; CASCUDO, 2018).

Andrade (2005), do mesmo modo, destaca de forma bastante precisa que um concreto durável não confere, necessariamente, durabilidade à estrutura. As características e propriedades do concreto, apesar de importantes, somente compõem os parâmetros e aspectos globais que influenciam a durabilidade, dentre os quais podem se destacar, ainda, detalhes arquitetônicos e construtivos, deformabilidade da estrutura, cobrimento da armadura, entre outros.

Para Santos (2006), é conhecido que a proteção química e a barreira física que o concreto confere ao aço não garantem que as estruturas sejam eternamente duráveis. Até mesmo estruturas de concreto com armadura adequadamente protegida por uma camada suficientemente espessa de concreto e com baixa permeabilidade, com o passar do tempo, estarão sujeitas ao processo de deterioração provocado pela ação de agentes agressivos presentes no ambiente onde a estrutura está inserida.

A falta de durabilidade de uma estrutura de concreto armado pode ser causada por agentes externos advindos do meio ou por agentes internos ao concreto. As causas podem ser classificadas como físicas, mecânicas e químicas.

As causas físicas são provindas do congelamento e das diferenças entre propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento, enquanto as causas mecânicas estão associadas principalmente a abrasão. As causas químicas podem ser provenientes do ataque de sulfatos, ácidos, carbonatação e íons cloreto, que induzem a corrosão eletroquímica da armadura (NEVILLE, 2013).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob condições ambientais previstas e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Igualmente, a durabilidade do concreto é influenciada negativamente pelo desgaste da superfície, fissuras causadas pela pressão da cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas, tais como congelamento ou fogo. Efeitos químicos deletérios também podem afetar a durabilidade como lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas, e reações expansivas envolvendo ataque por sulfatos, reações álcali-agregados e corrosão das armaduras no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Helene (1993), a durabilidade de estruturas de concreto está diretamente relacionada a alguns fatores, como o traço do concreto (relação água/cimento e tipo de cimento), adensamento efetivo do concreto na estrutura, cura e cobrimento das armaduras, pois estes são os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, permeabilidade, migração de íons e difusividade de água ou de gases, bem como a maioria das propriedades mecânicas. Contudo, além disso, torna-se imprescindível levar em consideração as características do meio ambiente aonde está inserida a estrutura.

Já Jinping e Xuesong (2010) acreditam que a durabilidade do concreto deve ser considerada tendo em vista quatro fatores principais que são: ambiente, que pode ser classificado como comum, marinho e industrial; materiais; componentes e estrutura. Para estes autores a durabilidade da estrutura de concreto é definida em função da sua resistência em função do uso sem custos adicionais para manter a sua segurança, funções e aparência do concreto durante a vida útil previamente estipulada.

Deste modo, as estruturas de concreto armado quando inseridas no ambiente ao qual estão expostas passam a sofrer alterações que podem com o passar do

tempo comprometer sua estabilidade e funcionalidade. Neste sentido é importante associar a qualidade e o desempenho requeridos das estruturas frente as ações ambientais as quais estão sujeitas e adotar medidas que garantam o seu bom funcionamento.

2.5 Penetração de íons cloreto em concretos

Segundo GjØrv (2015), vários processos de deterioração podem afetar a durabilidade e o desempenho de estruturas de concreto. Alguns processos de deterioração do concreto, como as relações álcali-agregados, gelo e degelo, assim como ataques químicos representam um grande potencial de ameaça às estruturas de concreto. Porém, a mais grave ameaça à durabilidade e ao desempenho de muitas estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras induzidas por íons cloreto.

Os fatores que Influenciam na penetração de íons cloreto em concretos podem ser inerentes do próprio material ou estarem relacionados com o ambiente no qual o concreto está inserido, conforme pode ser visualizado no Quadro 1.

Quadro 1– Fatores que Influenciam na penetração de íons cloreto no concreto

Fatores inerentes ao concreto	Fatores ambientais
Composição química do cimento	Tipo de ambiente
Relação água/cimento	Umidade relativa
Tempo de cura	Temperatura
Presença de fissuras	Presença de cloretos no ar atmosférico
Temperatura de cura	Precipitação
Adições no concreto	Direção e velocidade dos ventos

Fonte: Dyer (2015), Bertolini (2010) e Ribeiro (2014).

Figueiredo et al. (2014) relatam que o ingresso de íons cloreto nos concretos ocorre através de quatro mecanismos de transporte: absorção, permeabilidade, difusão e migração iônica, podendo acontecer combinação entre estes. Os autores relatam que o mecanismo de migração iônica é causado por campos elétricos externos aplicados nos ensaios acelerados de laboratório. Sendo assim, a migração iônica de íons cloreto tem menor chance de ocorrer em situações reais. Os mecanismos de transporte estão ilustrados na Figura 2.

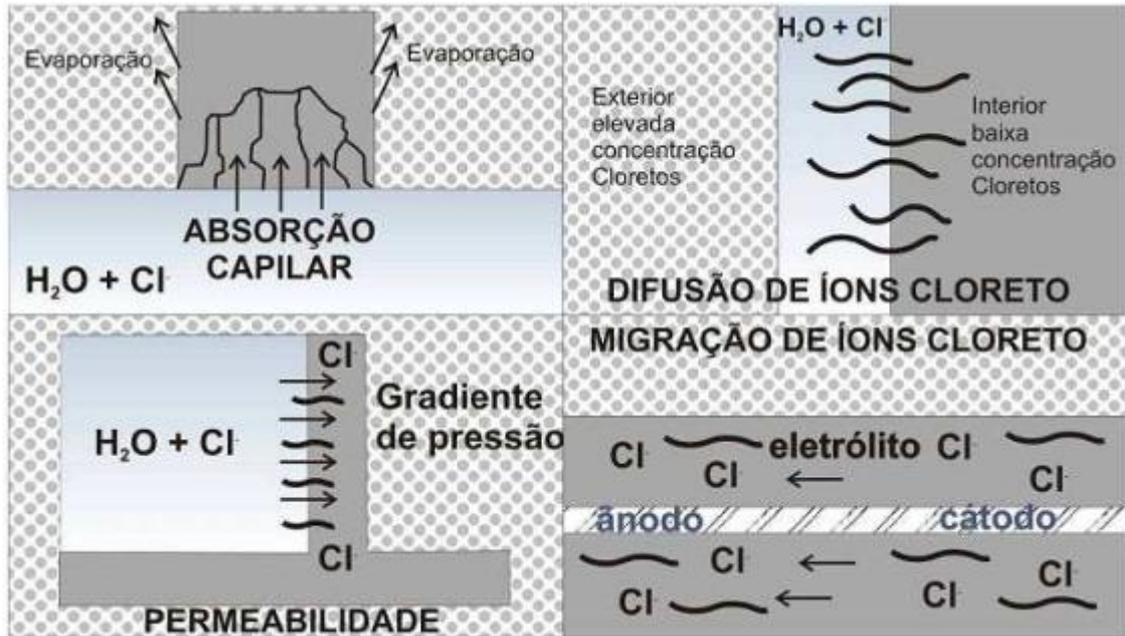


Figura 2 – Formas de penetração dos íons cloreto no concreto.
Fonte: Helene (1993)

Segundo Ribeiro e Cascudo (2018), grande parte dos fatores que influenciam na durabilidade do concreto está associada a capacidade de transporte de massa em sua rede de poros e/ou fissuras. Esse fator determinará o grau de dificuldade encontrado pelos agentes agressivos ao tentar penetrar o concreto.

Cascudo (1997) considera que a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é o que influencia decisivamente o transporte de substâncias para o interior do concreto. A interconexão dos poros do concreto determina a porosidade aberta, que possibilita o transporte das substâncias dentro do concreto. Já a distribuição do tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte.

Os mecanismos de transporte que levam ao movimento de cloretos no concreto estão descritos na Quadro 2.

Quadro 2- Mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto

Mecanismo de transporte	Definição
Absorção	A absorção é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. Uma outra definição para esse mecanismo é o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Esse fenômeno está relacionado com a estrutura porosa da amostra, mas não com a sua permeabilidade. A absorção pode ser significativa em concreto sujeito a ciclos de congelamento e descongelamento e umedecimento e secagem. Os cloretos precisam estar dissolvidos em água para que haja a penetração no concreto (DYER, 2015; BERTOLINI, 2010; RIBEIRO, 2014).
Difusão iônica em meio aquoso	É o processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração, seja entre o meio externo e o interior do concreto, seja dentro do próprio (DYER, 2015; BERTOLINI, 2010; RIBEIRO, 2014).
Permeabilidade do concreto	Ocorre quando um fluido, gás ou líquido penetram através dos poros do material sob um diferencial de pressão, depende do tamanho dos poros do material e da interconexão dos mesmos (DYER, 2015; BERTOLINI, 2010; RIBEIRO, 2014).
Migração iônica	Considerando que os íons cloreto possuem carga negativa, quando existe uma diferença de potencial produzida pelo campo elétrico entre dois pontos do material ocorre a migração iônica. Para ocorrer a migração iônica deve existir a presença de carga elétrica no eletrólito ou existir a ação de campos elétricos externos (DYER, 2015; BERTOLINI, 2010; RIBEIRO, 2014).

Fonte: autor

Ossorio e Lorenzo (2014) consideram que os mecanismos de entrada de cloretos no concreto, que comumente exercem maior influência na penetração de íons, são a absorção capilar e a difusão. As sucções que aparecem na superfície do concreto insaturado propiciam a entrada de água da superfície do elemento de concreto e conseqüentemente o cloreto que está contido. Esse fenômeno é conhecido como absorção capilar e geralmente ocorre em aproximadamente 1 cm de profundidade, sendo interrompido pela interrupção da rede de poros. A difusão é o transporte de íons estimulados pela diferença de concentração da substância em questão. O efeito combinado desses dois fenômenos causa a entrada de íons cloreto na massa de concreto. Os perfis de cloretos obtidos em muitos elementos expostos ao aerossol marinho de maneira natural refletem que o mecanismo inicial de penetração é a absorção e, posteriormente, o mecanismo de difusão ganha força.

De acordo com Torres (2006), os íons cloreto com maior potencial de agressividade são os dissolvidos em água, pois na sua forma de cristais apresentam dimensão superior aos poros do concreto, a menos que, por ser higroscópico, absorva umidade ambiente, em solução, e possa através do mecanismo de difusão ser transportado para o interior do concreto. Os íons cloreto podem ser encontrados no concreto na forma livre presente na solução dos poros, combinados

quimicamente e na forma de cloretos livres na solução dos poros (TUUTI, 1982; ANDRADE, 1993).

Em relação à capacidade de combinação dos íons cloreto, Meira et al. (2014) afirmam que a quantidade de cloretos livres depende da capacidade da matriz cimentícia de imobilizar os íons cloreto. O teor de cloretos quimicamente ligados depende da quantidade de C_3A e C_4AF presentes na composição do cimento. As fases alumino-ferríticas se combinam com os cloretos e formam o cloroaluminato, que ficam fixados à fase sólida do cimento hidratado, embora esses íons também possam ser imobilizados ao entrar em contato com o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Segundo Andrade (1992), apenas os cloretos que ficam dissolvidos no eletrólito dos poros apresentam potencial para desencadear a corrosão. Porém, as normas referem-se sempre ao limite de cloretos totais, pois os cloretos quimicamente combinados podem retornar à dissolução pelo efeito de processos como a carbonatação.

Para ocorrer o início do processo de corrosão de armaduras no concreto deve haver uma concentração mínima de íons cloreto. Existem diversos estudos com relação ao limite de íons cloreto no concreto, porém ainda não existe uma concordância em relação aos valores limites para o início do processo de corrosão.

Os teores limites de cloretos no concreto são apresentados e determinados em porcentagens de cloretos totais em relação à massa de cimento ou a solução dos poros. A norma brasileira NBR 12655 (ABNT, 2015) estabelece os valores de íons cloreto no concreto em relação a porcentagem de massa de cimento, sendo que no caso de concreto armado em zona urbana o valor limite é de 0,30.

2.5.1 Fatores que Influenciam a Penetração de íons cloreto

Vários fatores influenciam a penetração dos íons cloreto no concreto. Os principais fatores são: relação água/aglomerante, adições minerais, grau de saturação, temperatura, tempo de cura, composição e tipo de cimento, tipo de agregado, umidade relativa, entre outros.

Titi e Tabatabai (2018) investigaram o efeito do tipo de agregado graúdo usado no concreto sobre a penetração de íons cloreto. Concretos confeccionados com agregados graúdos de diferentes formações geológicas (sedimentares, ígneas

e metamórficas) foram analisados através do ensaio de penetração acelerada de cloretos (segundo a ASTM C1202/05). A análise dos resultados dos ensaios demonstrou que o tipo de agregado tem influência significativa na penetração de íons cloreto, em idades iniciais do concreto. Os concretos confeccionados com agregados de origem sedimentares apresentaram maior penetração de íons cloreto quando comparado com concretos produzidos com rochas ígneas e metamórficas.

Isteita e Xi (2017) avaliaram a influência da temperatura do concreto na penetração de íons cloreto. Os resultados dos ensaios mostraram que a variação de temperatura do concreto aumenta significativamente o processo de penetração de cloreto quando o gradiente de temperatura e o gradiente de cloretos estão na mesma direção.

Agra (2017) comparou, através do ensaio de penetração acelerada de cloretos (segundo a ASTM C1202/05), o desempenho frente à penetração em dois concretos, um produzido com CP III e outro com CP IV. O concreto produzido com CP III apresentou carga passante de 1248 Coulombs (C), sendo que o concreto produzido com CP IV apresentou carga passante de 4643 C. Esses valores demonstram que os cimentos com escória de alto-forno são mais eficientes para resistir o ingresso de íons cloreto, pois são menos porosos e mais duráveis, devido à maior colmatação dos poros. As escórias refinam melhor os poros, propiciando ao concreto redução da permeabilidade e mobilidade dos íons dentro de sua microestrutura.

De acordo com Medeiros Junior et al. (2015), as mudanças climáticas previstas apresentaram um impacto enorme sobre a vida útil das estruturas de concreto. De acordo com os autores, as mudanças na temperatura e na umidade relativa prevista para o ano de 2100 poderão ocasionar uma redução na vida útil das estruturas de concreto de 10 anos.

Nevile e Brooks (2013) destacam que a temperatura exerce grande influência na durabilidade das estruturas de concreto, pois na grande maioria dos processos de natureza química, a elevação da temperatura aumenta a cinética das reações. Esta poderia ser a razão pela qual estruturas que estão inseridas em regiões quentes se deterioram mais rapidamente do que as que estão localizadas em regiões de clima frio ou temperado.

A composição do cimento tem efeito significativo no desempenho de durabilidade do concreto contra a corrosão das armaduras, o aluminato tricálcico

(C₃A) que possui capacidade de fixação de cloretos, se liga aos íons cloreto para formar hidrato de cloroaluminato de cálcio, desse modo, fazendo com que se as armaduras se tornem menos propícias a corrosão (DIAB et al., 2011). Neste sentido, cimentos com elevados teores de C₃A são benéficos para utilização em ambientes com presença de cloretos, devido a maior proteção do concreto proporcionada as armaduras.

Yildirim, Tolga e Ozkan (2011) estudaram o efeito de diferentes tipos de cimento na resistência à penetração de íons cloreto. Foram estudados concretos produzidos com 4 tipos de cimentos: cimento Portland composto com escória de alto forno, cimento Portland resistente a sulfatos, cimento Portland com adição de cinzas volantes e um cimento Portland comum. Realizou-se o ensaio de penetração acelerada de cloretos (segundo a ASTM C1202/05), sendo que os resultados demonstraram claramente que os concretos produzidos com cimentos de escória de alto forno apresentam maior resistência à penetração de íons cloreto, enquanto os concretos produzidos com cimento Portland puro e com o cimento resistente a sulfato apresentaram menor resistência à penetração de íons cloreto. O uso de cimento com cinzas volantes reduziu a penetração de íons cloreto de concreto. No entanto, o desempenho dos concretos produzidos com cinzas volantes não foi tão eficiente quanto o concreto produzido com escória de alto forno.

Thomas, Bremmer e Scott (2011) relatam que baixar o fator *a/c* de um concreto de 0,5 para 0,4 reduz a difusão de cloretos em um fator de dois a três, ao passo que a incorporação de adições minerais no concreto (escória de alto forno, sílica ativa e cinza volante) reduz a difusão de cloretos em um fator de até 20 vezes.

No estudo de Crauss (2011), foi avaliada a influência do tipo de cimento, a relação água/cimento e do tempo de cura na penetração de cloretos em concreto. Os resultados apresentados pela autora corroboram estudos anteriores que demonstram que quanto menor o *a/c*, menor a penetração de íons cloreto. Em relação ao tempo de cura, a penetração de íons cloreto diminui com o aumento do tempo de cura. Os concretos produzidos com CP IV obtiveram penetração de cloretos menor se comprado com o CP-II-F e o CP V.

O efeito da relação água/aglomerante com relação ao coeficiente de difusão do cloreto é significativo. Como a redução da relação água/aglomerante diminui a quantidade de água nos poros capilares do concreto, os produtos de hidratação preenchem os poros capilares, melhorando a durabilidade e a permeabilidade do

concreto (FARAHANI; TAGHADDOS; SHEKARCHI, 2015).

De acordo com Mazer (2009), em estruturas de concretos expostas a temperaturas elevadas há um aumento no valor do coeficiente de difusão de cloretos, isso ocorre porque o aumento da temperatura aumenta a mobilidade iônica nos poros do concreto.

Segundo Rizzon (2006), a temperatura influencia na penetração de cloretos da seguinte forma: durante a etapa de cura, o aumento da temperatura acelera a formação do silicato de cálcio hidratado que gera uma estrutura mais compacta. Após a etapa de hidratação, o aumento da temperatura favorece a penetração de íons cloreto no concreto através de permeabilidade, sucção capilar ou difusão, em decorrência da redução da viscosidade dos fluidos com o aumento da temperatura.

O objetivo do trabalho de Arskog e Gjorv (2007) foi avaliar o comportamento do coeficiente de difusão de cloretos com a variação do tipo de cimento, foi utilizado 4 cimentos diferentes e uma relação água/cimento de 0,4. O primeiro cimento utilizado corresponde ao cimento brasileiro CP II E 40 (30% de escoria), o segundo corresponde ao cimento CP III (70% de escoria), o terceiro cimento utilizado corresponde ao CP V e também foi utilizado um cimento com 18 % de cinza volantes (similar ao CP II Z). Os resultados apresentaram uma menor difusão de cloretos nos cimentos CP II E 40 e CP III comparado ao CP II Z (cerca de 30 % menor), em comparação ao cimento CP V a difusão de cloretos foi substancialmente menor (cerca de 63%).

A umidade relativa ambiental está relacionada diretamente com a quantidade de água no interior dos poros do concreto. Este fato se deve à permanente busca de equilíbrio hidrotérmico que acontece no concreto, perdendo umidade para o meio ou dele retirado de acordo com o gradiente existente (SACILOTO, 2005).

A pesquisa realizada por Guimarães (2000) demonstrou a influência do grau de saturação na difusão de íons cloreto. O autor afirma que o grau de saturação é mais importante que a umidade na intensidade de penetração de íons cloreto. Na pesquisa ficou constatado que com a redução do grau de saturação de 100% para 85 %, a difusão dos íons cloreto diminui bruscamente, resultando na rede de poros apenas água adsorvida. Sendo assim, os íons cloreto necessitam percorrer distâncias maiores, pois precisam contornar o poro para transpô-lo.

2.6 Adições minerais para o concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais se classificam de acordo com suas propriedades físico-químicas em material pozolânico, material cimentante e fíler.

Para Neville e Brooks (2013), os materiais pozolânicos por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando se apresentam em forma de pequenas partículas e na presença da umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio presente na composição do cimento formando silicato de cálcio hidratado.

Os materiais cimentantes não necessitam do hidróxido de cálcio presente no cimento para formar silicatos de cálcio hidratado. Sua auto hidratação é lenta e a quantidade de silicato de cálcio hidratado é insatisfatório para aplicação do material em fins estruturais, quando usado como adição ou substituição ao cimento Portland, e na presença de hidróxido de cálcio ou gipsita antecipa sua hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014; KLEIN, 2008).

Já o fíler um é material quimicamente inerte, finamente moído e com finura próxima a do cimento, que, devido as suas propriedades físicas, exerce um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto, como permeabilidade, durabilidade e até mesmo resistência mecânica. Isso se ocorre devido ao refinamento da estrutura de poros ou pela formação de ponto de nucleação para produtos de hidratação. Os pontos de nucleação precipitam os produtos da hidratação, estimulando essas reações, formando cristais de portlandita menores e densificando a zona de transição entre a pasta e o agregado (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de adições minerais ao cimento visa aproveitar o efeito positivo das mesmas, principalmente sua influência na redução da permeabilidade do concreto devido ao refinamento dos poros, especificamente no caso de corrosão induzida por cloretos, e a capacidade de combinação dos cloretos com seus produtos de hidratação. Constata-se que a influência mais marcante das adições na durabilidade consiste no significativo refinamento da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Pinto (2016) analisou o comportamento da penetração de cloretos com a variação do teor de adição da sílica ativa de 0 a 15%, e mantendo fixa a relação

água/aglomerante. Os resultados apresentaram uma menor penetração de íons cloreto em todos os teores utilizados, sendo que o teor de 15% de sílica ativa ocasionou um melhor desempenho.

Dyer (2014) relata que a adição de até 40% de cinza volante em relação à massa de cimento promove a fixação dos íons cloreto livres e torna a estrutura porosa mais densa, além disso, promove uma redução no coeficiente de difusão. Entretanto, adições de cinza volante superiores a 40% diminuem a capacidade de fixação de íons cloreto e aumentam a permeabilidade, ocorrendo um aumento no coeficiente de difusão

Figueiredo et al. (2014) concluíram em seu estudo que a substituição de 10% do cimento pelo metacaulim na produção de concretos tem um efeito positivo, pois diminui a difusão de íons cloreto, quer pelo efeito de refinamento da estrutura porosa, quer pela capacidade de promover o aumento da formação de cloro-aluminato de cálcio hidratado, que tem capacidade de fixar os íons cloreto, diminuindo a quantidade de cloretos livres.

A quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) presente nas adições minerais utilizadas em concretos é determinante na velocidade e intensidade da corrosão, uma vez que os íons cloreto reagem com o C_3A , formando o sal de Friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$). Esse tipo de sal é insolúvel e diminui o fluxo de penetração de cloretos, devido à redução da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. Portanto, quanto mais alto o teor de C_3A presente na adição mineral, maior a resistência à corrosão. Em menor proporção, o C_4AF também fixa os cloretos livres, formando os cloroferratos de cálcio hidratado ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) (SILVA, 2006).

A utilização de sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, atuam fisicamente, densificando a matriz e a zona de transição do concreto, assim reduzindo significativamente a penetração de cloretos e aumentando a resistência mecânica do concreto. (DAL MOLIN, 1995).

2.7 Ensaios para avaliar os concretos frente à ação de íons cloreto

Os métodos empregados para avaliar o desempenho dos concretos frente a ação de íons cloretos se dividem em ensaio natural e acelerado. Entre os ensaios acelerados, os mais difundidos no meio científico são: AASHTO T259, EPCI, ASTM

C1202 e NT Build 492 (BERTOLINI, 2010).

Na grande maioria das vezes, para se obter resultados em prazos aceitáveis, são realizados testes acelerados, que determinam a resposta do material ensaiado, quando submetido a intensidades mais agressivas que a real intensidade em que o material será exposto. Porém, quase sempre esses ensaios não representam as condições existentes em situações reais. Esses resultados obtidos nos ensaios acelerados têm pouca utilidade em termos absolutos, não devendo ser utilizados diretamente para estimar a vida útil das estruturas. Entretanto, os ensaios acelerados podem ser empregados para comparar soluções alternativas de projeto, supondo que o resultado de um teste acelerado corresponda a um comportamento próximo da situação real, podendo ser úteis em termos relativos. A análise dos resultados experimentais obtidos com ensaios acelerados pode permitir especificar um critério quantitativo de comparação entre materiais diferentes, permitindo a escolha de um material mais adequado para cada condição ambiental (BERTOLINI 2010; DASAR et al., 2017; MARIC et al., 2017).

De acordo com Meira et al. (2014), relacionar ensaio natural de longa duração com ensaio de laboratório é de grande valia. Através da relação entre ensaio natural e acelerado é possível converter resultados obtidos em ensaio de laboratório para estruturas reais. Apesar de se limitar aos materiais e ensaio empregados, representa um grande avanço no estudo da penetração íons de cloretos, quando se necessita realizar a aplicação de valores mais próximos da realidade.

2.7.1 Ensaio natural

O mais adequado método para determinar a profundidade da penetração de íons cloreto e estimar a vida útil de uma estrutura é através da exposição de corpos de prova em ambiente natural. Nesse cenário, a exposição de corpos-de-prova aos agentes atmosféricos é a forma de expor um mesmo material em lugares diferentes, podendo assim correlacionar intensidades de agentes de degradação que interferem no desempenho real da estrutura (CHALEE; JATURAPITAKKUL; CHINDAPRASIRT, 2009; VALIPOUR et al., 2013).

Os principais fatores de exposição à penetração de íons cloreto são a temperatura, radiação solar, precipitação, umidade relativa do ar, presença de íons cloreto no ar atmosférico, direção e velocidade dos ventos. Porém, o que pode

complicar a compreensão da penetração de íons cloreto em corpos de prova expostos em ambiente natural é que os fatores que desencadeiam a penetração são sinérgicos, seus efeitos combinados podem não representar os resultados obtidos pela exposição a algum deles individualmente. Entretanto, o ensaio natural é a forma mais fidedigna de compreender a resistência frente à penetração de íons cloreto de concretos quando exposto a um determinado ambiente, apesar de necessitar um período de exposição maior que nos ensaios acelerados (CHALEE; JATURAPITAKKUL; CHINDAPRASIRT 2009; MARIC et al., 2017).

No estudo realizado por Real e Bogas (2018), foram moldadas lajes de concreto (40x30x10 cm), que foram expostas em ambiente marinho por 3 anos. Os autores avaliaram o coeficiente de difusão do concreto com relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 e porcentagens de cinza volante de 0%, 15% e 30% em substituição ao cimento. O concreto com a maior relação a/c (0,55) apresentou um maior pico de concentração de cloretos e uma maior profundidade de penetração associada a este pico. O melhor desempenho frente a penetração dos íons cloreto foi obtido no concreto com 30% de substituição do cimento pela cinza volante.

Ferreira (2017) determinou a profundidade da penetração de cloretos em corpos de prova submetidos a exposição natural por 16 meses em diferentes bairros na cidade de Pelotas/RS, sendo que os autores concluíram que ao final do tempo de exposição a penetração de cloretos foi maior no bairro Porto (10 mm) e Fragata (10 mm).

Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee (2012), do mesmo modo, avaliaram a profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova de concreto produzidos com cimento Portland, com relação a/c de 0,45 e 0,65, submetidos a exposição natural por dez anos em região de variação de maré no Golfo da Tailândia. Com dois anos de exposição a penetração de íons cloreto para os concretos com fator $a/c = 0,65$ foi de 35 mm, já o fator $a/c = 0,45$ apresentou profundidade de penetração de 25 mm. Com dez anos de exposição a penetração de cloretos para o fator $a/c = 0,45$ foi de 50 mm e o fator $a/c = 0,65$ apresentou profundidade de penetração de 90 mm.

Em outro estudo, de Chalee et al. (2007), foi avaliado a penetração de cloretos em concretos produzidos com cimento Portland comum, e exposto em ambiente natural por quatro anos no Golfo da Tailândia. Foram utilizadas as relações a/c de 0,65, 0,55 e 0,45, sendo encontrada uma profundidade de penetração de cloretos de 60 mm, 48 mm e 38 mm, respectivamente.

2.7.2 Ensaios acelerados

A difusividade dos cloretos está intrinsecamente relacionada com a durabilidade do concreto. A mesma é normalmente determinada através do uso de células de difusão ou pela imersão em soluções de NaCl. Entretanto, estas técnicas necessitam de muito tempo para serem concluídas. Dentre os ensaios que fazem uso desta técnica estão:

- AASHTO T259: *Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test)*: Após certo tempo de cura e pré-condicionamento, as amostras com pelo menos 75 mm de espessura e superfície de 300 mm são seladas nas faces laterais, sendo em seguida expostas por 90 dias a uma lamina de 13 mm de uma solução de 3% de NaCl. Decorridos os 90 dias, se mede a concentração de cloretos em cada fatia de 1,27 cm;
- Soaking Test (EPCI – Ensaio de penetração de cloretos por imersão): é um ensaio que se baseia na AASHTO T259, relatado por Wee, Suryavanshi e Tin (2000). As amostras são submetidas a determinados tempos de cura, e após, são imersas em solução de 3,5% de NaCl. Nos prazos determinados, os corpos-de-prova são retirados do tanque, rompidos por compressão diametral e aspergidos com uma solução de AgNO₃ (nitrato de prata), sendo determinada a profundidade de penetração dos íons cloreto. Como a penetração de cloretos não é uniforme, a NT BUILD 492 (2000) determina verificar sete medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média entre todas elas (Figura 3). No caso de não ser possível medir pela presença de agregados, deve-se alterar o ponto de medição ou ignorar esta profundidade desde que tenha outros cinco pontos válidos.

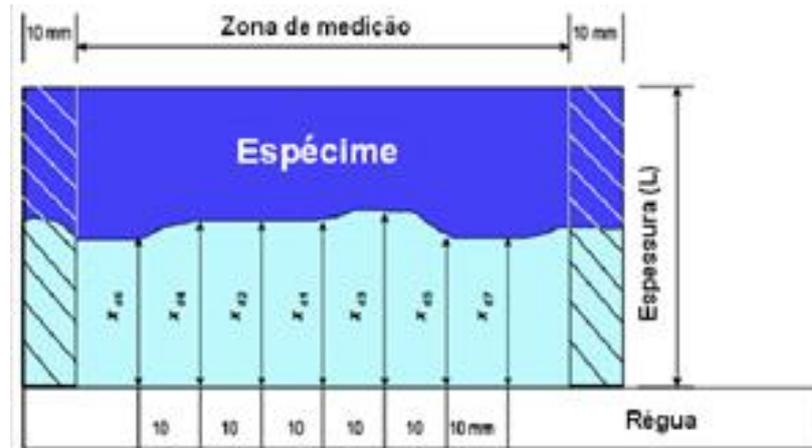


Figura 3- Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos
 Fonte: Adaptado de NT Build 492-NORDTEST METHOD (2000)

- ASTM C1202: *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (Rapid Chloride Permeability Test - RCPT)*: o ensaio tem como princípio a aplicação de uma diferença de potencial entre duas células: uma célula contendo uma solução de NaCl a uma concentração de 3,0% e outra com hidróxido de sódio a uma concentração de 0,3 N de NaOH, criando assim uma região anódica e outra catódica, sendo aplicada uma diferença de potencial de 60 Volts durante um período 6 horas, realizando-se o monitoramento da carga passante em intervalos de 30 minutos. Finalizando, é calculado o total de carga passante.
- Método NT Build 492: *O Nordtest Method – Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments* (NT Build 492) tem a finalidade de determinar o coeficiente de migração de cloretos no estado de migração não estacionário. O coeficiente de migração de cloretos determinado no ensaio é um indicativo da resistência do concreto testado frente à penetração de íons cloreto. O ensaio consiste na aplicação de uma tensão externa, axialmente, através da amostra, fazendo os íons cloreto migrarem de fora para dentro do concreto. Depois de certo tempo de ensaio, a mostra é rompida por compressão diametral e é determinada a profundidade de penetração de cloretos, através da aspersão de solução de nitrato de prata, da mesma forma que no Soaking Test. A partir da profundidade de penetração e de outras informações obtidas no ensaio, é possível calcular o coeficiente de migração de cloretos.
- Ciclos de imersão e secagem: É recomendada a realização de oito ciclos, onde cada ciclo é realizado em nove dias, composto de um semiciclo de

secagem e um semiciclo de imersão parcial. O ensaio inicia com a secagem dos corpos-de-prova, realizada em estufa com controle de temperatura ajustada em $50 \pm 10^{\circ}\text{C}$, durante seis dias, para a retirada da umidade. Na etapa de imersão as amostras de concreto são colocadas em um recipiente com água e 3,5% em volume de cloreto de sódio diluído, durante 3 dias, para ocorrer a penetração dos íons cloreto. Nesta etapa os concretos são parcialmente submersos até a 1/3 da altura do corpo-de-prova, para promover a entrada do oxigênio e do eletrólito, favorecendo assim a penetração do NaCl (FARAHANI; TAGHADDOS; SHEKARCHI, 2015).

2.8 Estado da arte do tema da pesquisa

Muitos estudos vêm verificando a potencialidade de utilização do RBRO na produção de concretos, sendo estas informações apresentadas na Quadro 3.

Quadro 3 - Estudos de concretos que incorporaram o resíduo de rochas ornamentais no concreto.

Autor(s)	Proposta	Diâmetro médio das partículas (μm)	Parâmetros analisados	Resultados
Ghorbani et al. (2019)	Substituição parcial do Cimento Portland tipo II, segundo ASTM C 150, pelo resíduo do beneficiamento do granito nos teores de 0%, 5%, 10% e 20%, sendo fixado o fator a/c de 0,5.	4,0	Resistência ao ataque de sulfatos.	Menor perda de massa em todos os teores de substituição, as amostras com 20% de substituição apresentaram o efeito mais positivo de todas as misturas e tiveram uma perda de massa 26,5% menor em relação ao concreto de referência.
Negredo (2018)	Substituição parcial do cimento (CP V-ARI), por RBRO, nos teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, sendo fixado um fator a/c de 0,50.	36,36	Resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, migração de cloretos no estado não estacionário e carbonatação acelerada.	Resistência à compressão estatisticamente igual ao concreto de referência em todos os teores de substituição. Redução da porosidade e refinamento dos poros no teor de 5% de substituição, em relação ao concreto de referência. Não foram obtidas variações significativas para os diferentes traços de concreto em relação à absorção de água por imersão, índice de vazios e absorção de água por capilaridade. O concreto de referência e com teor de 5% de RBRO se encontraram no mesmo patamar de qualidade no ensaio de carbonato acelerada. Aumento do coeficiente de difusão em todos os teores de substituição.
Ghorbani et al. (2018)	Substituição parcial do Cimento Portland tipo II, segundo ASTM C 150, por RBRO nos teores de 0%, 5%, 10% e 20%, sendo fixado um fator a/c de 0,50.	4,0	Resistência à compressão, absorção de água, espectroscopia de impedância eletroquímica.	Ganho de resistência em teores de substituição de até 10% do cimento pelo RBRO. Diminuição da absorção de água em todos os teores de substituição e aumento da resistência à corrosão em teores de substituição de até 10%.

Ashish (2018)	Substituição parcial do cimento tipo I, segundo ASTM C 150, por RBRO nos teores de 0%, 10% e 15%, sendo fixado um fator a/c de 0,50.	Não determinado.	Trabalhabilidade, Resistência à compressão e flexão.	Aumento de resistência à compressão em teores de até 10 %e aumento da resistência à flexão em todos os teores estudados. Diminuição da trabalhabilidade com o aumento do teor de substituição.
Khodabakhshian et al. (2018)	Substituição parcial Portland tipo II, segundo ASTM C 150, por RBRO nos teores de 5%,10% e 20%,sendo fixado um fator a/c de 0,50.	4,74	Resistência à compressão, resistividade superficial elétrica do concreto, absorção de água e resistência ao ataque de sulfates.	Ganho de resistência à compressão em teores de substituição de até 5%. Diminuição da resistividade elétrica superficial do concreto em todos os teores de substituição. Aumento da taxa de absorção em todos os teores de substituição e diminuição da perda de massa do concreto submetidos à ácido sulfúrico em todos os teores de substituição.
Sing, Srivastava e Bhunia (2017)	Substituição parcial do Cimento Portland (Grau 43), em conformidade com IS 8112, pelo resíduo do beneficiamento do mármore nos teores de 5%, 10%, 15 , 20% e 25 %,sendo fixado os fatores a/c de 0,35; 0,40 e 0,45.	9,50	Resistência à compressão, resistência à flexão, profundidade de carbonatação e resistividade superficial elétrica do concreto.	Ganho de resistência em teores de substituição de até 15 % para a relação a/c de 0,35 e 0,40. Já para o fator a/c de 0,45 os ganhos de resistência foram obtidos com teores de substituição de até 10 %. Ganho de resistência á flexão em teores de substituição de até 15% em todas as a/c estudadas.Da mesma forma no ensaio de resistividade elétrica do concreto demonstrou que substituições de até 15% demonstraram efeito benéfico. A profundidade de carbonatação foi maior em todos os teores de substituição estudados.

Dietrich (2015)	Adição do RBRO nos teores de 5%, 10% e 15% em relação a massa de cimento (CP V-ARI), sendo fixado os fatores a/c de 0,45 ;0,55 e 0,65.	7,68	Penetração de cloretos através de ciclos de imersão parcial em solução com 5% de NaCl, por 48 horas, e secagem em estufa ventilada, a 50°C, por 5 dias e medição do potencial de corrosão até a despassivação das armaduras.	Aumento do tempo de indução da corrosão de acordo com o aumento de substituição e redução da penetração de cloretos com 5% de adição.
Rodrigues, Brito e Sardinha (2015)	Substituição parcial do cimento tipo I, segundo ASTM C 150, pelo resíduo do beneficiamento do mármore nos teores de 5%, 10% e 20%, sendo fixado um fator a/c de 0,60.	27,5	Resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade, velocidade de pulso ultrassônico e resistência à abrasão.	Diminuição da trabalhabilidade em todos os teores de substituição. Redução não significativa na resistência à compressão e teores de até 10 % de substituição e diminuição da resistência à tração em todos os teores de substituição. Diminuição da velocidade do pulso ultrassônico com o aumento do teor de substituição e redução não significativa na resistência à abrasão em teores de até 10 %.
Rana, Kalla e Csetenyi (2015)	Substituição parcial do Cimento 53, segundo IS 12269, por 5% a 25 % de RBRO, sendo fixado um fator a/c de 0,38.	12,64	Resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água, migração de íons cloreto, corrosão, carbonatação acelerada e porosimetria de intrusão de mercúrio.	Redução não significativa na resistência à compressão e na flexão em teores de até 10 %. Diminuição da absorção de água em teores de substituição de até 10 %. Aumento da resistência à corrosão das barras em teores de substituição de até 10 %. Aumento da carbonatação em todos os teores de substituição e diminuição da porosidade em teores de até 10 % de substituição.

Elmoaty (2013)	Substituição parcial do cimento tipo I, segundo ASTM C 150, pelo resíduo do beneficiamento do granito nos teores de 5%, 7,5%, 10% e 15%, sendo fixado um fator a/c de 0,50.	10,0	Resistência à compressão e corrosão acelerada.	Melhoria nas propriedades mecânicas com o teor de 5,0% de substituição. Aumento da resistência à corrosão com o teor de 5,0% de substituição.
Bacarji et al. (2013)	Substituição parcial de cimento (CPII F-32), pelo RBRO nos teores de 0%, 5%, 10% e 20%, sendo fixado os fatores a/c de 0,65 e 0,50.	8,0	Resistência à compressão, absorção de água e módulo de elasticidade.	Redução não significativa na resistência à compressão para teores de substituição de até 5%. Aumento da absorção de água em todos os traços com substituição em ambas relações a/c, sendo mais expressivo o aumento da absorção na relação a/c de 0,65. Redução do módulo de elasticidade em todos os traços com substituição do cimento pelo RBRO.
Ergun (2011)	Substituição parcial do cimento CEM I 42.5R, segundo EN-197/1, pelo resíduo do beneficiamento do mármore nos teores de 5%, 7,5% e 10%, sendo fixado um fator a/c de 0,50	Não determinado	Resistência à compressão.	Ganhos de resistência nos teores de 5% e 7.5 % de substituição do cimento pelo resíduo do beneficiamento de mármore em todas as idades analisadas.

Resumindo as pesquisas já realizadas, o RBRO é um material que apresenta potencial para ser utilizado como substituto parcial do cimento em concretos. O mesmo propicia um refinamento da estrutura dos poros, contribuindo para a densificação da zona de transição e da matriz cimentícia, apresentando potencialidade para o emprego em concretos estruturais.

3 Programa experimental

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, foi organizado e desenvolvido um procedimento experimental, estabelecendo-se assim, os fatores de controle, as variáveis de análise, os materiais e métodos.

De acordo com os objetivos estabelecidos no trabalho foram definidas as variáveis, considerando três categorias:

a) Variáveis independentes (relacionadas ao objetivo da pesquisa):

- Tipo de aglomerante;
- Relação água/aglomerante;
- Teor de RBRO em substituição ao cimento;
- Local de exposição dos corpos de prova para o ensaio natural;
- Idades de avaliação da penetração de cloretos em ambiente natural;
- Idade para o ensaio de compressão axial;
- Idade para o ensaio de absorção por imersão e capilaridade;
- Idades de avaliação da penetração de íons cloreto em laboratório.

b) Variáveis intervenientes (não controladas): Nos corpos de prova expostos em ambiente natural para avaliar a penetração de cloretos foram consideradas as seguintes variáveis intervenientes:

- Temperatura ambiente;
- Umidade relativa do ar;
- Precipitação;
- Velocidade e direção dos ventos.

c) Variáveis de resposta (influenciadas pelas variáveis independentes e intervenientes):

- Profundidade de penetração de cloretos em ambiente natural;
- Profundidade de penetração de cloretos em ambiente de laboratório;
- Resistência à compressão axial;
- Absorção de água por capilaridade;

- Absorção de água por imersão.

3.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa foi dividida em cinco fases, conforme apresentado na Figura 4: (a) revisão bibliográfica, desenvolvida ao longo de todo o trabalho; (b) dosagem dos concretos; (c) escolha dos traços para substituição parcial do cimento pelo RBRO; (d) moldagem dos corpos de prova; (e) análise estatística e comparação dos resultados.

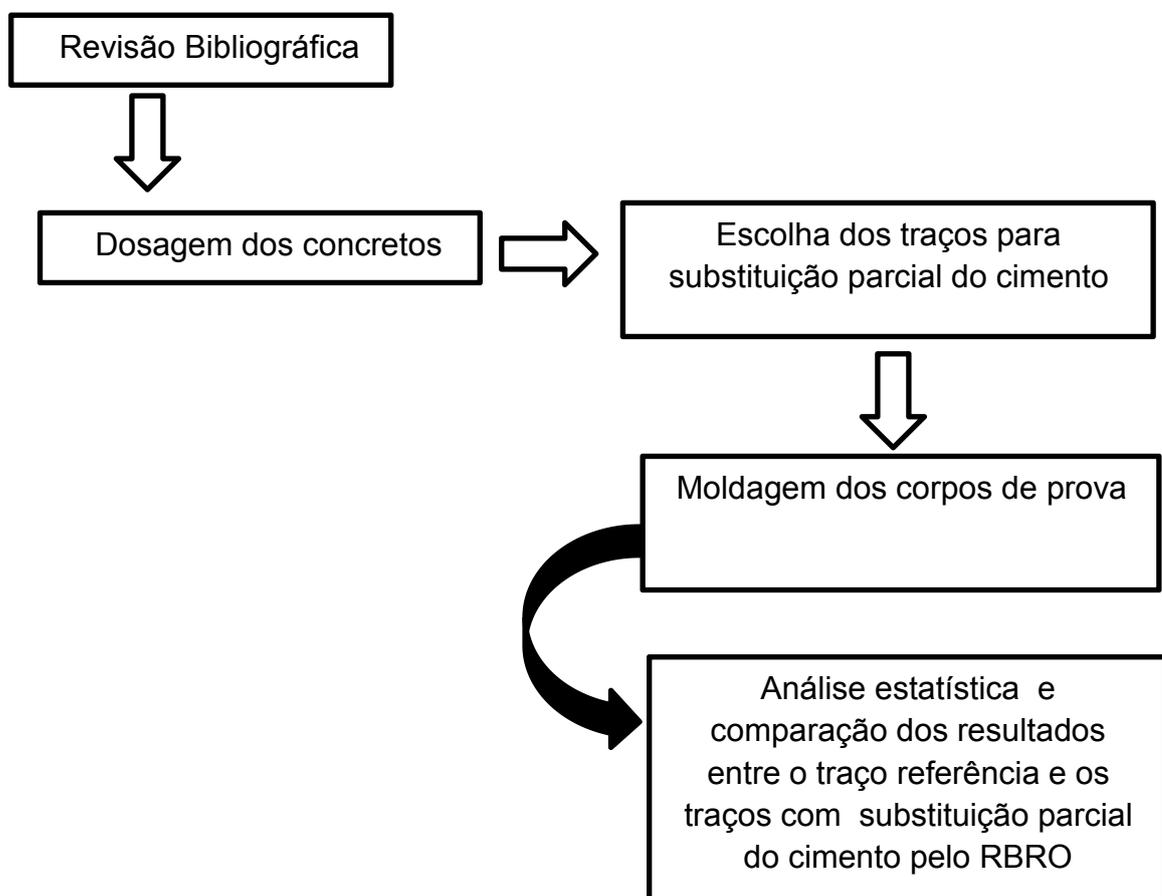


Figura 4 – Delineamento da pesquisa.
Fonte: autor.

No que diz respeito à revisão bibliográfica para o aprofundamento do tema proposto, primeira fase do trabalho, buscou-se subsídios em literaturas técnicas na área de concretos produzidos com RBRO, conceito de vida útil, indicadores de durabilidade e penetração de cloretos em estruturas de concreto armado.

Na dosagem dos concretos, segunda fase do trabalho, foi definida o método de dosagem dos concretos. Para a dosagem dos concretos utilizou-se a metodologia

do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993).

Na terceira fase do trabalho foi definido o traço de referência para substituição parcial do cimento pelo RBRO, bem como os teores de substituição, os teores de substituição foram definidos com base em artigos utilizados no estado da arte.

Na moldagem dos corpos de prova, quarta fase do trabalho, os concretos foram moldados e curados segundo preconização da associação brasileira de normas técnicas.

Na quinta e última fase da pesquisa, os resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente, foi determinado a influência da substituição parcial do cimento pelo RBRO nas propriedades estudadas.

3.2 Fluxograma do programa experimental

As etapas do programa experimental deram-se da forma como apresentado na Figura 5.

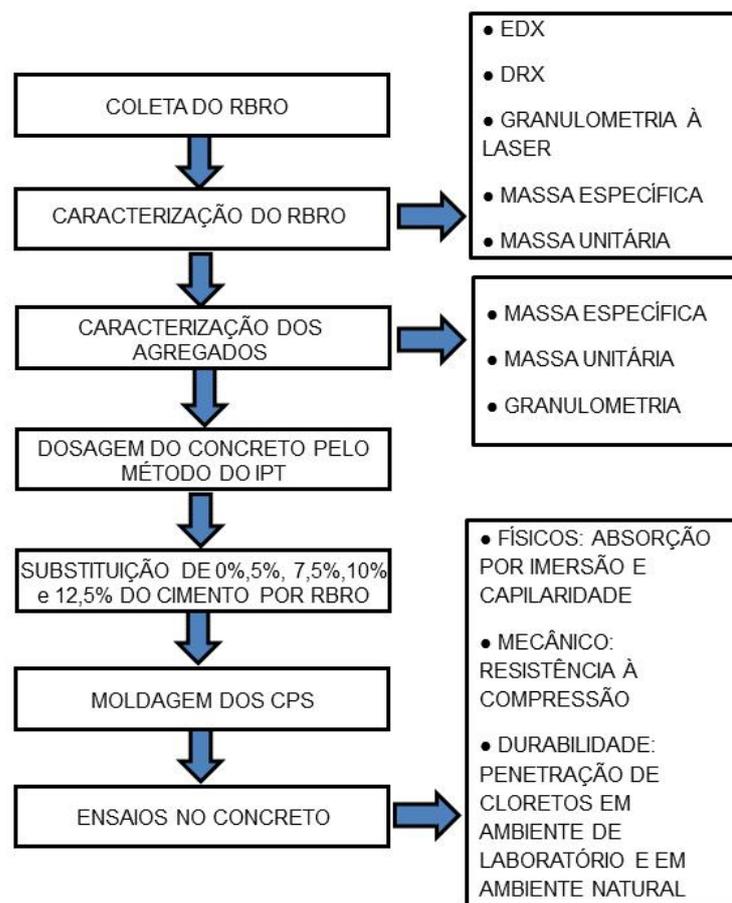


Figura 5– Fluxograma do programa experimental.
Fonte: autor.

3.3 Caracterização dos materiais empregados

Neste item são descritos os materiais utilizados para confecção dos concretos e suas caracterizações.

3.3.1 Agregados

Os agregados utilizados foram todos provenientes da cidade de Pelotas/RS. Como agregado miúdo foi utilizada uma areia natural quartzosa média, enquadrada na zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2005), seca em estufa até constância de massa. O agregado graúdo foi brita granítica classificada como brita 1 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005).

Os resultados da caracterização física obtidos dos agregados naturais estão apresentados na Tabela 4, bem como nas curvas granulométricas das Figuras 6 e 7.

Tabela 4 – Caracterização dos agregados

Tipo de ensaio		Agregado miúdo	Agregado graúdo
Composição granulométrica/ NBR NM 248:2003	Ø máx (mm)	4,75	19
	Módulo de Finura	2,84	4,69
Massa específica (g/cm ³) / NBR NM 52:2009 e NBR NM		2,62	2,60
Massa unitária solta (g/cm ³) / NBR NM 45:2006		1,55	1,41

Fonte: autor.

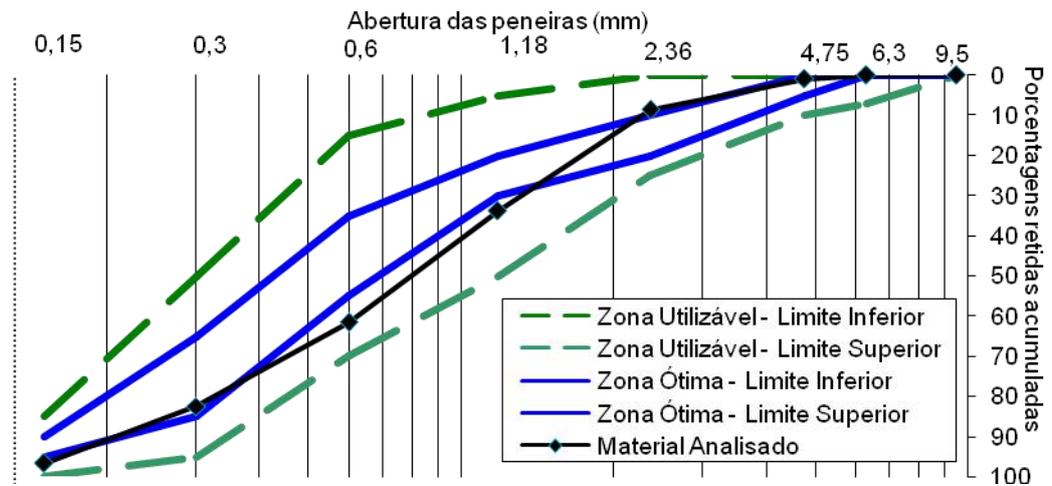


Figura 6–Distribuição granulométrica do agregado miúdo, conforme NBR NM 248:2003.
Fonte: autor

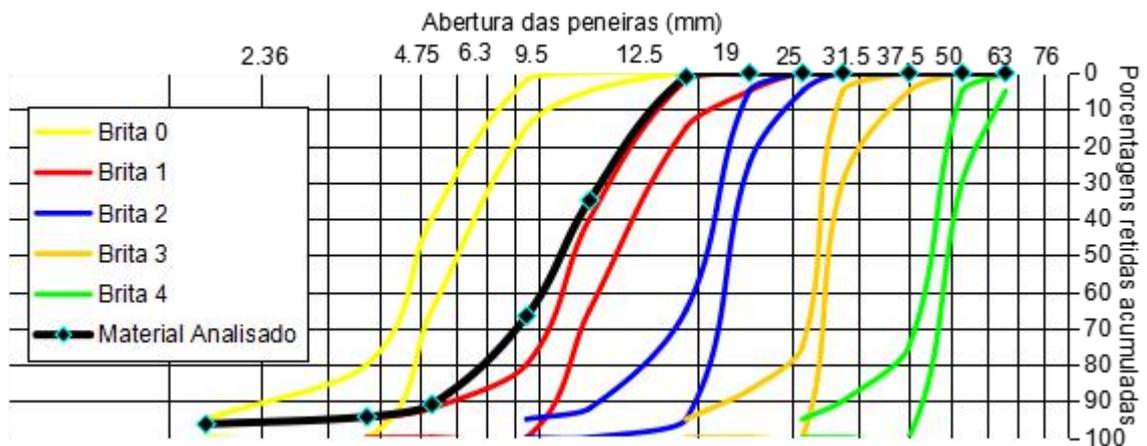


Figura 7– Composição granulométrica do agregado graúdo, conforme NBR NM 248:2003.
Fonte: autor

3.3.2 Cimento

Todo cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V-ARI da marca Supremo Secil e do mesmo lote, por conter o maior teor de clínquer dentre os cimentos disponíveis no mercado regional e, assim, consistir em um cimento “mais puro” em termos de adições minerais, o que facilita a compreensão da ação do RBRO. Outro fator que motivou a escolha do CP V-ARI foi o seu uso em estruturas pré-moldadas, pela rapidez no ganho de resistência e como consequência uma desforma rápida.

Na Tabela 5, é apresentada a caracterização física, química e mecânica do cimento.

Tabela 5- Composição química e física do aglomerante

Propriedades químicas	Resultados	Exigências da norma
	CP V-ARI	NBR 5733:1991
Dióxido de silício - SiO ₂	18,91	---
Óxido de cálcio total – CaO	60,59	---
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	4,35	---
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	2,69	---
Óxido de magnésio – MgO	4,74	≤ 6,5
Trióxido de enxofre – SO ₃	2,75	≤ 4,0
Óxido de cálcio livre – CaO Livre	0,94	≤ 3,0
Perda ao fogo	2,89	≤ 4,5
Resíduo insolúvel	0,72	≤ 1,0
Propriedades físicas	Resultados	Exigências da norma
	CP V-ARI	NBR 5733:1991
Blaine (cm ² /g)	4230	≥ 3000
Tempo de início de pega (min)	134	≥ 60
Tempo de fim de pega (min)	195	≤ 600
Finura na peneira #200 (%)	0,13	≤ 6,0
Expansibilidade a quente (mm)	0	≤ 5,0
Massa específica (g/cm ³)	3,11	---
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	37,7	≥ 24
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	43	≥ 34
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	51,2	---

Fonte: Cimento Secil.

3.3.3 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

O RBRO, coletado na forma de lama, conforme Figura 8, foi gerado por uma empresa beneficiadora de mármore e granitos, localizada na cidade de Pelotas/RS. O RBRO utilizado nessa pesquisa teve origem de uma única empresa de beneficiamento de rochas ornamentais. Para realizar a caracterização qualitativa do RBRO, a coleta do material foi realizada segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), conforme o item 4.2.6, sobre a amostragem em montes ou pilhas de resíduos. Ao

final passou por um processo de homogeneização e quarteamento para a obtenção de uma amostra representativa.

Este método consiste em um processo de divisão de uma amostra pré homogeneizada em quatro partes iguais, sendo que duas partes opostas são tomadas para constituir uma nova amostra, descartando-se as partes restantes para então, serem misturadas totalmente e repetir o processo de quarteamento até obter o volume desejado, conforme NBR 10007 (ABNT, 2004).



Figura 8– Coleta do RBRO utilizada na pesquisa
Fonte: Autor

A coleta foi feita diretamente do tanque de decantação da empresa, sendo que todo material utilizado no trabalho foi coletado no mesmo dia. A lama de RBRO foi colocada em estufa, onde permaneceu por 48 horas a uma temperatura de 105°C. Posteriormente, o resíduo foi passado na peneira de abertura 1,18mm, para retirada de eventuais impurezas e destorroamento, eliminando, desta forma, a necessidade de moagem (Figura 9). Uma vez destorroado, o resíduo foi passado na peneira de abertura da malha de 300 µm e armazenado em sacos, estando pronto para ser utilizado.



(a) (b)
 Figura 9– Preparação do RBRO: (a) resíduo antes do destorroamento: (b) resíduo após destorroamento

3.3.3.1 Caracterização do RBRO

O resíduo foi caracterizado mineralogicamente por ensaios de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (EDX) e fisicamente por ensaios de granulometria à laser, massa específica e massa unitária.

Na Tabela 6, estão os resultados dos ensaios de massa específica real do RBRO, através da NBR NM 23 (ABNT, 2001) e da sua massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 6 - Resultado da caracterização do RBRO

Material	Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
RBRO	2,64	1,16

Fonte: autor.

A Figura 10 apresenta a curva granulométrica do RBRO, onde são apresentados os diâmetros das partículas do mesmo. O ensaio de granulometria a laser foi realizado no laboratório de Ciências dos Materiais da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em granulômetro a laser da Cilas, modelo 1064. O ensaio foi realizado com o intuito de identificar a dimensão média das partículas do RBRO.

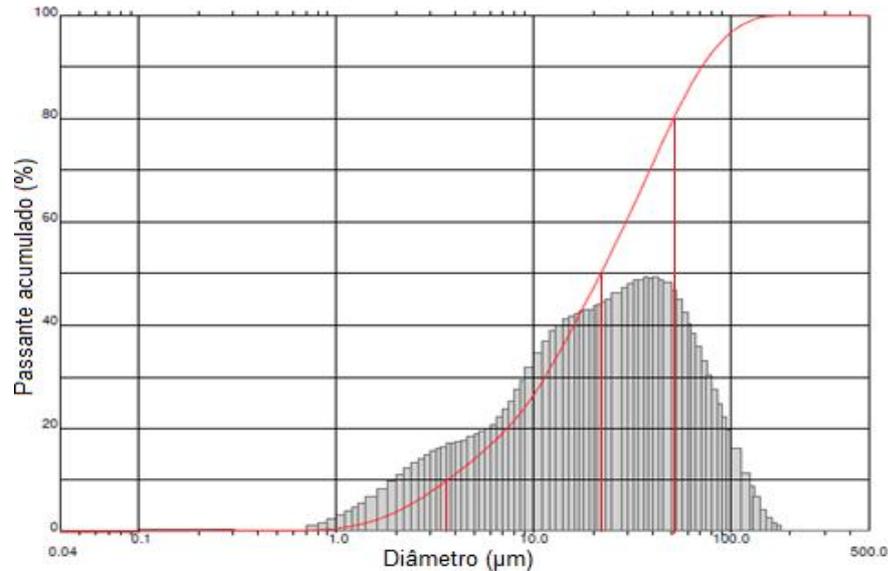


Figura 10– Curva granulométrica do RBRO

Fonte: autor.

A amostra possui D10 igual a 3,66 µm, D50 igual a 21,91 µm e D90 igual a 71,09 µm, ou seja, 10% das partículas apresentam diâmetro menor que 3,66 µm, 50% apresentam diâmetro menor que 21,91 µm e 90% apresentam o diâmetro menor que 71,09 µm.

A análise da estrutura do material foi feita por meio do ensaio de difração de raio-x (DRX) no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O ângulo de difração fornece o espaçamento do arranjo cristalino e a altura do pico fornece a intensidade do raio. A intensidade de picos característicos de cada mineral é proporcional a sua quantidade (Figura 11).

A partir da análise feita, foi possível verificar que o RBRO, em estudo, é constituído principalmente por quartzo (Q) e Albita (A). Podem ser observados, também, picos menos intensos de Microclina (M) e Biotita (B). A Figura 11 apresenta o resultado do ensaio de DRX, que demonstra a pouca reatividade do RBRO em decorrência da mesma apresentar um pico cristalino bem definido e referente ao quartzo (SiO₂).

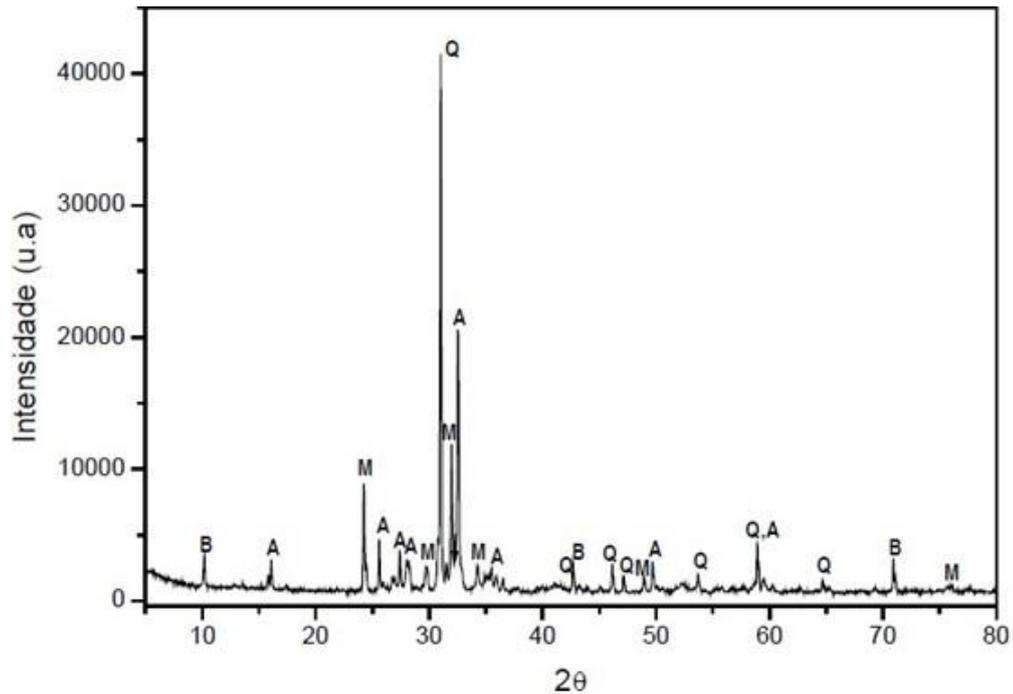


Figura 11– Difratograma do RBRO
Fonte: autor.

O ensaio de EDX foi realizado para avaliar a pozolanicidade do RBRO aos requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2014). A Tabela 7 apresenta o resultado obtido via EDX (fluorescência de raio-x). A determinação da composição química elementar foi feita em um espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia, Shimadzu EDX-720, em atmosfera de ar com collimator 5 mm. A composição química do RBRO foi analisada no laboratório de ciências dos Materiais da UFPel.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de EDX

Elemento	Quantitativo (%)
SiO ₂	34,085
K ₂ O	20,287
Al ₂ O ₃	18,770
Fe ₂ O ₃	12,570
CaO	12,181
TiO ₂	1,444
MnO	0,178
ZnO	0,122
ZrO ₂	0,118
SrO	0,103
CuO	0,101
Rb ₂ O	0,024
Y ₂ O ₃	0,006

Fonte: autor.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve ser superior a 70% para que o material analisado seja considerado pozolânico. A soma dos mesmos foi de 62,42%. Sendo assim, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) o material não é pozolânico, possuindo, desta maneira, ação física e atuando no refinamento da estrutura dos poros e também como pontos de nucleação para a precipitação da hidratação.

3.3.4 Água

A água potável utilizada foi proveniente da rede de abastecimento público de Pelotas.

3.3.5 Cloreto de sódio

O cloreto de sódio foi utilizado na forma de cloreto de sódio Pa (NaCl), solução em pó, para preparação da solução salina para imersão dos corpos de prova no ensaio de penetração de íons cloreto em laboratório. Foram empregados 35g de NaCl dissolvido em cada litro de água, para simular a salinidade do oceano atlântico (HELENE, 1993).

3.4 Determinação dos traços de concreto

O método de dosagem utilizado foi o IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993). Este método foi utilizado por ser um dos mais difundidos no Brasil. Através de procedimento experimental definiu-se o teor de argamassa seca ideal em 51% ($\alpha = 0,51$), sendo esse teor de argamassa determinado experimentalmente necessário para preencher os vazios entre as pedras dos agregados graúdos. A quantidade de água foi a necessária para a obtenção do abatimento do tronco de cone em 70 ± 10 mm, sendo esse o abatimento utilizado em obras convencionais (AMBROZEWICZ, 2012).

A partir dos ajustes dos traços obteve-se os valores da relação a/c, consumo de cimento e aos 28 dias, a resistência à compressão média dos corpos de prova

referente ao ensaio de dosagem. Tais parâmetros estão apresentados na Tabela 8 e em suas equações de dosagem representadas através da Figura 12.

Tabela 8 - Resultados do ajuste da curva de dosagem experimental

Aglomerante	Traço unitário	Relação água/cimento	F _{c28} Médio (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Abatimento (mm)
CP V-ARI	1;3,5	0,41	45	493,37	68
	1;5,0	0,50	38	376,67	72
	1;6,5	0,69	28	297,05	74

Fonte: autor

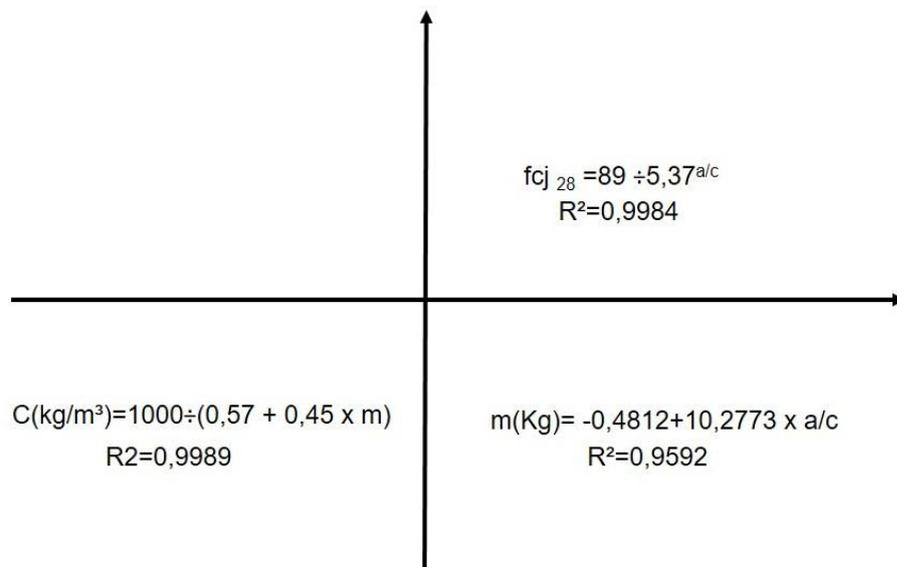


Figura 12 – Equações de dosagem
Fonte: autor.

Através das equações de dosagem, e do valor pré-estabelecido da relação água/cimento de 0,60, foi determinado o traço de referência do concreto, conforme Tabela 9. A relação água/cimento igual a 0,60 foi definida por ser o valor máximo considerado, para um concreto estrutural, localizado em ambiente urbano (Classe II de agressividade), de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, a elevada relação água/cimento adotada se deve à dificuldade da realização do ensaio de penetração de íons cloreto em concretos com baixos fatores água/cimento, em função de que nestes concretos a permeabilidade do material é reduzida.

A partir do traço de referência foi realizada a substituição parcial do cimento pelo RBRO em teores de 5,0%, 7,5%, 10% e 12,5%. A escolha desses teores foi

baseada em estudos realizados por Sing et al. (2017), Rana, Kalla e Csetenyi. (2015), Bacarji et al. (2013) e Ergun (2011).

Tabela 9– Traços unitários utilizados na confecção dos corpos de prova

Traço	Cimento(kg)	RBRO(kg)	Areia(kg)	Brita (kg)	Fator a/c	Quantidade de corpos de prova
Referência	1	0	2,4	3,28	0,60	39
5%	0,95	0,05	2,4	3,28	0,60	39
7,50%	0,925	0,075	2,4	3,28	0,60	39
10%	0,9	0,1	2,4	3,28	0,60	39
12,50%	0,875	0,125	2,4	3,28	0,60	21

Fonte: autor.

3.5 Ensaios

Para facilitar o entendimento do programa experimental, no Quadro 4 estão detalhadas todas as propriedades estudadas nesta pesquisa, bem como a quantidade de amostras e as normas utilizadas nos procedimentos.

Todos os corpos de prova (cilíndricos com 10 x 20 cm) foram moldados e curados conforme as preconizações da NBR 5738 (ABNT, 2015). No ensaio de penetração de íons cloreto, tanto em laboratório quanto em ambiente natural, o período de cura foi de sete dias. Este período de cura para os ensaios de durabilidade foi com o intuito de simular uma situação real, pois esse é o tempo de cura adotado na grande maioria das obras e também o tempo médio que as empresas pré-moldadas liberam as peças para irem para o canteiro de obras, sendo que nos demais ensaios procedeu-se a cura, conforme as normas brasileiras, até a data de ensaio.

Quadro 4 – Metodologia dos ensaios realizados

Ensaio		Detalhes	Metodologia/ Equipamentos
Mecânico	Resistência à compressão	5 cps por traço nas idades: 3,7 e 28 dias	NBR 5739 (ABNT, 2007)
Físico	Absorção de água por imersão	3 cps por traço na idade: 28 dias	NBR 9778 (ABNT, 2009)
	Absorção de água por capilaridade	3 cps por traço na idade: 28 dias	NBR 9779 (ABNT, 2009)
Durabilidade	Ensaio de penetração de cloretos em laboratório	2 cps por traço com 6 e 12 meses de imersão parcial em solução 3,5% NaCl, exceto o traço 12,5 %	Colorimétrico com aspersão de AgNO ₃ a 0,1M
	Profundidade de penetração de cloretos em ambiente natural na cidade de Pelotas e Rio Grande	2 cps por traço com 6 e 12 meses de exposição em ambiente natural, exceto o traço 12,5%	Colorimétrico com aspersão de AgNO ₃ a 0,1M

Fonte: autor.

Não foram realizados ensaios de durabilidade no traço com 12,5% de substituição do cimento pelo RBRO, pois em estudos realizados por Sing et al. (2017), Rana, Kalla e Csetenyi (2015), Bacarji et al. (2013) e Ergun (2011), teores de substituição superiores a 10% apresentaram efeitos negativos nas propriedades físicas e de durabilidade. Mesmo sabendo que a durabilidade é afetada de forma negativa em teores de substituição superior a 10%, decidiu-se realizar ensaios físicos e mecânicos no teor de substituição de 12,5% para obter um conhecimento da variação mecânica e física, que se torna importante para conhecer o material.

3.5.1 Ensaio mecânico

Os corpos-de-prova foram ensaiados quanto à resistência à compressão (Figura 13), conforme descrição da NBR 5739 (ABNT, 2007), na prensa da marca Forney, modelo F-25EX-F-CPILOT, com precisão de erro de indicação e repetibilidade inferior a 1%. Os ensaios foram realizados no laboratório de engenharia civil da UFPEL. Os corpos-de-prova foram ensaiados com 3, 7 e 28 dias para avaliar a influência do RBRO sobre a evolução da resistência mecânica no tempo.



Figura 13 - Corpos de prova após ruptura
Fonte: Autor

3.5.2 Ensaio físicos

- Absorção por capilaridade: o ensaio é regido conforme as diretrizes da NBR 9739 (ABNT, 2013) e é considerado um parâmetro físico com grande importância, pois avalia a absorção de água através da sucção capilar. Concretos com alto índice de absorção podem facilitar o ingresso de agentes agressivos para o interior do mesmo. Os corpos-de-prova foram ensaiados com 28 dias conforme recomendação da norma.
- Absorção por imersão e índice de vazios: o ensaio é regido conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009) e deve ser utilizado para definir o índice de vazios e de absorção por imersão dos concretos. Os corpos-de-prova foram ensaiados com 28 dias conforme recomendação da norma.

3.5.3 Ensaio de durabilidade

As datas em que foram ensaiados os corpos de prova, tanto os que estavam em laboratório, quanto em ambiente natural, estão ilustradas na Figura 14. Ressalta-se que os corpos de prova foram moldados e expostos nos mesmos dias e nos diferentes locais, e também ao mesmo tempo de exposição, sendo este de 12 meses. A cada seis meses foram retirados dois cps de cada traço para avaliar a penetração de cloretos.



Figura 14 - Representação esquemática da realização do ensaio de durabilidade.

Fonte: autor.

3.5.3.1 Ensaios de penetração de íons cloreto em laboratório

O ensaio de penetração de íons cloreto em ambiente de laboratório teve o propósito de que a penetração de íons cloreto simulasse uma situação real e possibilitasse uma confiabilidade maior na medida de desempenho dos concretos. O ensaio foi realizado no prédio do Centro de Engenharias da UFPel. A Figura 15 apresenta o local onde ficou o reservatório tendo em seu interior os corpos de prova imersos parcialmente e a Figura 16 sua vista superior.



Figura 15- Local de armazenamento dos corpos de prova imersos em solução salina

Fonte: Autor



Figura 17 - Corpo-de-prova após ruptura por compressão diametral
Fonte: Autor

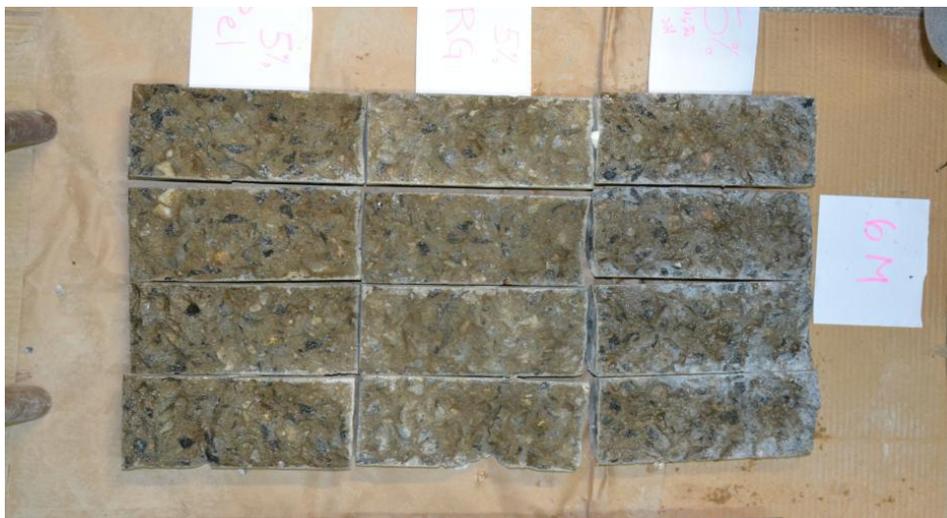


Figura 18 - Corpo-de-prova após aspensão de solução de nitrato de prata
Fonte: Autor

A medição da profundidade de penetração de cloretos feita através de fotografias, e tratadas com o auxílio do programa AutoCAD 2017, foram realizadas através de leituras da profundidade de penetração com espaçamento de 10 mm, conforme Figura 19. Como a penetração de cloretos não é uniforme, a NT BUILD 492 (2000) determina verificar medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média entre todas elas. No caso de não ser possível medir pela presença de agregados, deve-se alterar o ponto de medição ou ignorar esta profundidade desde que tenha outros cinco pontos válidos.



Figura 19- Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos
Fonte: Autor

A análise dos resultados obtidos no ensaio fora avaliada utilizando a equação 1 proposta por Bakker (1988), que possibilita a obtenção de um coeficiente de penetração.

Com a profundidade média estabelecida para cada idade de submersão, os valores de cada traço foram analisados através de funções de regressão, resultando em equações, conforme mostrado a seguir. Delas foram obtidos o coeficiente de penetração “k”.

$$x=k(t)^{1/2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

x- Profundidade de penetração (mm);

k - Coeficiente de penetração;

t - tempo em semanas

3.4.3.2 Ensaio natural de penetração de cloretos nas cidades de Pelotas e Rio Grande

A escolha do local para exposição dos corpos de prova na cidade de Pelotas/RS foi baseada no trabalho de Ferreira (2017), onde foram escolhidos diferentes locais de exposição na cidade de Pelotas/RS, com o intuito de verificar se o concreto teria comportamento diferente frente à penetração de cloretos e CO₂, sendo que a autora concluiu que ao final de 16 meses a penetração de cloretos foi maior no bairro Porto (10 mm) e Fragata (10 mm). Devido à facilidade de acesso e disponibilidade de espaço físico, em função do grande número de corpos de prova,

foi escolhido como local de exposição o Campus Porto da Universidade Federal de Pelotas. Os corpos-de-prova foram expostos à beira do Canal São Gonçalo, cerca de 50 metros, no segundo pavimento de uma estrutura de concreto coberto parcialmente por uma laje, conforme demonstram as Figura 20 e 21.



Figura 20- Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto.

Fonte: Google earth, adaptado pelo autor.



Figura 21- Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto.

Fonte: Autor

A medida da profundidade de penetração de íons cloreto, bem como o cálculo do coeficiente de penetração “k” em ambiente natural, foi realizada da mesma forma que no ensaio de penetração de íons cloreto em ambiente de laboratório, conforme equação 1.

Na cidade de Rio Grande/RS, o local de exposição dos corpos de prova para determinação da penetração natural de íons cloreto foi definido levando em consideração a disponibilidade de espaço para armazenamento dos corpos de prova com a mínima interferência de paredes, árvores ou outros elementos e a segurança contra atos de vandalismo. Foi escolhido como local de exposição o Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande, localizado à 1,2 km do Porto de Rio Grande, expostos ao ar livre no prédio do Laboratório da Escola de Engenharia, em uma marquise de concreto, conforme demonstram as Figuras 22, 23 e 24.



Figura 22 - Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande.
Fonte: Google Earth.

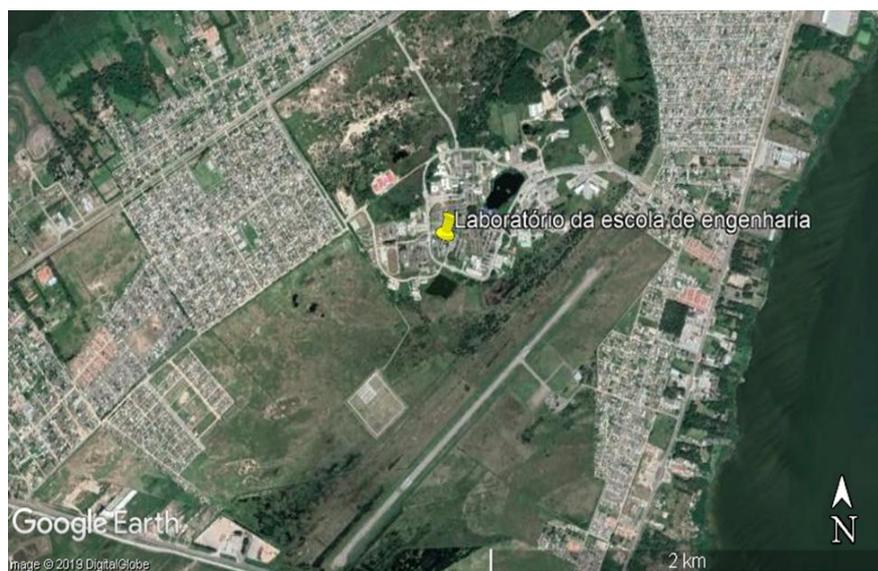


Figura 23- Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande
Fonte: Google Earth.



Figura 24- Localização do ambiente de exposição das amostras na cidade de Rio Grande.

Fonte: Autor.

3.6 Caracterização climática das cidades de Pelotas/RS e Rio Grande/RS

Com o objetivo de verificar a agressividade do ambiente de exposição das amostras, fez-se necessário a caracterização da atmosfera local quanto às condições climáticas. Para a caracterização foram coletadas informações diárias para os seguintes dados: temperatura máxima, mínima e média; umidade relativa média e precipitação, referentes ao período de exposição, compreendido entre janeiro de 2018 e janeiro de 2019. Estes dados estão apresentados no Apêndice A.

Cabe destacar que o monitoramento realizado foi do macro clima do ambiente de exposição dos corpos de prova, neste caso as cidades de Pelotas/RS e de Rio Grande/RS.

Em Pelotas, os dados meteorológicos foram obtidos através do sítio eletrônico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no Capão do Leão, que disponibiliza boletins diários e mensais de variáveis meteorológicas. Na caracterização ambiental da cidade de Rio Grande foram utilizados os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Rio Grande – OMM: 86995

As Tabelas 10 e 11 apresentam a precipitação acumulada, temperatura e umidade relativa para cada mês de exposição na cidade de Rio Grande/RS e Pelotas/RS, respectivamente.

Tabela 10- Variáveis climáticas da cidade de Rio Grande/RS

Período de exposição		Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa máxima (%)	Umidade relativa mínima (%)	Umidade relativa média (%)	Precipitação acumulada (mm)
1º período	1º mês (23/01/2018 a 23/02/2018)	28,14	19,58	23,86	84,06	49,66	66,86	44,6
	2º mês (23/02/2018 a 23/03/2018)	27,25	16,44	21,84	88,89	49,07	68,98	34,6
	3º mês (23/03/2018 a 23/04/2018)	26,54	18,24	22,39	88,35	57,45	72,9	107,6
	4º mês (23/04/2018 a 23/05/2018)	22,45	15,59	19,02	88,83	60,69	74,76	69,8
	5º mês (23/05/2018 a 23/06/2018)	17,81	9,67	13,74	90,45	60,23	75,34	12,0
	6º mês (23/06/2018 a 23/07/2018)	16,4	9,61	13,01	91,57	67,77	79,67	149,2
2º período	7º mês (23/07/2018 a 23/08/2018)	16,26	10,02	13,14	91,71	66,26	78,98	88,6
	8º mês (23/08/2018 a 23/09/2018)	19,95	13,36	16,65	89,81	61,74	75,28	131,4
	9º mês (23/09/2018 a 23/10/2018)	21,37	14,65	18,01	87,64	58,22	76,11	231,4
	10º mês (23/10/2018 a 23/11/2018)	24,75	17,35	21,05	85,48	52,94	76,09	47,4
	11º mês (23/11/2018 a 23/12/2018)	25,79	17,28	21,54	87,21	52	76,09	157,2
	12º mês (23/12/2018 a 23/01/2019)	28,02	20,9	24,46	87,35	58,19	76,09	202,2

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia.

Tabela 11- Variáveis climáticas da cidade de Pelotas/RS

Período de exposição		Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa média (%)	Precipitação acumulada (mm)
1º período	1º mês (23/01/2018 a 23/02/2018)	28,48	18,05	23,26	79,17	65,0
	2º mês (23/02/2018 a 23/03/2018)	27,97	15,68	21,82	82,72	51,5
	3º mês (23/03/2018 a 23/04/2018)	27,1	17,29	22,2	86,03	195,5
	4º mês (23/04/2018 a 23/05/2018)	22,96	15,16	19,06	88,14	30,1
	5º mês (23/05/2018 a 23/06/2018)	18,72	8,6	13,66	85,47	104,1
	6º mês (23/06/2018 a 23/07/2018)	17,08	9,08	13,08	89,22	206,6
2º período	7º mês (23/07/2018 a 23/08/2018)	16,85	9,11	12,98	87,37	118,1
	8º mês (23/08/2018 a 23/09/2018)	20,32	12,6	16,46	85,88	194,7
	9º mês (23/09/2018 a 23/10/2018)	22,15	14,5	18,33	82,83	180,0
	10º mês (23/10/2018 a 23/11/2018)	25,7	16,65	21,17	77,86	61,0
	11º mês (23/11/2018 a 23/12/2018)	26,94	17,05	22	77,75	56,0
	12º mês (23/12/2018 a 23/01/2019)	28,62	20,55	24,58	83,14	254,6

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas.

As Figuras 25 e 26 mostram a precipitação acumulada e a temperatura média, respectivamente, enquanto a Figura 27 apresenta a umidade relativa para os dois períodos estudados (0 a 6 meses, de 6 a 12 meses).

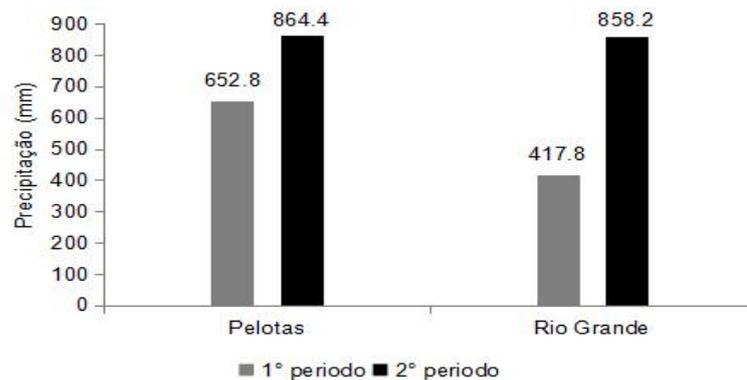


Figura 25- Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras.
Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas.

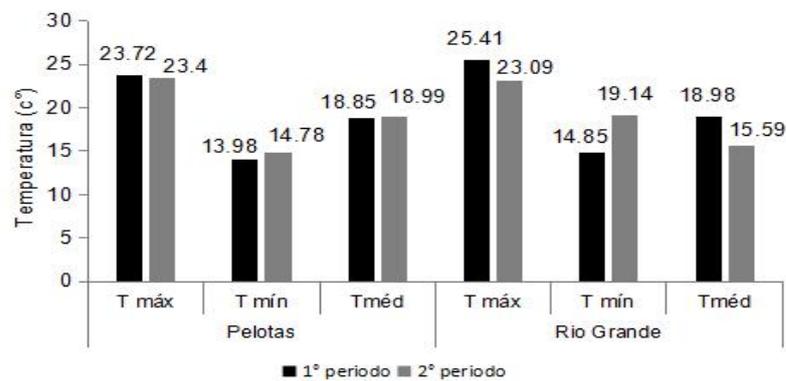


Figura 26- Temperatura em cada período de exposição das amostras.
Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas.

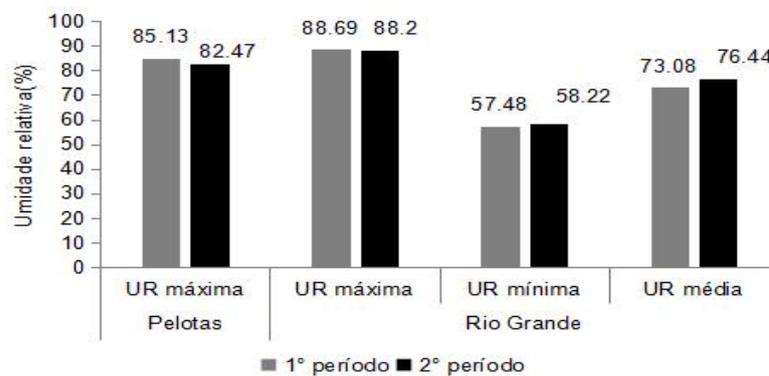


Figura 27 - Umidade relativa para cada período de exposição.
Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas.

3.7 Análise estatística dos resultados

A análise estatística foi realizada através do programa SPSS 20.0 for Windows, utilizando o teste de análise de variância (ANOVA) seguida de teste de comparações múltiplas de Tukey para comparação entre as variáveis.

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o teste de análise de variância (ANOVA), que testa a variação entre grupos tomando como referência a variação dentro dos grupos. A hipótese de nulidade é a de que as médias são todas iguais. Por meio do teste F (distribuição de Fischer) é possível observar a significância estatística da variabilidade das médias entre grupos (SPIEGEL, 1993).

O valor “p-value” (probabilidade – distribuição t de Student) menor do que 0,05 designa que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%. Neste trabalho foi adotado um nível de confiança de 95% para a análise de variância, pois na maioria dos experimentos com materiais para fins estruturais adota-se esse valor como referencial para aceitação do erro (TORRES, 2011).

A análise de variância, quando significativa, nos dá a certeza de que existe no mínimo um par de médias diferentes, mas sem se saber quantas, e pior ainda, quais. Assim, a comparação múltipla de médias se faz necessária para se determinar quais os pares de médias são diferentes entre si. Neste trabalho foi feita a comparação de médias através do teste de Tukey (SPIEGEL, 1993).

Para a resistência à compressão, foram consideradas como variáveis independentes o teor de substituição e a idade. Na absorção por imersão e capilaridade foi considerado como variável independente o teor de substituição. Para a profundidade de penetração em ambiente de laboratório foram consideradas como variáveis independentes o teor de substituição, já para a profundidade de penetração em ambiente natural foram considerados como variáveis independentes o teor de substituição a cidade de exposição e o tempo. Um nível de significância (α) de 5% foi utilizado nas análises, ou seja, os resultados obtidos apresentam um nível de confiança de 95%.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nesta dissertação, os quais são: comportamento mecânico, comportamentos físicos e quanto à durabilidade.

4.1 Resultados do comportamento mecânico

As médias, desvios padrões e coeficientes de variação dos resultados de resistência à compressão ao longo das idades estão apresentadas na Tabela 12 e Figura 28, sendo que no apêndice B estão apresentados os valores individuais de cada amostra avaliada.

Tabela 12- Média dos resultados de compressão axial em todas as idades dos concretos estudados. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação

Traço	Média 3 dias (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média 7 dias (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média 28 dias (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Ref.	18,89	0,56	2,96	22,40	1,50	6,70	29,92	0,92	3,07
5%	19,06	1,04	5,46	21,96	2,68	12,20	29,69	3,15	10,63
7,50%	21,13	0,44	2,08	22,69	0,81	3,57	29,96	2,53	8,44
10%	19,73	1,19	6,03	21,50	2,01	9,35	28,91	2,42	8,37
12,5%	17,60	0,46	2,52	18,80	1,04	5,18	25,54	0,92	3,51

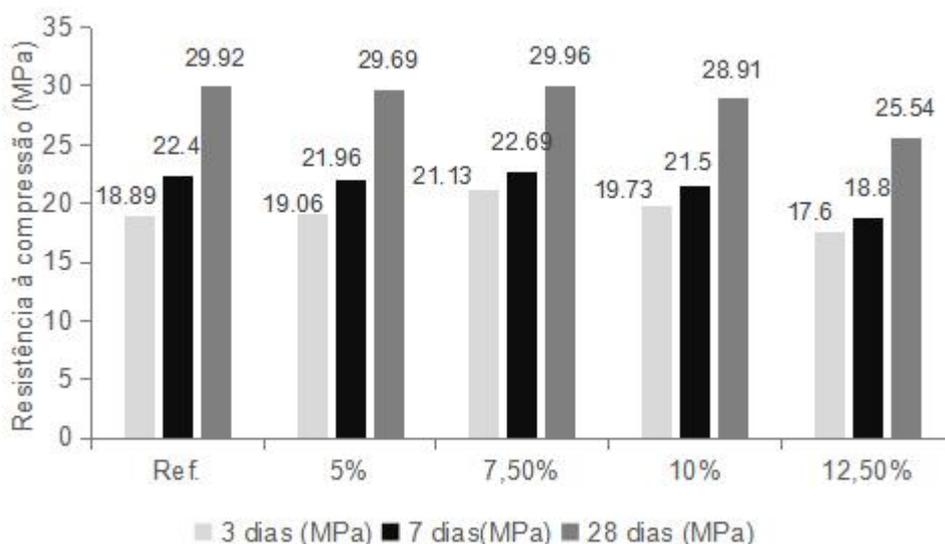


Figura 28 - Resistência à compressão
Fonte: autor

Aos 3 dias, com exceção do teor de 12,5%, os traços com substituição do cimento pelo RBRO proporcionaram maior resistência que o traço de referência, o que demonstra a atuação física do resíduo, uma vez que nesse momento, a maior parte das reações químicas ainda não ocorreu.

Com 7 e 28 dias o teor de substituição de 7,5% demonstrou o melhor desempenho, proporcionando uma resistência ligeiramente superior ao traço de referência.

O RBRO apresentou diâmetro médio das partículas de 21,91 μ m. Segundo Gonçalves (2000) as partículas de adições minerais situadas em uma faixa granulométrica inferior a 50 μ m contribuem para uma densificação da matriz cimentícia, através do preenchimento dos vazios que existem entre os produtos de hidratação do cimento, ou em função da não hidratação do material. Já as partículas de diâmetro entre 50 μ m e 150 μ m atuam complementando descontinuidades da curva granulométrica do agregado miúdo.

Dessa forma, o RBRO até certo teor de substituição parece ter preenchido os possíveis vazios que existem entre os produtos de hidratação, ou devido a não hidratação de parte do aglomerante, possibilitando uma contribuição com o efeito filler e complementação da granulometria do agregado miúdo.

Os resultados obtidos corroboram com os trabalhos de Kockal (2013), Ramos et al. (2013), Aliabdo, Elmoaty e Auda (2014), Munir, Kazmi e Wu (2017) e Ashish (2018), que obtiveram resultados promissores com a substituição do cimento pelo RBRO em porcentagens de até 10%.

Para melhor análise dos resultados de resistência à compressão, os valores obtidos no ensaio foram lançados no software SPSS 20.0, para avaliar os valores das resistências à compressão entre o traço de referência e os traços com substituição de cimento pelo RBRO. Ainda foram introduzidas na análise estatística o fator idade para averiguação se esses fatores independentes e/ou interagidos apresentariam diferenças estatísticas para a análise dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Através da análise ANOVA foi constatada a significância estatística das variáveis relacionadas, sendo elas o teor de substituição e idade na resistência à compressão axial. Na Tabela 13 estão apresentadas a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações. Verifica-se que o teor de substituição e a idade de ensaio analisados separadamente possuem efeito significativo sobre a resistência

à compressão axial. Entretanto, não existe influência significativa entre o teor de substituição e a idade. Esta inexistência de interação demonstra que a substituição não provoca aumentos significativos ao longo do tempo. Esse comportamento já era esperando, pois, o resíduo não possui atividade pozolânica. Ademais, é possível observar-se que o valor p é menor do que o nível de significância especificado ($\alpha = 0,05$). Portanto, a hipótese nula, que significa a igualdade entre as médias das resistências, é rejeitada.

Tabela 13– Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à compressão

Fonte	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	4	78,88236	19,72059	6,92844	0,00011
Idade	2	1241,11197	620,55598	218,02015	3,01E ⁻²⁸
Teor de substituição x Idade	8	20,21522	2,52690	0,88777	0,53227
Resíduos	60	170,77944	2,84632		

Fonte: autor.

Tornou-se também necessário identificar entre quais tratamentos apresentaram-se as diferenças, sendo assim, o Teste de Tukey foi aplicado. Ao analisar a resistência aos três dias, nenhum dos teores de substituição estudados apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao concreto de referência, com significância superior a 95%, conforme Figura 29. Analisando os resultados obtidos, pelo teste de Tukey, é possível observar aos sete dias (Figura 30), que somente o concreto com 12,5% de substituição do cimento pelo RBRO pode ser considerado estatisticamente diferente do concreto de referência, com significância superior a 95%. Do mesmo modo, aos 28 dias apenas o concreto com 12,5% de substituição do cimento pelo RBRO pode ser considerado estatisticamente diferente do concreto de referência (Figura 31).

No teor de substituição de 12,5%, o efeito cimentante demonstrou ser preponderante em relação ao efeito fíler, acarretando em uma queda na resistência em comparação ao traço de referência. Com a hidratação dos silicatos de cálcio há a produção do silicato de cálcio hidratado, responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento. Com a substituição parcial do cimento, parte do potencial de formação de silicato de cálcio hidratado da mistura é comprometido e o refinamento dos poros promovido pelas partículas finas do RBRO não foi capaz de compensar este efeito.

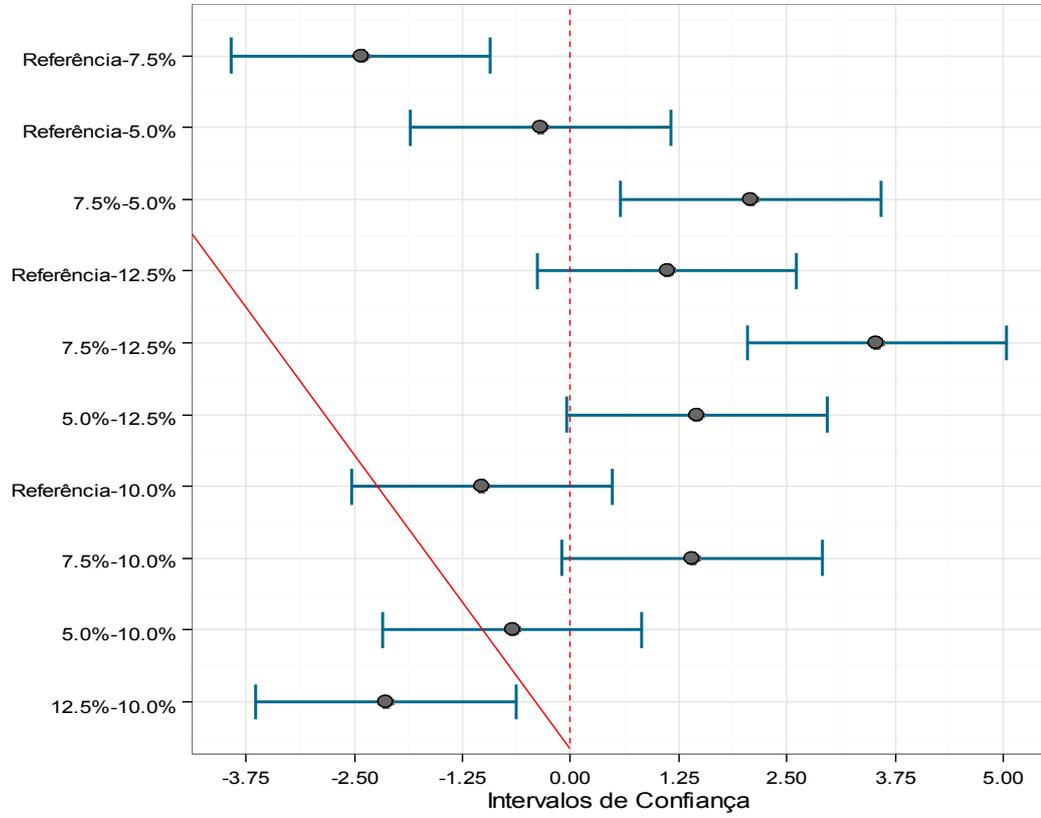


Figura 29 - Teste de Tukey da resistência aos 3 dias.
 Fonte: autor

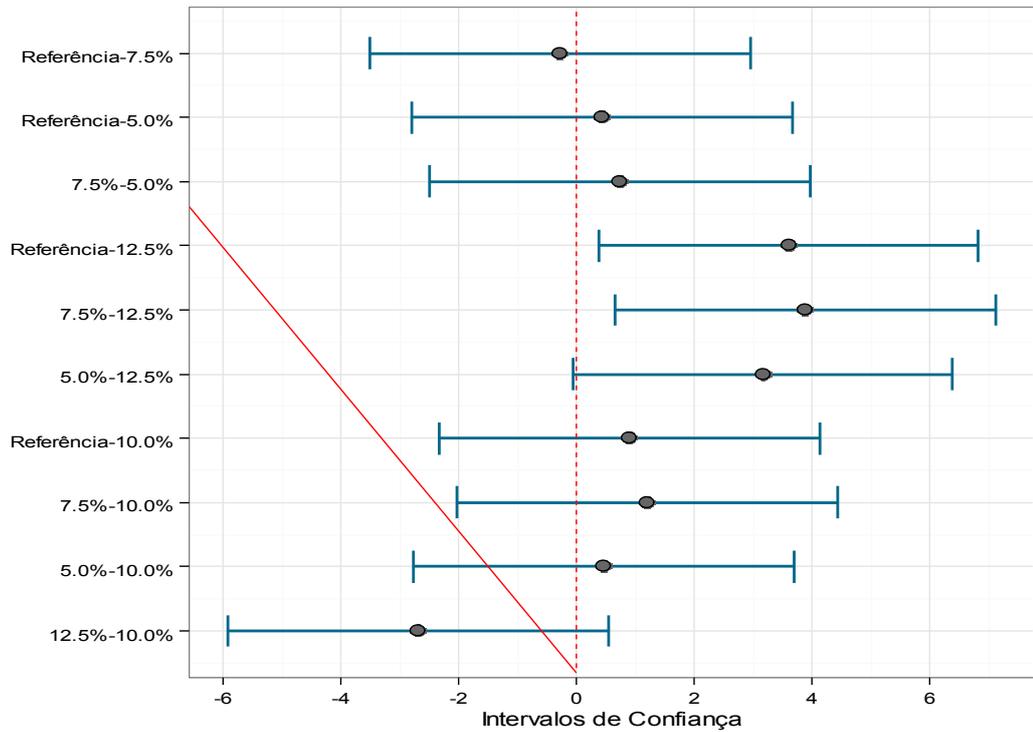


Figura 30– Teste de Tukey da resistência aos 7 dias.
 Fonte: autor

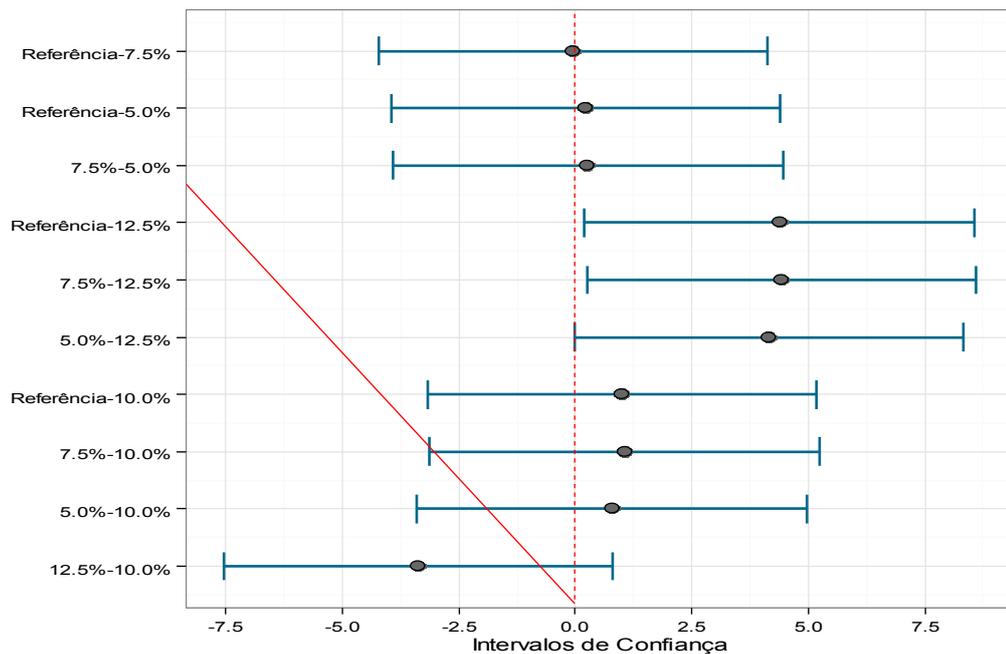


Figura 31– Teste de Tukey da resistência aos 28 dias.

Fonte: autor

Assim, conforme verificado no teste de Tukey (28 dias), é possível substituir até 10% do cimento por RBRO sem perda da resistência. Para a substituição superior a 10% do cimento pelo resíduo, o efeito de preenchimento de poros, proporcionado pelo RBRO, não foi suficiente para manter a resistência do concreto.

4.2 Resultados do comportamento físico

4.2.1 Absorção de água por capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade estão apresentados na Tabela 14, com seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação, e na Figura 32. No apêndice C estão apresentados os valores individuais de cada amostra avaliada. O ensaio demonstrou uma redução na taxa de absorção nos teores de substituição de 5 e 7,5%, sendo que esta última apresentou melhor desempenho (uma redução de 10%). Por outro lado, a substituição de 12,5% apresentou os piores resultados, onde ocorreu um aumento na taxa de absorção de 22,70%, o que corrobora com a escolha de não utilizar esse teor de substituição nos ensaios de durabilidade. Nesse teor de substituição o efeito cimentante demonstrou

ser preponderante em relação ao efeito filer, acarretando um aumento na taxa de absorção de água.

Tabela 14- Média dos resultados de absorção por capilaridade dos concretos estudados. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação.

Traço	Média da absorção por capilaridade (g/cm ²)	DP(g/cm ²)	CV(%)
Referência	1,088	0,050	4,61
5%	1,045	0,085	8,10
7,50%	0,989	0,034	3,47
10%	1,234	0,044	3,58
12,50%	1,335	0,027	2,01

Fonte: autor.

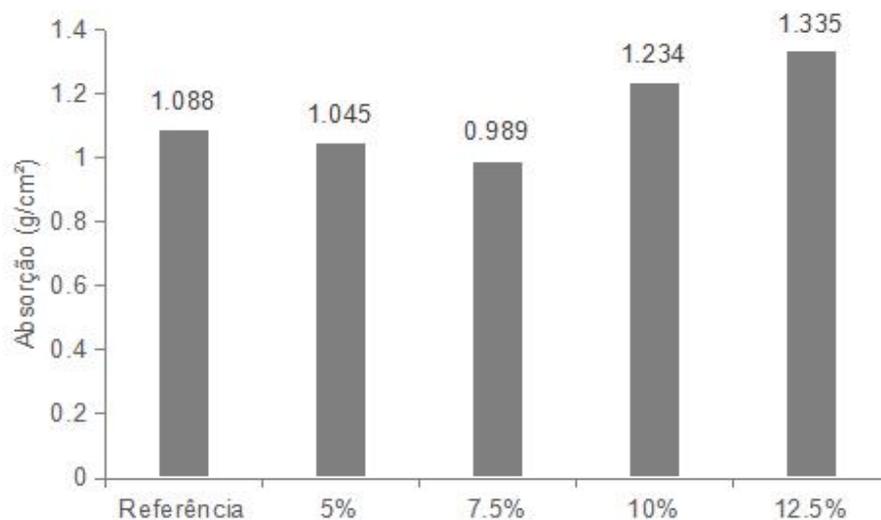


Figura 32– Absorção de água por capilaridade

Fonte: autor

Para melhor análise dos resultados de absorção de água por capilaridade, os valores obtidos no ensaio foram lançados no software SPSS 20.0, para avaliar os valores da absorção capilar entre o traço de referência e os traços com substituição de cimento pelo RBRO. Caso o p-valor seja inferior a 0,05 a variável teor de substituição é considerada como sendo significativa.

Através da ANOVA foi constatada a significância estatística da variável teor de substituição na absorção capilar. Na Tabela 15 está apresentada a análise de influência dos fatores, verificando-se que o teor de substituição possui efeito significativo sobre a absorção de água por capilaridade, indicado pelo p-valor abaixo do limite de 5%. Pode-se concluir, com base nas análises de variância, que a hipótese de as médias serem iguais foi rejeitada, e que o efeito da relação teor de substituição é significativo com um nível de confiabilidade de 95%.

Tabela 15- Resultado de Análise de Variância – valor p– da absorção por capilaridade

Fonte	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de Substituição	4	0,24421	0,06105	22,57819	5,42E-05
Resíduos	10	0,02704	0,00270		

Fonte: autor

Através do teste de Tukey, Figura 33, ficou constatado que os concretos com 10% e 12,5% de substituição do cimento pelo RBRO podem ser considerados estatisticamente diferentes do concreto de referência. Todos os outros teores de substituição não podem ser considerados estatisticamente diferentes do concreto de referência, com significância superior a 95%. Ou seja, a absorção de água dos concretos com 5% e 7,5% de substituição do cimento pelo RBRO é estatisticamente igual ao concreto de referência, indicando que esses concretos possuem o mesmo grau de qualidade em comparação ao concreto de referência.

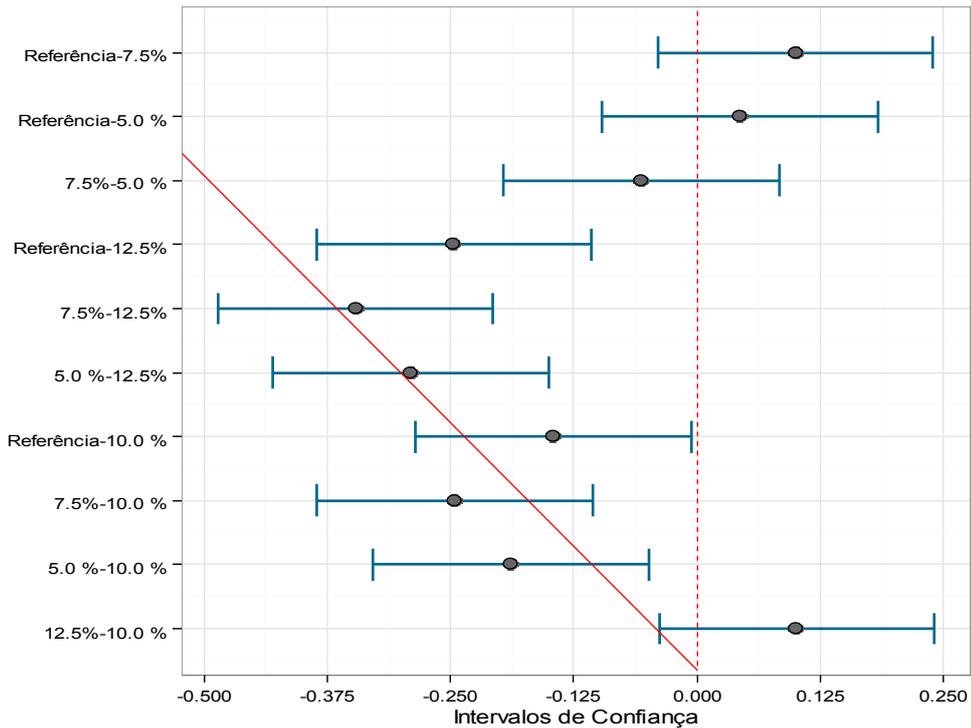


Figura 33- Teste de Tukey para a absorção por capilaridade
 Fonte: autor

Portanto, do ponto de vista da propriedade absorção de água por capilaridade, o teor de 7,5% de substituição seria o melhor a utilizar-se dentre os teores estudados, pois, consumiria a menor quantidade de cimento, gerando maior economia e menor impacto ambiental.

Essa redução da absorção é comprovada por Bacarji et al. (2013), que obtiveram resultados semelhantes. Os autores estudaram a absorção de água em concretos com relação água/cimento igual a 0,65 e substituição do cimento pelo RBRO em teores 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, sendo que os mesmos constataram que o teor de substituição de 5% não apresentou aumento da absorção de água de forma significativa. Já no teor de substituição de 10% o aumento foi significativo, corroborando com os dados obtidos neste estudo.

Para correlacionar os valores de absorção por capilaridade e resistência à compressão (28 dias) foi analisada a sortividade (Equação 2), conforme Figura 34. Sortividade é uma medida das forças de capilaridade exercidas pela estrutura dos poros causadas por fluídos, e também pode ser tratada por taxa de absorção.

$$S = V \div (A \times \sqrt{T}) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

S é a sortividade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$);

V é o volume de água absorvido no ensaio (em g);

A é a área de exposição da amostra à água (em cm^2);

T é o tempo de exposição (em horas).

Os resultados de sortividade são mostrados na Figura 34.

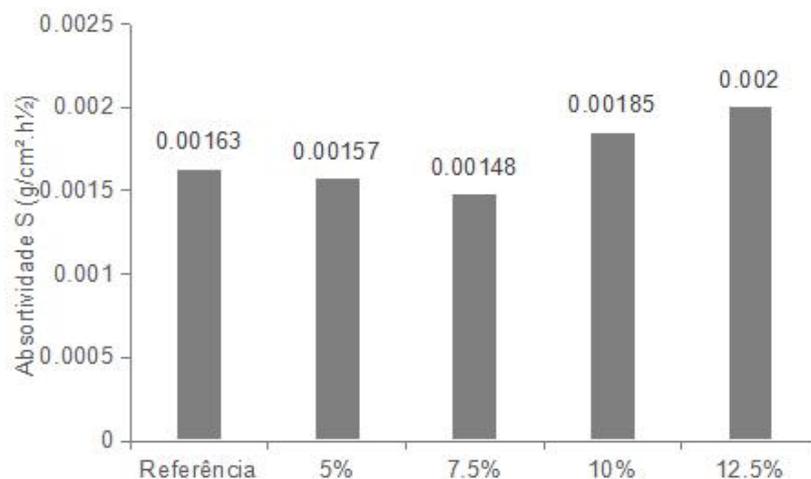


Figura 34- Absortividade das amostras com 72 horas
Fonte: autor

A Figura 35 apresenta uma correlação entre a resistência à compressão (28 dias) e a Absortividade.

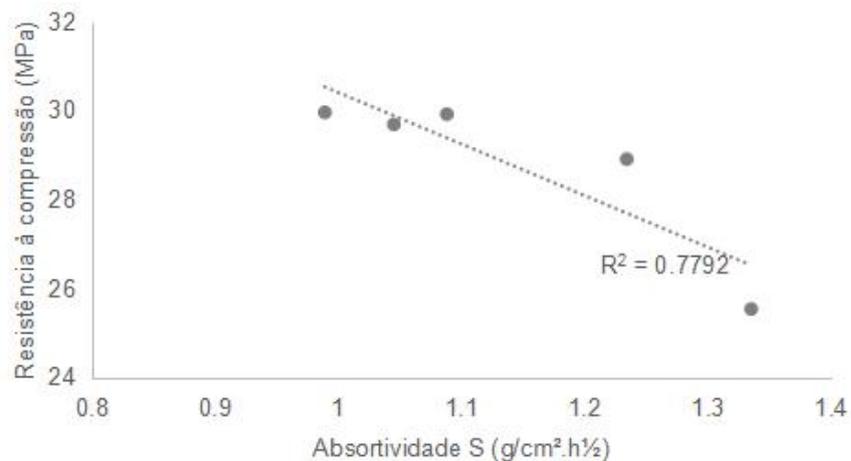


Figura 35 - Correlação entre a resistência à compressão (28 dias) e a absorvidade
 Fonte: autor

Através dos coeficientes de determinação R^2 apresentados é possível afirmar que existe uma forte correlação entre a absorvidade e a resistência à compressão, o que corrobora a análise sobre a porosidade do concreto, onde constatou-se que quanto maior a resistência à compressão menor a relação água/cimento, menor a porosidade e conseqüentemente a absorvidade.

Por fim, a Tabela 16 e a Figura 36 exprimem o resultado das alturas médias de ascensão capilar encontradas nos concretos após rompimento diametral do corpo de prova cilíndrico. Além disso, por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade, foi calculado o raio médio dos capilares do concreto, por meio da equação 3, com base nas leis de Jurin e Poiseuille (MENDES, 2009).

$$h = 120\sqrt{tr}$$

Equação 3

Em que:

h = altura de sucção (mm);

t = tempo (s);

r = raio do capilar (mm).

Tabela 16 - Altura de ascensão capilar e raio médio dos capilares

Traço	Altura de ascensão capilar(cm)	Raio médio dos capilares
Referência	5,5	$8,10 \times 10^{-7}$
5%	5,0	$6,69 \times 10^{-7}$
7,5%	5,2	$7,24 \times 10^{-7}$
10%	8,0	$1,71 \times 10^{-6}$
12,5%	10,0	$2,67 \times 10^{-6}$

Fonte: autor

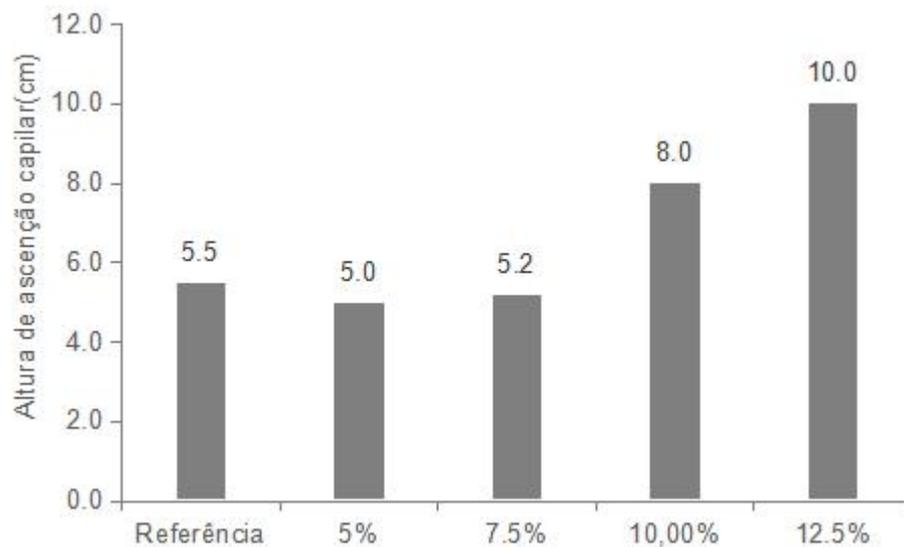


Figura 36 - Altura de ascensão capilar

Fonte: autor

A Figura 37 apresenta uma correlação entre a resistência à compressão (28 dias) e a altura de ascensão capilar.

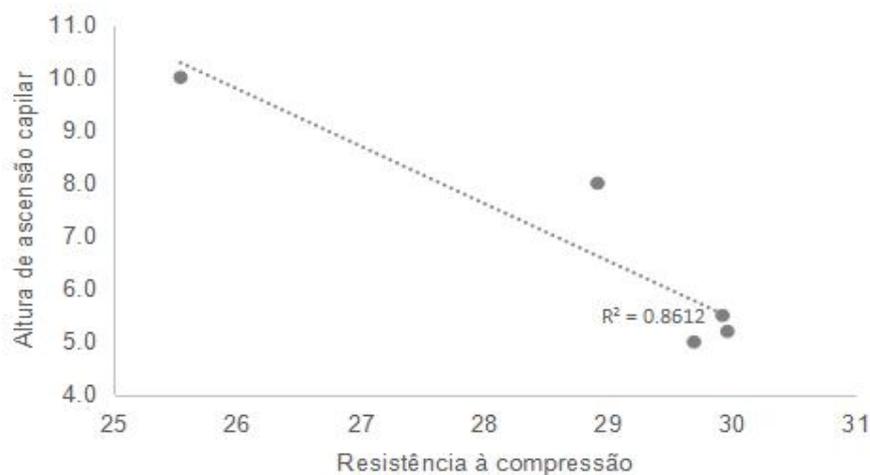


Figura 37- Correlação entre a resistência à compressão(28 dias) e a altura de ascensão capilar

Fonte: autor

A análise, apresentada na Figura 37, relacionou a altura de ascensão capilar em função da resistência à compressão, obtendo-se coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,86. Esses valores indicam que a altura de ascensão capilar apresenta uma grande dependência da resistência à compressão.

4.2.2 Absorção de água por imersão

Os resultados de absorção de água por imersão e índices de vazios são mostrados na Tabela 17, com seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação. Na Figura 38 está mostrada a relação obtida entre a absorção por imersão e as porcentagens de substituição, sendo que no apêndice D são apresentados os valores individuais de cada amostra avaliada.

Tabela 17 - Média dos resultados de absorção por imersão e índice de vazios dos concretos estudados. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação, em %.

Traço	Média da absorção por imersão (%)	DP (%)	CV (%)	Índice de vazios (%)	DP (%)	CV (%)
Referência	6,22	0,050	0,80	12,78	0,680	5,321
5%	6,64	0,001	0,02	13,73	0,260	1,894
7,50%	6,00	0,001	0,01	12,62	0,100	0,792
10%	6,85	0,001	0,01	13,88	0,080	0,576
12,50%	7,10	0,002	0,03	14,05	0,003	0,024

Fonte: autor.

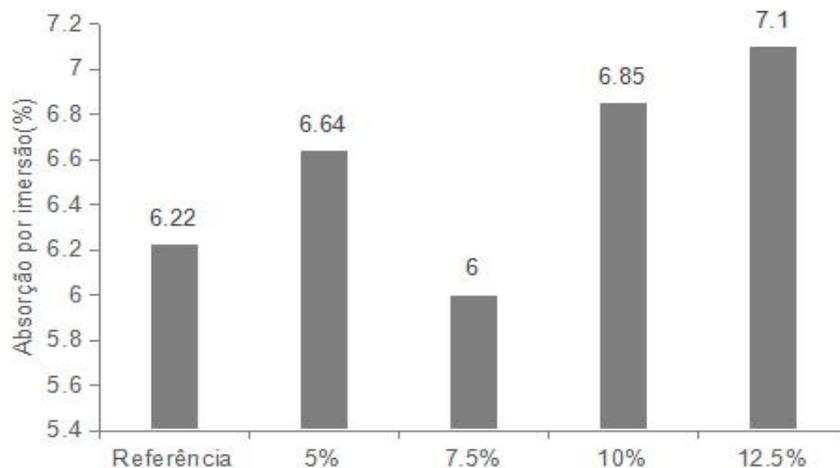


Figura 38– Absorção de água por imersão
Fonte: Autor

Através da ANOVA foi constatada a significância estatística da variável teor de substituição na absorção por imersão. Na Tabela 18 está apresentada a análise de influência dos fatores, onde pode ser verificado que o teor de substituição possui efeito significativo sobre a absorção de água por imersão, indicado pelo p-valor de 0,3956%, inferior à 5%. Pode-se concluir com base nas análises de variância, que a hipótese de as médias serem iguais foi rejeitada, e que os efeitos da relação teor de substituição são significantes ao nível de confiança de 95%.

Tabela 18- Resultado de Análise de Variância – valor p– da absorção por imersão

Fonte	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	4	3,80880	0,95220	7,84130	0,00395
Resíduos	10	1,21000	0,12140		

Fonte: autor

Sendo assim, foi necessário identificar entre quais teores de substituição apresentaram-se as diferenças. Para tanto, o teste de Tukey foi aplicado, identificando-se que a utilização de até 10% de substituição do cimento pelo RBRO apresentou similaridade com o concreto de referência, conforme Figura 39. Dessa forma, conforme verificado no teste de Tukey é possível substituir até 10% do cimento por RBRO sem aumento da absorção de água por imersão.

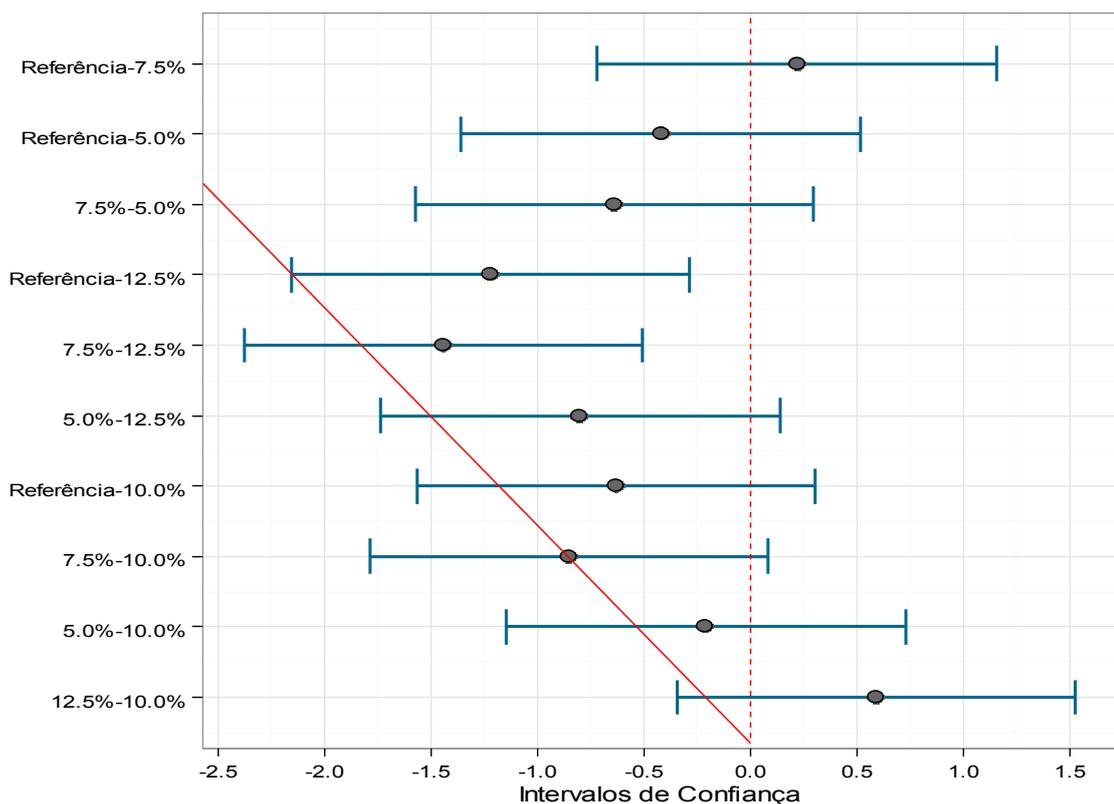


Figura 39 – Teste de Tukey para a absorção de água por imersão
Fonte: autor

Desse modo, do ponto de vista da propriedade absorção de água por imersão, o teor de 10% de substituição seria o melhor para utilizar-se dentre os teores estudados, pois, consumiria a menor quantidade de cimento, gerando maior economia e menor impacto ambiental. Este resultado de absorção de água por imersão ajuda a explicar a queda na resistência à compressão do concreto com 12,5% de substituição.

Do mesmo modo, Negrodo (2018) investigou o comportamento de concretos com substituição parcial do cimento por RBRO em teores que variam entre 5% e 15%, investigando a absorção por imersão dos concretos. O autor concluiu que a substituição do RBRO pelo cimento não demonstrou diferenças estaticamente significativa em relação ao concreto de referência em todos os teores de substituição estudados.

Helene (1983) apresenta uma classificação para os concretos em relação aos valores de índice de vazios e absorção de água por imersão. Com base nessa classificação, todos os concretos estudados foram considerados com desempenho deficiente em relação à absorção de água por imersão e com desempenho normal em relação ao índice de vazios, cabendo ressaltar que essa classificação é bastante conservadora e utilizada em ambientes agressivos. Uma vez que na pesquisa foi utilizada um fator a/c de 0,60, era de se esperar que a absorção por imersão fosse classificada como de qualidade deficiente.

A Figura 40 apresenta uma correlação entre a resistência à compressão e a absorção por imersão.

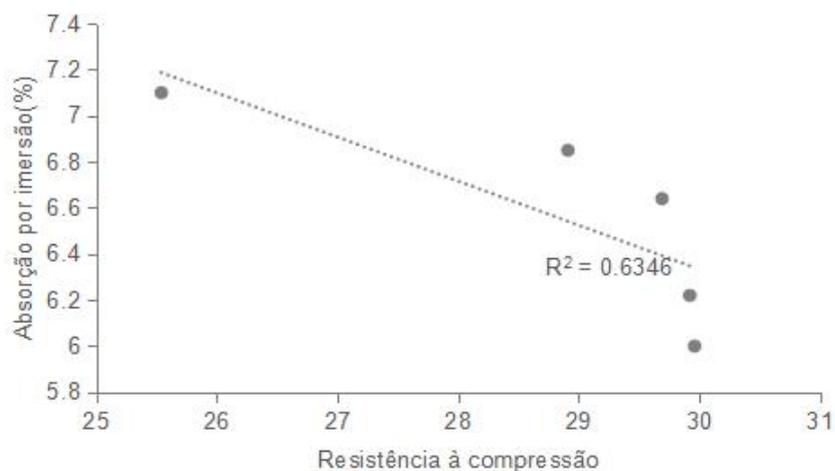


Figura 40- Correlação entre a resistência à compressão e a absorção por imersão
Fonte: autor

A análise, apresentada na Figura 40, relacionou a absorção por imersão em função da resistência à compressão, obtendo-se coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,6346. Os valores de R^2 indicam que a absorção por imersão apresenta uma dependência satisfatória da resistência à compressão.

A Figura 41 apresenta uma correlação entre a absorção por capilaridade e a absorção por imersão.

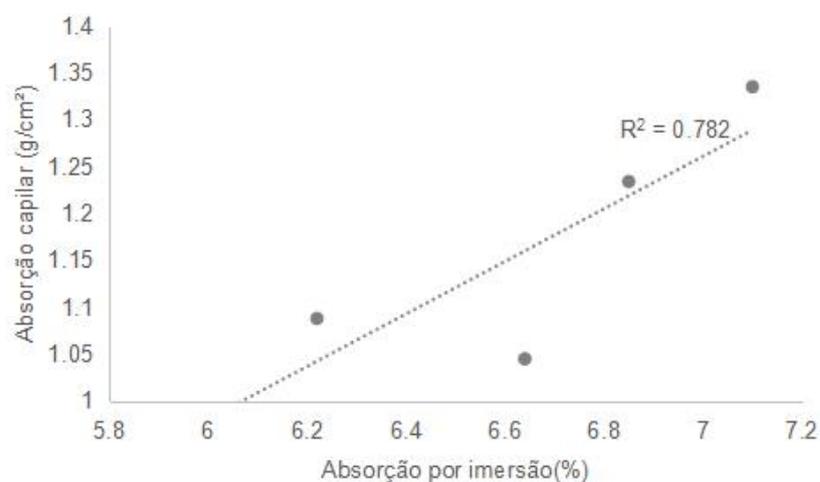


Figura 41 – Correlação entre a absorção por imersão e capilaridade
Fonte: autor

Através dos coeficientes de determinação R^2 apresentados é possível afirmar que existe uma forte correlação entre a absorção por imersão e a absorção por capilaridade, visto que ambas tem relação com a porosidade do concreto.

4.3 Resultados dos ensaios durabilidade

Os ensaios descritos a seguir são em ambiente de laboratório e em ambiente natural, nas cidades de Pelotas/RS e Rio Grande/RS.

4.3.1 Penetração de cloretos em ambiente de laboratório

Os valores obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto por imersão em solução salina durante seis meses são mostrados na Tabela 19. No apêndice E estão apresentados os valores individuais de cada amostra avaliada. Fica

evidenciado que a substituição do cimento pelo RBRO promoveu uma redução na penetração de íons cloreto.

Tabela 19– Penetração de cloretos e coeficiente de penetração após 6 meses de imersão

Teor de substituição	Penetração de cloretos média (mm)	DP (mm)	CV (%)	k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$) médio
Referência	25,66	2,06	8,06%	5,247
5,0%	23,99	2,89	12,09%	4,905
7,50%	23,013	1,31	5,73%	4,706
10,0%	25,158	1,04	4,14%	5,144

Fonte: autor.

Constatou-se que a utilização do RBRO dessa pesquisa promoveu uma leve redução da penetração de cloretos, conforme constatado nas pesquisas de Ramos et al. (2013), Rana, Kalla e Csetenyi (2015), Dietrich (2015) e Mittri (2016). Segundo os autores, a redução nos valores pode ser explicada pela formação de cloroaluminatos, provenientes da combinação da alumina (Al_2O_3), presente no resíduo, com os íons cloreto, formando o sal de Friedel (C-A-H) e pelo efeito filer (efeito de preenchimento dos poros) na microestrutura do concreto.

A Figura 42 demonstra a penetração de íons cloreto após seis meses de imersão em solução salina.



Figura 42 – Penetração de íons cloreto após 6 meses de imersão

Fonte: autor

A fim de investigar se a variável teor de substituição teve influência sobre a penetração de íons cloreto avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância. A análise de variância (ANOVA) da penetração de íons cloreto, Tabela 20, obteve um p-valor = 0,27340, indicando que o teor de substituição cimentícia pelo RBRO não exerceu influência significativa nos resultados dessa propriedade. Ou

seja, ao substituir-se até 10% de cimento Portland por RBRO, a penetração de íons cloreto nos concretos não sofre alterações estatisticamente significativas.

Tabela 20 - Resultado de Análise de Variância – valor p– da penetração de íons cloretos.

Fonte	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	3	17,04271	5,68090	1,46500	0,27340
Resíduos	12	46,53282	3,87773		

Fonte: autor.

Não foi possível realizar as medidas da penetração de íons cloreto com 12 meses de imersão em solução salina, pois nessa idade a penetração de íons cloreto ocorreu em toda a extensão do corpo de prova, devido a elevada relação água/cimento, conforme Figura 43.

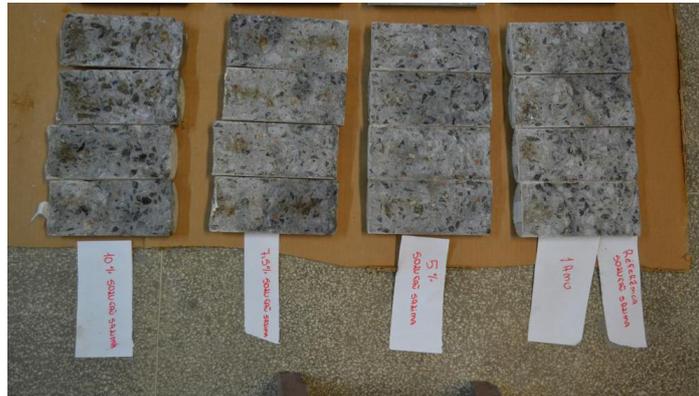


Figura 43– Penetração de Íons cloreto após 12 meses de imersão

Fonte: autor

4.3.2 Penetração de cloretos em ambiente natural

As profundidades de penetração de cloretos para as cidades de Pelotas, com seis meses de exposição, estão apresentadas na Tabela 21, sendo que no apêndice F estão apresentados os valores individuais de cada amostra avaliada.

Tabela 21 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Pelotas após 6 meses. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação.

Teor de substituição	Penetração de cloretos média (mm)	DP (mm)	CV (%)	k (mm/$\sqrt{\text{semana}}$) médio
Referência	3,95	0,12	3,27%	0,807
5%	3,77	0,06	1,71%	0,770
7,50%	3,81	0,09	2,40%	0,779
10%	3,90	0,02	0,68%	0,797

Fonte: autor.

As profundidades de penetração de cloretos para a cidade de Pelotas, com 12 meses de exposição, estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22– Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Pelotas após 12 meses. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação

Teor de substituição	Penetração de cloretos média(mm)	DP (mm)	CV (%)	k (mm/$\sqrt{\text{semana}}$) médio
Referência	7,47	0,06	0,82%	1,078
5%	7,38	0,05	0,77%	1,065
7,50%	7,34	0,04	0,57%	1,059
10%	7,44	0,07	1,05%	1,073

Fonte: autor.

As profundidades de penetração de cloretos para a cidade de Rio Grande, com seis meses de exposição, estão apresentadas na Tabela 23 .

Tabela 23– Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Rio Grande após 6 meses de exposição. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação

Teor de substituição	Penetração de cloretos média(mm)	DP(mm)	CV (%)	k (mm/$\sqrt{\text{semana}}$) médio
Referência	7,94	0,042	0,53%	1,621
5%	7,85	0,021	0,28%	1,605
7,50%	7,81	0,012	0,17%	1,597
10%	7,84	0,031	0,40%	1,603

Fonte: autor.

As profundidades de penetração de cloretos para a cidade de Rio Grande, com 12 meses de exposição, estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Média dos resultados de penetração de íons cloreto de corpos de prova em exposição natural na cidade de Rio Grande após 12 meses de exposição. DP: Desvio-padrão, CV: Coeficiente de variação

Teor de substituição	Penetração de cloretos média(mm)	DP (mm)	CV (%)	k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$) médio
Referência	10,44	0,076	0,72%	1,506
5%	10,36	0,050	0,48%	1,495
7.50%	10,35	0,025	0,24%	1,494
10%	10,40	0,013	0,12%	1,501

Fonte: autor.

Na Figura 44 são apresentados os corpos de prova após aspensão de AgNO_3 decorrido seis meses, sendo que na primeira coluna são os corpos de prova expostos na cidade de Pelotas, na coluna do meio são os corpos de prova expostos na cidade de Rio Grande e os da coluna da direita foram os colocados em solução salina em ambiente de laboratório.

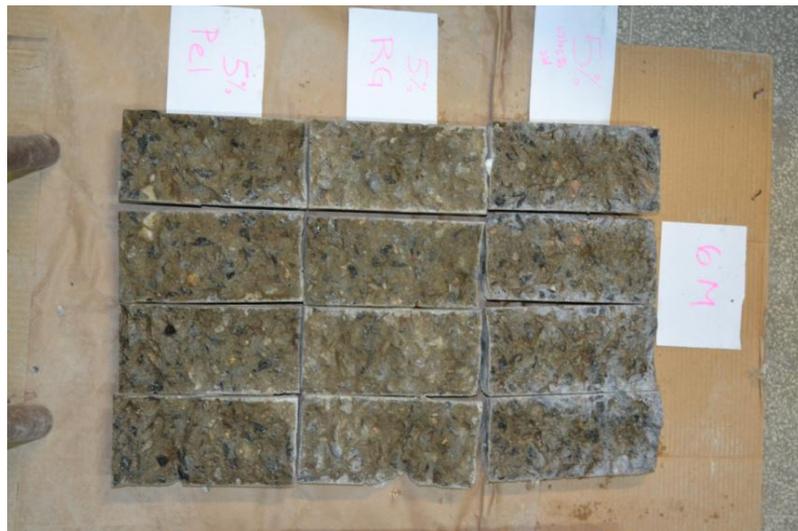


Figura 44– Penetração de íons cloreto após 6 meses de imersão

Fonte: autor

Na Figura 45 são apresentados os corpos de prova após aspensão de AgNO_3 decorrido 12 meses, sendo que na primeira coluna são os corpos de prova da solução salina em ambiente de laboratório, na coluna do meio são os corpos de prova expostos na cidade de Rio Grande e os da coluna da direita foram os expostos em Pelotas.



Figura 45 – Penetração de íons cloreto após 12 meses de exposição natural e imersão em solução salina
 Fonte: autor

As profundidades de penetração de cloretos para as cidades de Pelotas e Rio Grande, ao longo do tempo, estão apresentadas na Figura 46.

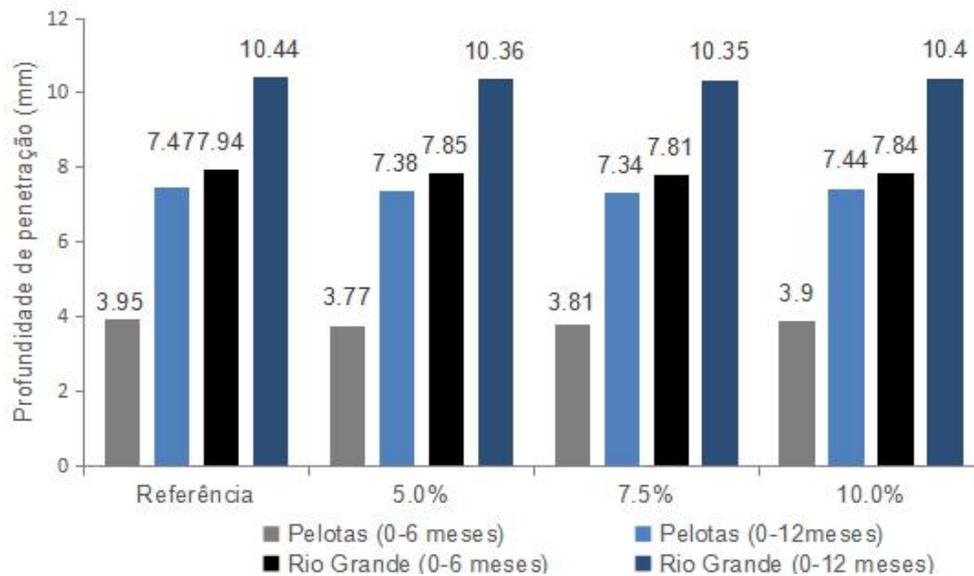


Figura 46– Penetração de íons cloreto ao longo do tempo nas duas cidades.
 Fonte: autor

Para melhor análise dos resultados de penetração de íons cloreto em ambiente natural, os valores obtidos no ensaio foram lançados no software SPSS 20.0, para avaliar os valores da penetração entre o traço de referência e os traços com substituição de cimento pelo RBRO. Ainda foram introduzidos na análise estatística o fator tempo e local de exposição para averiguação se esses fatores independentes e/ou interagidos apresentariam diferenças estatísticas para a análise dos valores obtidos na penetração de íons cloreto em ambiente natural. Através da ANOVA foi possível identificar quais variáveis exerceram influência na profundidade

de penetração de cloretos dos corpos de prova em exposição natural nas cidades de Pelotas e Rio Grande.

Para verificar quais variáveis diferem entre si, relativamente à profundidade de cloretos, estas foram analisadas isoladamente. Assim, considerando somente a variável independente “teor de substituição”, obteve-se um p-valor = 0,7343, conforme demonstra a Tabela 25, confirmando que o teor de substituição cimentícia pelo RBRO não exerceu influência significativa nos resultados dessa propriedade. Ou seja, ao substituir até 10% de cimento Portland por RBRO, a penetração de íons cloreto nos concretos não sofreu alterações estatisticamente significativas.

Tabela 25- Resultado de Análise de Variância – valor p– da penetração de íons cloreto.

Fonte	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	3	0,14970	0,04991	0,42730	0,73430
Tempo	1	129,96940	129,96941	1112,68640	7,31959E ⁻³⁵
Local de exposição	1	205,24810	205,2481	1757,15830	1,81174E ⁻³⁹
Teor de substituição x Tempo	3	0,29550	0,09850	0,84350	0,47680
Teor de substituição x Local de exposição	3	0,33650	0,11210	0,96040	0,41907
Tempo x Local de exposição	1	5,30080	5,30081	45,38160	1,8642E ⁻⁰⁸
Teor de substituição x Tempo x Local de exposição	3	0,23550	0,07850	0,67220	0,57320
Resíduos	48	5,60673	0,11680		

Fonte: autor

Considerando somente a variável independente “tempo”, a análise demonstrou que possui diferença significativa entre as médias das profundidades de cloretos para todos os tempos analisados, conforme demonstra a Tabela 25. Portanto, o tempo é uma variável que interfere significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos, o que pode ser compreendido visto que quanto maior o tempo exposto, maior a chance de o agente agressivo penetrar nos poros do concreto. Assim, a hipótese de médias iguais nas profundidades de penetração cloretos pode ser rejeitada, indicando que esta sofre influência da variável tempo ($p < 0,05$) para todas as análises.

Já considerando a variável independente “local de exposição”, a análise demonstrou que possui diferença significativa entre as médias das profundidades de cloretos entre as duas cidades analisadas ($p < 0,05$), conforme demonstra a Tabela

25. Portanto, o local de exposição é uma variável que interfere significativamente nos resultados de penetração de cloretos. Todavia, fica a dúvida se essa menor penetração de íons cloreto ocorreu devido as diferentes características de exposição dos corpos de prova, ou em função da diferença de agressividade ambiental entre as cidades analisadas.

A Tabela 26 apresenta a profundidade de penetração de íons cloreto e as condições climáticas: quantitativo acumulado de precipitação, umidade relativa, temperatura máxima, média e mínima na cidade de Rio Grande nos 2 períodos analisados.

Tabela 26 - Variações de penetração de cloretos com as condições climáticas na cidade de Rio Grande

Período	Teor de substituição (%)	Umidade Relativa media (%)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitação acumulada (mm)	Profundidade de penetração em cada período
1° período	0,0%	73,08	18,98	25,41	14,85	417,8	7,94
	5,0%						7,85
	7,5%						7,81
	10,0%						7,84
2° período	0,0%	76,44	19,14	23,09	15,59	858,2	2,50
	5,0%						2,51
	7,5%						2,54
	10,0%						2,56

Fonte: autor

Avaliando o primeiro período (0-6meses) na cidade de Rio Grande:

- Foi o período com maior penetração de íons cloreto;
- Foi o período com menor precipitação e maior temperatura máxima;
- Assim, sugere-se que uma redução na precipitação pode ter aumentado a concentração de cloretos na superfície do concreto, sendo estes absorvidos para seu interior. Dessa forma, uma maior temperatura acabou por estimular maior mobilidade das moléculas, aumentando a velocidade da penetração dos íons cloreto, o que também foi observado nos trabalhos de Ferreira (2017) e Fortes(1995).

Fazendo-se uma análise do segundo período (6-12 meses):

- A variação da profundidade de penetração de íons cloreto em relação ao 1º período foi de 31,49%, 31,97%, 32,52% e 32,65% para os teores de substituição de 0%, 5%, 7,5% e 10%, respectivamente.
- Foi o período com menor taxa de penetração de íons cloreto;
- Foi o período com maior acúmulo de chuvas;
- Assim, sugere-se que o maior quantitativo de chuva ocasionou uma saturação dos poros, impossibilitando um maior avanço dos cloretos. Todavia, fica a dúvida se ocorreu esta saturação, ou a quantidade de cloretos presentes na atmosfera chegou no limite de penetração, o que também foi observado no trabalho de Ferreira (2017).

A Tabela 27 apresenta a profundidade de penetração de íons cloreto e as condições climáticas: quantitativo acumulado de precipitação, umidade relativa, temperatura máxima, média e mínima na cidade de Pelotas nos dois períodos analisados.

Tabela 27- Variações de penetração de cloretos com as condições climáticas na cidade de Pelotas

Período	Teor de substituição (%)	Umidade Relativa média (%)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitação acumulada (mm)	Profundidade de penetração em cada período
1º período	0,0%	85,13	18,85	23,72	13,98	652,8	3,95
	5,0%						3,77
	7,5%						3,81
	10,0%						3,90
2º período	0,0%	82,47	18,99	23,40	14,78	864,4	3,52
	5,0%						3,61
	7,5%						3,53
	10,0%						3,54

Fonte: autor

Avaliando o primeiro período (0-6 meses) na cidade de Pelotas:

- Foi o período com maior penetração de íons cloreto;
- Foi o período com menor precipitação;
- Foi o período com maior umidade relativa média (85,13%) e maior temperatura máxima média atingida, de 23,72°C;
- Assim, sugere-se que uma maior umidade auxiliou na absorção de água pelo concreto, facilitando a entrada de cloretos em seu interior, devido à

facilidade que o concreto tem em absorver a umidade do ambiente. A água nos poros funcionou como eletrólito, o que também foi observado nos trabalhos de Ferreira (2017) e Fortes (1995).

Ao fazer-se uma análise do segundo período (6-12 meses) constata-se:

- A variação da profundidade de penetração de íons cloreto em relação ao primeiro período foi de 89,11%, 95,76%, 92,65% e 90,77% para os teores de substituição de 0%, 5%, 7,5% e 10%, respectivamente;
- Foi o período com menor penetração de íons cloreto;
- Foi o período com menor umidade relativa e maior acúmulo de chuvas;
- Assim, sugere-se que o maior quantitativo de chuva provocou uma saturação dos poros, não permitindo o maior avanço dos cloretos. Dessa forma, a penetração dos mesmos no 2º período foi menor, o que também foi observado nos trabalhos de Ferreira (2017) e Fortes (1995).

Souza (2015) observou que foram encontrados em períodos de baixa precipitação valores elevados de íons cloreto em alguns locais desde a lagoa Mirim até a Lagoa dos Patos e valores de cloreto superior ao valor estabelecido pelo CONAMA para água doce em alguns pontos do canal do prolongamento da Avenida Bento Gonçalves.

De acordo com Ferreira (2017), a lagoa dos Patos, que circunda a cidade, possui épocas do ano que muda o estado da água doce para salgada, podendo ser uma explicação para a profundidade de penetração de íons cloreto constatada nos concretos.

4.4 Compilação de dados

No Quadro 5 é apresentada uma compilação dos resultados obtidos nesta dissertação.

Quadro 5 - Compilação dos resultados

Ensaio	Resultado	Teor ótimo de substituição do cimento pelo RBRO
Resistência à compressão	Não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas com teores de substituição de até 10% em comparação com o concreto de referência	10%
Absorção de água por capilaridade	Não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas com teores de substituição de até 7,5% em comparação com o concreto de referência	7,50%
Absorção de água por imersão	Não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas com teores de substituição de até 10% em comparação com o concreto de referência	10%
Penetração de íons cloreto em ambiente de laboratório	Não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas em todos os teores de substituição estudados em comparação com o concreto de referência	10%
Penetração de íons cloreto em ambiente natural	Não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas em todos os teores de substituição estudados em comparação com o concreto de referência	10%

Fonte: autor

Analisando os dados do Quadro 5 é possível observar que, com exceção do resultado obtido no ensaio de absorção de água por capilaridade, o teor ótimo de substituição obtido foi de 10%. Já o teor de substituição de 7,5% atendeu de forma simultânea todos os critérios estudados.

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados no capítulo anterior, pode-se realizar algumas considerações quanto à utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em substituição parcial ao cimento na produção de concretos estruturais, válidas dentro das condições adotadas pela presente pesquisa. Em seguida, a fim de facilitar a continuidade de estudos sobre o RBRO, são apresentadas algumas sugestões de temas para pesquisas futuras.

De uma maneira geral, pode-se constatar por meio do ensaio de resistência à compressão, que não ocorreram variações significativas nos resultados de resistência mecânica dos concretos com teores de substituição de até 10%. No ensaio de resistência à compressão, apenas no teor de 12,5%, observou-se uma queda do desempenho em função da não reatividade química do RBRO e do menor volume de cimento utilizado, formando menos silicatos de cálcio hidratados.

Foi constatado que a utilização da dimensão de partícula adotada na pesquisa para o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais de 21,91 μm foi relevante para promover ganhos positivos nas propriedades mecânicas, físicas e de resistência frente a penetração de íons cloreto.

No que tange a absorção de água por sucção capilar, a utilização do RBRO como substituto parcial ao cimento proporcionou uma redução da taxa de absorção de água para os teores de substituição de até 7,5%. A redução da absorção de água nesses teores pode ser atribuída possivelmente ao efeito filer provocado pelo RBRO no concreto e ao efeito da nucleação que proporcionou maior eficiência na hidratação, formando mais silicatos de cálcio hidratados e menos cristais de hidróxido de cálcio. Um decréscimo nos valores de absorção de água para o teor de substituição de até 7,5 % indica uma provável presença de um ponto ótimo do efeito filer do RBRO.

Não foram obtidas variações significativas em relação à absorção de água por imersão para teores de substituição de até 10%, da mesma forma que no ensaio de absorção por capilaridade o teor de substituição de 7,5 % demonstrou o melhor

comportamento, nesse teor de substituição ocorreu a menor taxa de absorção de água.

O RBRO se mostrou eficiente ao refinar os poros do concreto para teores de substituição de até 10%, nesse teor o RBRO funcionou como filer e agente de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação ao ser incorporado no concreto, sendo o teor de substituição de 7,5% o que obteve os melhores resultados nos ensaios mecânicos, físicos e de durabilidade. Já para o teor de substituição de 12,5%, o efeito filer não foi capaz de compensar a falta de silicatos de cálcio hidratado, em função da substituição do cimento pelo resíduo.

Os resultados demonstram que quanto maior o teor de resíduo, menor a resistência à compressão e maior a taxa de absorção de água. Todavia mantém valores de resistência e absorção de água que possibilitam o seu uso como concreto estrutural. Os resultados do estudo demonstram que a substituição parcial do aglomerante por RBRO é viável na produção de concretos para fins estruturais.

No ensaio de penetração de íons cloretos em ambiente natural e de laboratório não foram obtidas variações estatisticamente significativas para os diferentes teores de substituição do cimento pelo RBRO em relação ao traço de referência. O teor de substituição de 7,5 % apresentou a menor penetração de íons cloretos e é condizente com a redução da absorção capilar e absorção por imersão.

Também, formulando uma resposta à hipótese do trabalho, concluiu-se que a substituição parcial de até 7,5% do cimento pelo RBRO produziu um material que se comportou de forma semelhante ao concreto de referência, atendendo simultaneamente os critérios de resistência mecânica, absorção de água e penetração de íons cloreto, proporcionando um uso sustentável ao resíduo que seria descartado no meio ambiente.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Desta pesquisa, podem ser deixadas sugestões para trabalhos futuros conforme segue:

- Análise da viabilidade econômica da fabricação de cimento Portland com a substituição parcial do clínquer pelo RBRO;

- Propõe-se que sejam realizados estudos envolvendo os efeitos da reação álcali-agregado e ataque por sulfatos em concreto com substituição parcial do cimento pelo RBRO;
- Ensaio no concreto com substituição parcial do cimento pelo RBRO, quanto à permeabilidade ao oxigênio, técnicas eletroquímicas para probabilidade de corrosão de armaduras;
- Estudar a penetração de íons cloreto em concretos com aglomerante álcali-ativado do resíduo do granito;
- Estudar a influência da substituição parcial do aglomerante pelo resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente e seu efeito nas propriedades de durabilidade do concreto.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: 1996. Concreto** - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 5738: 2003.** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

_____. **NBR 15116: 2004.** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR NM 45: 2006.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 53: 2006.** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739: 2007.** Concreto – Ensaio de compressão com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 8953: 2009.** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 52: 2009.** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 15575-1: 2013.** Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 6118: 2014.** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 12653: 2014.** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro:

ABNT, 2014.

_____. **NBR 12655: 2015**. Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Exportações e Importações Brasileiras de Rochas. **ABIROCHAS**, 2017. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/estatisticas.php>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice Part 1 – 1991**. Materials and General Properties of Concrete, Committee 222. Detroit, Michigan, 1991.

ADAMATTI, Deise Santos et al. Análise do desempenho de espaçadores no concreto através da corrosão por íons cloreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 3, n. 2, p. 3-15, 2016.

AGRA, Tiago Manoel da Silva. Difusão de íons cloreto em concretos com cimentos de escória de alto-forno e pozolânico. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, p. 1-6, 2017.

ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. B. D.; AUDA, A. E. M. Re-Use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 28-41, 2014.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção** – Normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: PINI, 2012.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C 1202. In: _____. **Annual book of ASTM Standards**. West Conshohocken: ASTM, 2005.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T259-80**: Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, D.C.: AASHTO, 1980.

ANDRADE, M. D. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742. 1993.

ANDRADE, J. J. O. Vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. V. 2. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 923-951.

ÅRSKOG, V.; GJØRV, O. E. **Slag Cements and Frost Resistance**, Report BML200702. Trondheim (in Norwegian): Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology – NTNU, 2007.

ASHISH, D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. **Journal of Building Engineering**, v. 15, set. 2017, p. 236-242, 2018.

BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.

BAKKER, R. M. F. Initiation period. In: SCHIESS, P. **Corrosion of steel in concrete**. London: Chapman and Hall, 1988. p. 22-55.

BARROS, Pedro Gustavo dos Santos. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BORBA JÚNIOR, José Carlos. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. 2011. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão das armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

CHALEE, W. et al. Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. **Construction and Building Materials**, p. 965-971, 2007.

CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structures**, v. 22, p. 341-353, 2009.

CHEEWAKET, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. **Construction and Building Materials**, p. 693-698, 2012.

CRAUSS, Camila. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

DASAR, A.; et al. Deterioration progress and performance reduction of 40-years-old reinforced concrete beams in natural corrosion environments. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 690-704, 2017.

DEGEN, M. K. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT)**. 2017. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

DEMIREL, B.; ALYAMAÇ, K. E. Waste marble powder/dust. **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**, p. 181-197, 2018.

DIAB, Ahmed M.; ELYAMANY, Hafez E.; ELMOTY, Abd Elmoty M. Abd. Effect of mix proportions, seawater curing medium and applied voltages on corrosion resistance of concrete incorporating mineral admixtures. **Alexandria Engineering Journal**, v. 50, n. 1, p. 65-78, 2011.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 2015. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

DIETRICH, Y. P.; TELES, C. R.; VIEIRA, G. L. Mechanical performance and reinforcement steel corrosion process in concrete containing ornamental rock waste. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, p. 14, 2017.

DOTTO, M. R. J. **Boletim Técnico Cimento Itambé**. Agosto de 2012.

DYER, Thomas. **Concrete Durability**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

ELMOATY, A. E. M. A. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743-752, 2013.

ERDEM, S.; BLANKSON, M. A. Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 264, p.403-410, 2014.

ERGÜN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 806-812, 2011.

EPA - Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). **EPA**, 2015. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ozone-pollution/2015-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-ozone>>. Acesso em: 04 nov. 2017.

FARAHANI, Atiye; TAGHADDOS, Hosein; SHEKARCHI, Mohammad. Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 10-17, 2015.

FERREIRA, Carina Farias. **Validação de modelos de penetração de cloretos e CO_2 em concreto na cidade de Pelotas/RS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

FIGUEIREDO, C. P. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014.

GHORBANI, Saeid; TAJI, Iman; TAVAKKOLIZADEH, Mohammadreza; DAVODI, Ali; BRITO, Jorge. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110-119, 2018.

GHORBANI, Saeid; TAJI, Iman; BRITO, Jorge; NEGAHBAN, Mohammadamin; GHORBANI, Sahar; TAVAKKOLIZADEH, Mohammadreza; DAVOODI, Ali. Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 143-152, 2019.

GJØRV, Odd E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 135p. (Dissertação de Mestrado).

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo - PCC/USP, São Paulo, 2000.

HASHOLT, Marianne Tange; JENSEN, Ole Mejlhede. Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 290-297, 2015.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. **Hormigón, AATH**, n. 10, p. 25-35, 1983.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão e armaduras de concreto armado**. 1993. 231f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 318f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOUSE, T. R. I. I. A. Illegal logging and related trade: indicators of the Global Response. **Chatam House**, 2018. Disponível em: <<https://www.chathamhouse.org/publications/papers/view/109398>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

ISTEITA, Moad; XI, Yunping. The effect of temperature variation on chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 73-82, 2017.

JINPING, Chen; XUESONG, Zhang. The Study on the Durability of the Concrete Structure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-PRODUCT E-SERVICE AND

E-ENTERTAINMENT, 2010.

KHODABAKHSHIAN, Ali; BRITO, Jorge; GHALEHNOVI, Mansour; ASADI SHAMSABADI, Elyas. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 237-251, 2018.

KLEIN, Nayara Soares. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

KOCKAL, N. U. Effects of Elevated Temperature and Re-Curing. **Transactions of Civil Engineering**, v. 37, n. C1, p. 67-76, 2013.

MALHOTRA, V. M. Making Concrete "Greener" With Fly-Ash. **Concrete International**, v. 21, n. 5, p. 61-66, 1999.

MARIC, M. K.; et al. Service life prediction of concrete structures in marine environment – case study: Maslenica Motorway Bridge. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS FOR SUSTAINABLE FUTURE, Zadar, p. 1–10, 2017.

MAZER, W. **Metodologia para a previsão da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado utilizando lógica difusa**. 2009. 237f. Tese (Doutorado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. et al. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. **Environment, Development and Sustainability**, v. 17, p. 1103-1119, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. et al. Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro-Brasil. In: CINPAR, VI CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, Córdoba, 2010

_____; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto** – Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 773-808.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**. Microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIRA, G. R. et al. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.

MENDES, Marcus Vinícius Araújo da Silva. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. 2009. 201f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2009.

MITTRI, S. H. M. **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) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MONTANI, C.; ABIROCHAS. **XXVIII World Marble and Stones Report**. Verona, 2017.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos**. 1996. 165f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MUNIR, M. J.; KAZMI, S. M. S.; WU, Y. F. Efficiency of waste marble powder in controlling alkali–silica reaction of concrete: A sustainable approach. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 590-599, 2017.

NEGREDO, A. S. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. 219f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

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

_____. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. São Paulo: Pini, 2015.

NT Build 492 - NORDTEST METHOD. **Concrete, mortar and cement-based repair materials**: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 2000.

OSSORIO, Anile; LORENZO, Raydel. Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 72, p. 161-172, 2014.

PETRY, Natália dos Santos; DELONGUI, Lucas; MULLER, Álvaro Luiz; MASUERO, Angela Borges; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 6, p. 71-92, 2017.

PINTO, S. A. **Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso da microssilica na durabilidade do concreto armado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

RAMOS, T. et al. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1001-1009, 2013.

RANA, A.; KALLA, P.; CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete. **J. Clean. Prod.**, v. 94, p. 304e311, 2015.

REAL, Sofia; BOGAS, José Alexandre. Chloride ingress into structural lightweight aggregate concrete in real marine environment. **Marine Structures**, v. 61, p. 170-187, 2018.

RIBEIRO, Daniel Verás. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, Daniel Verás. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D. V. (org.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Verás; CASCUDO, Oswaldo. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: RIBEIRO, D. V. (org.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª ed. Rio de Janeiro:

Elsevier, 2018.

RIZZON, A. C. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco**. 2006. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais, ULBRA, 2006.

RODRIGUES, R.; DE BRITO, J.; SARDINHA, M. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 349-356, 2015.

RODRIGUES, M. A. **Utilização dos resíduos de cortes de placas de mármore e granitos como adição na fabricação de concreto autoadensável**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

SACILOTO, Adriano Pedroso. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Minerais Submetidos a Diferentes Períodos de Cura**. 2005. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SATO, Aya GALINA, Simone V. R.; TEIXEIRA, Jamilla Emi S. L. Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 6, p. 1284-1307, 2018.

SILVA, Fernanda Giannotti da. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 172-182, 2016.

SINGH, M.; CHOUDHARY, K.; SRIVASTAVA, A.; SANGWAN, K. S.; BHUNIA, D. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 13, p. 87-95, 2017.

SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 471-488, 2017.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual. **SNIC**, 2015. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 21 mai. 2019.

SOUZA, Luiz Guilherme Meira; SANTOS, Natanaeyfle Randemberg; CAVALCANTE, Amanda Gonçalves; SOUZA, Luiz Guilherme Vieira Meira; COSTA, Larissa Caroline Fernandes. Composite utilizing residues of marble and granite for building popular homes. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 192-197, 2018.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 3ª Ed. São Paulo: Markon Books, 1993.

THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T.; SCOTT, A. C. N. Actual and modeled performance in a tidal zone. **Concrete International**, v. 33, p. 23-28, 2011.

TITI, Hani; TABATABAI, Habib. Effect of Coarse Aggregate Type on Chloride Ion Penetration in Concrete. **Construction and Building Materials**, 162C, p. 871-880, 2018.

TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. 2011. 186f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

_____. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado**. 2006.159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VALIPOUR, M. et al. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 63-70, 2013.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) results for concrete containing Mineral Admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, p. 221-232, 2000.

YILDIRIM, Hasan; ILICA, Tolga; SENGUL, Ozkan. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. *Construction and Building Materials*. **Constr Build Mater.**, v. 25, p. 1282-1288, 2011.

Apêndices

APÊNDICE A-1 - Dados meteorológicos da cidade de Rio Grande

Dia	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa Máxima(%)	Umidade Relativa mínima(%)	Umidade relativa Média (%)	Precipitação (mm)
23/01/2018	32,90	20,70	26,80	90,00	45,00	67,50	12.6
24/01/2018	29,70	20,40	25,05	90,00	47,00	68,50	0.00
25/01/2018	26,20	16,30	21,25	85,00	47,00	66,00	0.00
26/01/2018	26,10	20,90	23,50	64,00	45,00	54,50	0.00
27/01/2018	29,50	21,20	25,35	89,00	56,00	72,50	0.2
28/01/2018	29,50	22,80	26,15	89,00	58,00	73,50	0.00
29/01/2018	26,90	15,80	21,35	90,00	48,00	69,00	0.00
30/01/2018	27,90	21,60	24,75	83,00	56,00	69,50	0.00
31/01/2018	28,00	21,40	24,70	82,00	52,00	67,00	0.00
01/02/2018	28,00	20,80	24,40	74,00	52,00	63,00	0,000
02/02/2018	32,40	16,80	24,60	92,00	32,00	62,00	0,000
03/02/2018	27,30	17,50	22,40	88,00	46,00	67,00	0,200
04/02/2018	26,90	21,30	24,10	73,00	50,00	61,50	0,000
05/02/2018	28,20	21,50	24,85	79,00	52,00	65,50	0,000
06/02/2018	29,10	21,80	25,45	80,00	54,00	67,00	0.00
07/02/2018	28,90	21,60	25,25	84,00	62,00	73,00	0.00
08/02/2018	30,20	21,70	25,95	88,00	45,00	66,50	0.00
09/02/2018	32,80	20,80	26,80	90,00	49,00	69,50	29,000
10/02/2018	27,40	20,10	23,75	91,00	62,00	76,50	0,800
11/02/2018	24,40	19,70	22,05	82,00	47,00	64,50	2,400
12/02/2018	23,80	16,10	19,95	80,00	41,00	60,50	2,800
13/02/2018	24,90	11,10	18,00	89,00	47,00	68,00	0.00
14/02/2018	26,30	17,80	22,05	74,00	41,00	57,50	0.00
15/02/2018	26,80	20,60	23,70	74,00	50,00	62,00	0.00
16/02/2018	27,00	20,70	23,85	74,00	53,00	63,50	0.00
17/02/2018	28,30	20,30	24,30	83,00	40,00	61,50	0.00
18/02/2018	30,50	20,90	25,70	82,00	47,00	64,50	0.00
19/02/2018	32,50	22,40	27,45	89,00	43,00	66,00	0.00
20/02/2018	25,70	22,80	24,25	88,00	61,00	74,50	0,600
21/02/2018	28,70	19,40	24,05	92,00	47,00	69,50	8,000
22/02/2018	26,50	16,20	21,35	91,00	57,00	74,00	0,000
23/02/2018	27,20	13,50	20,35	91,00	57,00	74,00	0,800
24/02/2018	27,20	13,70	20,45	89,00	48,00	68,50	0,000
25/02/2018	27,60	16,90	22,25	91,00	55,00	73,00	0,000
26/02/2018	26,90	21,60	24,25	78,00	55,00	66,50	0,000

27/02/2018	28,50	18,00	23,25	90,00	55,00	72,50	19,200
28/02/2018	27,80	15,70	21,75	92,00	60,00	76,00	0,000
01/03/2018	29,10	21,90	25,50	88,00	56,00	72,00	0,000
02/03/2018	28,70	16,40	22,55	92,00	41,00	66,50	0,000
03/03/2018	28,70	16,70	22,70	92,00	56,00	74,00	0,000
04/03/2018	29,20	23,20	26,20	86,00	58,00	72,00	4,000
05/03/2018	29,10	19,70	24,40	91,00	59,00	75,00	0,000
06/03/2018	25,60	19,10	22,35	90,00	49,00	69,50	0,000
07/03/2018	25,80	13,40	19,60	87,00	45,00	66,00	0,000
08/03/2018	26,60	13,20	19,90	91,00	49,00	70,00	0,200
09/03/2018	27,10	14,10	20,60	90,00	51,00	70,50	0,000
10/03/2018	28,90	19,60	24,25	86,00	48,00	67,00	0,000
11/03/2018	29,50	19,10	24,30	90,00	48,00	69,00	2,400
12/03/2018	24,50	12,40	18,45	90,00	39,00	64,50	0,000
13/03/2018	27,30	12,10	19,70	91,00	25,00	58,00	0,000
14/03/2018	27,20	13,50	20,35	88,00	43,00	65,50	0,000
15/03/2018	27,10	16,50	21,80	90,00	35,00	62,50	0,000
16/03/2018	26,10	13,10	19,60	90,00	56,00	73,00	0,000
17/03/2018	26,90	19,20	23,05	88,00	55,00	71,50	1,000
18/03/2018	31,90	21,50	26,70	85,00	59,00	72,00	6,200
19/03/2018	24,30	16,40	20,35	89,00	41,00	65,00	1,600
20/03/2018	27,20	11,40	19,30	92,00	37,00	64,50	0,000
21/03/2018	23,70	12,90	18,30	88,00	53,00	70,50	0,000
22/03/2018	24,00	10,90	17,45	92,00	38,00	65,00	0,000
23/03/2018	26,40	18,00	22,20	83,00	60,00	71,50	0,000
24/03/2018	23,50	18,00	20,75	92,00	81,00	86,50	45,000
25/03/2018	23,30	16,20	19,75	91,00	60,00	75,50	1,000
26/03/2018	22,70	9,80	16,25	82,00	48,00	65,00	0,000
27/03/2018	24,70	19,90	22,30	77,00	53,00	65,00	0,000
28/03/2018	27,00	20,30	23,65	85,00	62,00	73,50	0,000
29/03/2018	27,20	19,60	23,40	91,00	60,00	75,50	0,000
30/03/2018	27,00	16,50	21,75	92,00	58,00	75,00	0,000
31/03/2018	25,40	18,20	21,80	92,00	75,00	83,50	0,000
01/04/2018	24,90	19,30	22,10	90,00	77,00	83,50	4,000
02/04/2018	25,30	19,00	22,15	91,00	70,00	80,50	20,400
03/04/2018	25,20	18,00	21,60	92,00	68,00	80,00	6,400
04/04/2018	25,20	15,40	20,30	93,00	59,00	76,00	0,200
05/04/2018	25,40	14,10	19,75	93,00	56,00	74,50	0,200
06/04/2018	26,00	14,20	20,10	93,00	60,00	76,50	0,000
07/04/2018	30,00	16,40	23,20	92,00	33,00	62,50	0,000
08/04/2018	26,60	19,00	22,80	91,00	65,00	78,00	0,000
09/04/2018	27,50	19,40	23,45	92,00	60,00	76,00	0,000
10/04/2018	28,50	22,30	25,40	88,00	58,00	73,00	0,000

11/04/2018	30,90	23,40	27,15	90,00	55,00	72,50	0,000
12/04/2018	34,00	20,20	27,10	90,00	45,00	67,50	8,600
13/04/2018	22,90	18,10	20,50	90,00	45,00	67,50	0,000
14/04/2018	24,10	18,80	21,45	62,00	42,00	52,00	0,000
15/04/2018	23,70	19,10	21,40	85,00	64,00	74,50	0,000
16/04/2018	25,80	16,80	21,30	87,00	52,00	69,50	0,000
17/04/2018	26,30	19,70	23,00	77,00	46,00	61,50	0,000
18/04/2018	28,80	16,30	22,55	92,00	39,00	65,50	0,000
19/04/2018	32,00	17,90	24,95	90,00	38,00	64,00	0,000
20/04/2018	31,90	18,90	25,40	89,00	44,00	66,50	4,000
21/04/2018	24,60	19,70	22,15	90,00	69,00	79,50	5,200
22/04/2018	24,70	19,10	21,90	91,00	75,00	83,00	5,800
23/04/2018	27,70	21,80	24,75	89,00	64,00	76,50	6,800
24/04/2018	25,80	20,70	23,25	92,00	71,00	81,50	0,000
25/04/2018	27,50	22,10	24,80	91,00	66,00	78,50	1,000
26/04/2018	25,70	18,60	22,15	92,00	66,00	79,00	0,200
27/04/2018	28,50	21,30	24,90	90,00	65,00	77,50	0,000
28/04/2018	28,10	20,30	24,20	92,00	70,00	81,00	0,000
29/04/2018	26,90	22,70	24,80	89,00	71,00	80,00	0,000
30/04/2018	24,00	18,80	21,40	92,00	69,00	80,50	14,800
01/05/2018	21,80	17,90	19,85	86,00	56,00	71,00	5,600
02/05/2018	22,00	19,00	20,50	89,00	62,00	75,50	9,200
03/05/2018	24,40	19,70	22,05	91,00	69,00	80,00	12,000
04/05/2018	22,30	16,50	19,40	92,00	79,00	85,50	0,600
05/05/2018	24,40	17,10	20,75	93,00	68,00	80,50	0,200
06/05/2018	24,20	19,80	22,00	85,00	60,00	72,50	0,200
07/05/2018	23,00	19,30	21,15	74,00	55,00	64,50	0,000
08/05/2018	25,40	19,30	22,35	77,00	56,00	66,50	0,000
09/05/2018	22,80	20,70	21,75	86,00	74,00	80,00	0,000
10/05/2018	25,00	19,80	22,40	91,00	66,00	78,50	1,000
11/05/2018	24,00	18,60	21,30	85,00	51,00	68,00	0,000
12/05/2018	20,80	11,90	16,35	89,00	40,00	64,50	0,000
13/05/2018	21,50	8,80	15,15	91,00	46,00	68,50	0,000
14/05/2018	22,50	12,10	17,30	91,00	58,00	74,50	0,000
15/05/2018	22,80	14,40	18,60	92,00	61,00	76,50	0,000
16/05/2018	18,80	9,50	14,15	90,00	57,00	73,50	0,000
17/05/2018	19,10	6,90	13,00	90,00	42,00	66,00	1,800
18/05/2018	16,50	11,00	13,75	88,00	67,00	77,50	5,200
19/05/2018	16,10	12,70	14,40	91,00	77,00	84,00	14,800
20/05/2018	19,10	9,70	14,40	90,00	66,00	78,00	3,200
21/05/2018	18,60	9,40	14,00	90,00	55,00	72,50	0,000
22/05/2018	17,60	8,10	12,85	91,00	44,00	67,50	0,000
23/05/2018	17,70	6,10	11,90	88,00	44,00	66,00	0,000

24/05/2018	18,60	6,30	12,45	85,00	45,00	65,00	0,000
25/05/2018	18,10	4,20	11,15	93,00	65,00	79,00	0,200
26/05/2018	20,10	8,80	14,45	92,00	63,00	77,50	0,000
27/05/2018	23,90	15,20	19,55	92,00	58,00	75,00	0,000
28/05/2018	24,70	16,90	20,80	89,00	57,00	73,00	0,000
30/05/2018	24,70	17,00	20,85	84,00	51,00	67,50	0,000
31/05/2018	18,80	16,30	17,55	92,00	83,00	87,50	2,600
01/06/2018	19,20	14,90	17,05	92,00	87,00	89,50	3,000
02/06/2018	15,10	10,60	12,85	91,00	60,00	75,50	1,600
03/06/2018	17,40	9,20	13,30	90,00	62,00	76,00	1,000
04/06/2018	19,20	9,80	14,50	93,00	53,00	73,00	0,600
05/06/2018	16,00	12,60	14,30	91,00	72,00	81,50	0,600
06/06/2018	13,90	7,30	10,60	91,00	51,00	71,00	0,200
07/06/2018	16,90	6,70	11,80	85,00	38,00	61,50	0,200
08/06/2018	15,60	5,20	10,40	84,00	49,00	66,50	0,200
09/06/2018	18,90	7,10	13,00	91,00	42,00	66,50	0,200
10/06/2018	17,80	14,20	16,00	91,00	57,00	74,00	0,200
11/06/2018	19,70	16,20	17,95	92,00	85,00	88,50	0,200
12/06/2018	17,30	13,00	15,15	91,00	77,00	84,00	0,400
13/06/2018	14,00	8,50	11,25	91,00	53,00	72,00	0,200
14/06/2018	12,80	4,80	8,80	87,00	53,00	70,00	0,000
15/06/2018	12,50	3,40	7,95	91,00	55,00	73,00	0,200
16/06/2018	14,00	2,70	8,35	91,00	72,00	81,50	0,000
17/06/2018	15,20	6,80	11,00	94,00	71,00	82,50	0,000
18/06/2018	14,20	4,00	9,10	94,00	62,00	78,00	0,200
19/06/2018	14,00	8,50	11,25	93,00	79,00	86,00	0,000
20/06/2018	23,00	7,80	15,40	94,00	49,00	71,50	0,000
21/06/2018	21,50	11,40	16,45	90,00	62,00	76,00	0,200
22/06/2018	14,90	5,20	10,05	90,00	31,00	60,50	0,000
23/06/2018	15,80	8,10	11,95	91,00	73,00	82,00	0,000
24/06/2018	13,40	7,60	10,50	88,00	51,00	69,50	0,200
25/06/2018	13,90	7,10	10,50	90,00	65,00	77,50	0,000
26/06/2018	16,70	5,20	10,95	93,00	42,00	67,50	0,000
27/06/2018	19,20	3,40	11,30	93,00	49,00	71,00	0,000
28/06/2018	12,70	8,50	10,60	94,00	87,00	90,50	0,000
29/06/2018	18,50	12,20	15,35	94,00	88,00	91,00	0,000
30/06/2018	18,90	11,70	15,30	94,00	78,00	86,00	0,000
01/07/2018	19,10	13,10	16,10	94,00	73,00	83,50	0,000
02/07/2018	17,80	12,40	15,10	93,00	82,00	87,50	0,000
03/07/2018	12,90	6,50	9,70	88,00	56,00	72,00	0,400
04/07/2018	11,60	4,70	8,15	85,00	59,00	72,00	0,400
05/07/2018	14,90	6,40	10,65	91,00	52,00	71,50	0,200
06/07/2018	15,70	12,20	13,95	89,00	74,00	81,50	2,000

07/07/2018	15,10	13,30	14,20	93,00	88,00	90,50	46,000
08/07/2018	15,80	12,20	14,00	92,00	81,00	86,50	1,200
09/07/2018	14,20	10,30	12,25	91,00	76,00	83,50	8,600
10/07/2018	15,60	8,90	12,25	92,00	70,00	81,00	0,000
11/07/2018	15,70	7,30	11,50	94,00	68,00	81,00	0,400
12/07/2018	13,70	8,10	10,90	93,00	87,00	90,00	0,000
13/07/2018	19,70	6,20	12,95	92,00	52,00	72,00	0,200
14/07/2018	20,10	7,80	13,95	93,00	59,00	76,00	0,200
15/07/2018	19,70	13,20	16,45	90,00	65,00	77,50	6,000
16/07/2018	15,80	12,20	14,00	92,00	68,00	80,00	9,600
17/07/2018	16,70	13,70	15,20	93,00	75,00	84,00	32,000
18/07/2018	19,50	15,60	17,55	93,00	84,00	88,50	22,000
19/07/2018	22,00	15,70	18,85	91,00	71,00	81,00	0,000
20/07/2018	19,80	10,80	15,30	91,00	79,00	85,00	6,000
21/07/2018	15,30	7,80	11,55	86,00	32,00	59,00	0,000
22/07/2018	14,30	4,80	9,55	93,00	60,00	76,50	0,000
23/07/2018	13,70	9,50	11,60	92,00	62,00	77,00	13,800
24/07/2018	15,50	9,00	12,25	83,00	63,00	73,00	0,000
25/07/2018	14,30	13,00	13,65	92,00	72,00	82,00	10,600
26/07/2018	17,10	13,70	15,40	92,00	87,00	89,50	40,000
27/07/2018	14,10	9,90	12,00	92,00	69,00	80,50	0,000
28/07/2018	14,10	9,10	11,60	93,00	81,00	87,00	26,200
29/07/2018	15,90	9,90	12,90	93,00	64,00	78,50	0,000
30/07/2018	15,70	9,40	12,55	91,00	52,00	71,50	0,200
31/07/2018	13,60	6,30	9,95	93,00	50,00	71,50	0,000
01/08/2018	14,40	3,30	8,85	92,00	59,00	75,50	0,200
02/08/2018	16,40	9,30	12,85	91,00	71,00	81,00	0,200
03/08/2018	16,50	13,30	14,90	92,00	84,00	88,00	0,000
04/08/2018	16,50	11,70	14,10	93,00	76,00	84,50	0,200
05/08/2018	14,30	9,10	11,70	91,00	58,00	74,50	0,000
06/08/2018	19,20	6,40	12,80	92,00	57,00	74,50	0,200
07/08/2018	18,30	10,60	14,45	94,00	54,00	74,00	0,000
08/08/2018	17,90	13,90	15,90	92,00	69,00	80,50	1,400
09/08/2018	14,60	9,30	11,95	91,00	61,00	76,00	2,400
10/08/2018	12,60	7,50	10,05	91,00	76,00	83,50	2,400
11/08/2018	17,70	11,30	14,50	93,00	80,00	86,50	2,200
12/08/2018	17,90	12,50	15,20	92,00	71,00	81,50	1,800
13/08/2018	20,00	13,80	16,90	92,00	67,00	79,50	0,400
14/08/2018	20,80	11,10	15,95	94,00	68,00	81,00	0,200
15/08/2018	15,20	9,10	12,15	92,00	63,00	77,50	0,000
16/08/2018	18,40	6,90	12,65	94,00	59,00	76,50	0,000
17/08/2018	19,70	12,60	16,15	89,00	61,00	75,00	0,000
18/08/2018	19,70	14,00	16,85	90,00	63,00	76,50	0,000

19/08/2018	16,90	9,50	13,20	92,00	65,00	78,50	0,000
20/08/2018	13,50	7,10	10,30	92,00	44,00	68,00	0,000
21/08/2018	15,80	7,60	11,70	92,00	50,00	71,00	0,000
22/08/2018	12,50	9,70	11,10	90,00	83,00	86,50	0,000
23/08/2018	14,90	10,60	12,75	93,00	77,00	85,00	0,000
24/08/2018	15,70	10,50	13,10	93,00	88,00	90,50	0,000
25/08/2018	13,40	8,60	11,00	88,00	47,00	67,50	0,000
26/08/2018	15,50	4,00	9,75	83,00	31,00	57,00	0,000
27/08/2018	17,90	7,00	12,45	82,00	32,00	57,00	0,000
28/08/2018	19,50	9,40	14,45	92,00	48,00	70,00	0,000
29/08/2018	22,20	13,00	17,60	90,00	50,00	70,00	1,600
30/08/2018	19,70	15,90	17,80	93,00	83,00	88,00	33,200
31/08/2018	16,80	13,10	14,95	93,00	87,00	90,00	29,000
01/09/2018	14,40	12,40	13,40	92,00	85,00	88,50	14,200
02/09/2018	15,70	13,70	14,70	92,00	89,00	90,50	3,000
03/09/2018	18,30	13,50	15,90	93,00	75,00	84,00	0,600
04/09/2018	18,70	12,40	15,55	90,00	62,00	76,00	0,000
05/09/2018	19,30	10,30	14,80	94,00	49,00	71,50	0,400
06/09/2018	21,90	13,10	17,50	86,00	52,00	69,00	0,000
07/09/2018	26,30	13,50	19,90	93,00	33,00	63,00	0,000
08/09/2018	21,50	12,30	16,90	93,00	59,00	76,00	0,200
09/09/2018	20,20	14,60	17,40	88,00	64,00	76,00	0,000
10/09/2018	18,30	15,20	16,75	82,00	62,00	72,00	0,000
11/09/2018	18,70	13,90	16,30	82,00	50,00	66,00	0,000
12/09/2018	19,00	13,70	16,35	81,00	61,00	71,00	0,000
13/09/2018	21,00	15,30	18,15	89,00	61,00	75,00	0,000
14/09/2018	18,50	15,70	17,10	92,00	84,00	88,00	7,000
15/09/2018	20,10	15,40	17,75	92,00	72,00	82,00	2,000
16/09/2018	20,00	16,30	18,15	90,00	75,00	82,50	0,000
17/09/2018	20,50	16,70	18,60	90,00	72,00	81,00	0,400
18/09/2018	21,20	15,60	18,40	93,00	74,00	83,50	0,000
19/09/2018	26,70	15,60	21,15	93,00	42,00	67,50	0,200
20/09/2018	21,60	12,30	16,95	92,00	42,00	67,00	0,000
21/09/2018	24,00	15,40	19,70	88,00	64,00	76,00	0,000
22/09/2018	28,00	18,30	23,15	93,00	52,00	72,50	0,000
23/09/2018	23,70	17,40	20,55	92,00	69,00	80,50	39,600
24/09/2018	20,60	16,20	18,40	93,00	66,00	75,55	9,400
25/09/2018	19,70	16,30	18,00	84,00	64,00	76,19	0,000
26/09/2018	26,00	16,80	21,40	93,00	64,00	76,85	0,400
27/09/2018	18,10	16,30	17,20	93,00	84,00	77,09	30,800
28/09/2018	19,70	16,90	18,30	92,00	87,00	77,33	0,800
29/09/2018	24,30	17,00	20,65	93,00	70,00	76,97	23,200
30/09/2018	25,60	17,70	21,65	92,00	59,00	76,52	15,600

01/10/2018	22,50	14,50	18,50	90,00	75,00	76,10	5,800
02/10/2018	16,60	11,50	14,05	88,00	44,00	75,61	0,800
03/10/2018	17,60	9,40	13,50	91,00	56,00	75,32	0,000
04/10/2018	23,00	11,10	17,05	88,00	32,00	75,29	0,000
05/10/2018	17,00	9,00	13,00	87,00	60,00	75,43	0,000
06/10/2018	18,20	7,40	12,80	92,00	57,00	75,65	0,000
07/10/2018	23,90	14,90	19,40	89,00	48,00	76,08	0,000
08/10/2018	24,80	18,10	21,45	90,00	63,00	76,09	0,000
09/10/2018	21,80	17,30	19,55	93,00	78,00	76,09	13,200
10/10/2018	20,20	14,10	17,15	92,00	46,00	76,23	0,000
11/10/2018	18,20	11,20	14,70	72,00	41,00	76,58	0,000
12/10/2018	17,40	14,30	15,85	93,00	66,00	76,77	0,000
13/10/2018	18,50	14,60	16,55	93,00	70,00	76,84	0,000
14/10/2018	20,30	10,40	15,35	93,00	47,00	76,45	0,000
15/10/2018	22,80	11,80	17,30	92,00	34,00	76,26	0,000
16/10/2018	25,30	16,30	20,80	90,00	55,00	76,04	0,000
17/10/2018	27,30	19,60	23,45	87,00	57,00	75,87	0,000
18/10/2018	24,50	18,50	21,50	92,00	70,00	75,61	0,000
19/10/2018	21,30	16,40	18,85	90,00	54,00	75,89	0,000
20/10/2018	20,10	14,70	17,40	64,00	38,00	76,20	0,000
21/10/2018	20,90	15,20	18,05	52,00	46,00	76,20	0,000
22/10/2018	25,40	17,10	21,25	81,00	60,00	76,33	0,000
23/10/2018	20,90	16,10	18,50	88,00	52,00	76,19	0,000
24/10/2018	21,40	15,30	18,35	70,00	55,00	76,21	0,000
25/10/2018	22,70	16,80	19,75	89,00	67,00	76,21	0,000
26/10/2018	23,60	16,40	20,00	92,00	62,00	76,19	0,000
27/10/2018	21,80	15,90	18,85	90,00	58,00	76,16	9,400
28/10/2018	21,80	14,30	18,05	84,00	51,00	76,12	0,000
29/10/2018	22,20	16,30	19,25	74,00	52,00	76,09	0,000
30/10/2018	25,90	18,50	22,20	85,00	57,00	76,07	0,000
31/10/2018	25,10	18,00	21,55	91,00	63,00	76,07	4,200
01/11/2018	20,00	13,40	16,70	84,00	58,00	76,09	0,000
02/11/2018	20,70	9,00	14,85	91,00	49,00	76,11	0,000
03/11/2018	23,50	16,30	19,90	87,00	53,00	76,14	5,200
04/11/2018	22,70	12,50	17,60	93,00	53,00	76,17	0,000
05/11/2018	24,30	17,50	20,90	80,00	55,00	76,18	0,000
06/11/2018	24,30	19,00	21,65	86,00	64,00	76,19	0,300
07/11/2018	23,30	19,00	21,15	87,00	53,00	76,19	0,000
08/11/2018	25,00	18,70	21,85	86,00	50,00	76,19	0,000
09/11/2018	26,00	20,20	23,10	76,00	48,00	76,19	0,000
10/11/2018	29,60	20,80	25,20	89,00	55,00	76,18	0,000
11/11/2018	27,80	21,10	24,45	89,00	64,00	76,16	0,000
12/11/2018	25,90	20,90	23,40	92,00	70,00	76,14	0,000

13/11/2018	27,10	22,70	24,90	87,00	70,00	76,13	1,300
14/11/2018	28,30	21,60	24,95	84,00	32,00	76,12	0,000
15/11/2018	30,70	15,20	22,95	78,00	22,00	76,12	0,000
16/11/2018	24,20	17,70	20,95	90,00	50,00	76,13	18,000
17/11/2018	24,90	18,60	21,75	91,00	64,00	76,15	9,000
18/11/2018	23,00	16,80	19,90	92,00	34,00	76,16	0,000
19/11/2018	23,80	9,50	16,65	85,00	19,00	76,16	0,000
20/11/2018	24,40	15,30	19,85	77,00	45,00	76,16	0,000
21/11/2018	28,80	19,20	24,00	80,00	49,00	76,15	0,000
22/11/2018	29,00	20,30	24,65	81,00	51,00	76,15	0,000
23/11/2018	25,60	21,10	23,35	90,00	68,00	76,15	0,000
24/11/2018	25,80	19,30	22,55	92,00	75,00	76,14	58,000
25/11/2018	24,10	14,20	19,15	88,00	32,00	76,14	6,200
26/11/2018	23,80	11,90	17,85	91,00	45,00	76,14	0,000
27/11/2018	23,70	18,90	21,30	75,00	56,00	76,14	0,000
28/11/2018	24,40	20,10	22,25	85,00	70,00	76,15	2,000
29/11/2018	27,90	20,90	24,40	89,00	62,00	76,15	0,000
30/11/2018	26,90	18,20	22,55	91,00	59,00	76,15	0,000
01/12/2018	25,10	17,90	21,50	92,00	55,00	76,15	0,000
02/12/2018	21,10	14,00	17,55	88,00	43,00	76,15	4,000
03/12/2018	25,90	8,00	16,95	85,00	21,00	76,16	0,000
04/12/2018	26,30	17,20	21,75	75,00	37,00	76,15	0,000
05/12/2018	24,10	12,20	18,15	90,00	41,00	76,15	0,000
06/12/2018	22,00	12,70	17,35	90,00	45,00	76,15	0,000
07/12/2018	21,40	11,10	16,25	84,00	41,00	76,15	0,000
08/12/2018	23,20	9,20	16,20	91,00	32,00	76,15	0,000
09/12/2018	26,50	17,30	21,90	76,00	47,00	76,15	0,000
10/12/2018	31,00	20,30	25,65	83,00	34,00	76,15	0,000
11/12/2018	31,20	19,70	25,45	84,00	41,00	76,15	0,000
12/12/2018	28,50	19,80	24,15	91,00	57,00	76,15	8,000
13/12/2018	25,50	19,20	22,35	82,00	54,00	76,15	0,000
14/12/2018	27,60	19,70	23,65	91,00	51,00	76,15	0,000
15/12/2018	26,20	19,00	22,60	88,00	40,00	76,15	0,000
16/12/2018	28,40	18,40	23,40	83,00	60,00	76,15	0,000
17/12/2018	33,40	21,70	27,55	89,00	51,00	76,15	0,000
18/12/2018	22,30	19,20	20,75	91,00	76,00	76,15	0,400
19/12/2018	22,90	19,70	21,30	89,00	77,00	76,15	0,800
20/12/2018	25,90	21,20	23,55	92,00	73,00	76,15	17,800
21/12/2018	25,30	21,60	23,45	91,00	77,00	76,15	12,600
22/12/2018	29,00	19,10	24,05	90,00	49,00	76,15	0,000
23/12/2018	25,40	16,60	21,00	92,00	58,00	76,15	0,000
24/12/2018	25,90	19,20	22,55	85,00	61,00	76,15	0,000
25/12/2018	25,90	19,90	22,90	77,00	52,00	76,15	0,000

26/12/2018	26,70	21,30	24,00	80,00	59,00	76,15	0,000
27/12/2018	29,50	21,20	25,35	84,00	52,00	76,15	0,000
28/12/2018	32,10	22,70	27,40	87,00	50,00	76,15	0,000
29/12/2018	30,20	22,70	26,45	89,00	54,00	76,15	0,000
30/12/2018	33,60	23,70	28,65	86,00	45,00	76,15	0,000
31/12/2018	26,90	21,10	24,00	88,00	60,00	76,15	0,000
01/01/2019	29,90	22,80	26,35	87,00	73,00	76,15	0,000
02/01/2019	34,30	25,20	29,75	88,00	54,00	76,15	6,600
03/01/2019	23,90	19,50	21,70	91,00	52,00	76,15	13,200
04/01/2019	25,00	14,10	19,55	90,00	49,00	76,15	0,000
05/01/2019	26,50	18,20	22,35	80,00	47,00	76,15	0,000
06/01/2019	30,90	22,20	26,55	76,00	59,00	76,15	0,000
07/01/2019	30,70	23,80	27,25	91,00	51,00	76,15	11,000
08/01/2019	30,10	17,70	23,90	85,00	47,00	76,15	0,000
09/01/2019	26,80	21,10	23,95	91,00	60,00	76,15	23,000
10/01/2019	28,70	20,30	24,50	92,00	61,00	76,15	35,000
11/01/2019	25,10	19,40	22,25	90,00	60,00	76,15	0,000
12/01/2019	24,00	20,50	22,25	89,00	65,00	76,15	2,800
13/01/2019	28,30	20,80	24,55	90,00	70,00	76,15	0,000
14/01/2019	29,90	23,70	26,80	91,00	61,00	76,15	5,200
15/01/2019	29,70	22,70	26,20	92,00	70,00	76,15	36,000
16/01/2019	29,60	23,00	26,30	92,00	59,00	76,15	11,600
17/01/2019	26,70	19,70	23,20	92,00	65,00	76,15	0,600
18/01/2019	23,50	19,70	21,60	91,00	81,00	76,15	32,600
19/01/2019	22,60	17,40	20,00	92,00	58,00	76,15	24,200
20/01/2019	25,20	18,60	21,90	76,00	58,00	76,15	0,400
21/01/2019	26,70	19,80	23,25	89,00	63,00	76,15	0,000
22/01/2019	30,20	22,10	26,15	88,00	45,00	76,15	0,000
23/01/2019	29,60	23,90	26,75	89,00	63,00	76,15	0,000

APÊNDICE A-2 - Dados meteorológicos da cidade de Pelotas

Dia	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa Média (%)	Precipitação acumulada (mm)
23/01/2018	33,00	21,80	27,40	82,50	21,900
24/01/2018	30,60	20,70	25,65	77,30	0,000
25/01/2018	26,80	16,80	21,80	76,80	0,000
26/01/2018	26,10	16,80	21,45	69,80	0,000
27/01/2018	26,40	20,30	23,35	81,80	0,000
28/01/2018	28,60	22,00	25,30	87,50	0,200
29/01/2018	27,60	17,00	22,30	79,00	0,000
30/01/2018	28,20	17,20	22,70	76,30	0,000
31/01/2018	27,90	18,50	23,20	80,30	0,800
01/02/2018	28,40	16,90	22,65	80,80	0,000
02/02/2018	32,20	16,40	24,30	75,80	0,000
03/02/2018	27,80	17,30	22,55	76,00	0,000
04/02/2018	27,70	19,20	23,45	72,50	0,000
05/02/2018	29,10	17,70	23,40	77,80	0,000
06/02/2018	28,90	19,90	24,40	76,00	0,000
07/02/2018	29,70	17,40	23,55	78,30	0,000
08/02/2018	30,20	19,70	24,95	78,30	0,000
09/02/2018	35,80	20,80	28,30	87,50	25,600
10/02/2018	27,40	20,00	23,70	82,00	0,000
11/02/2018	24,00	18,80	21,40	90,30	9,100
12/02/2018	24,40	15,40	19,90	76,30	0,000
13/02/2018	26,00	11,00	18,50	78,30	0,000
14/02/2018	26,80	15,20	21,00	73,30	0,000
15/02/2018	27,30	14,40	20,85	70,50	0,000
16/02/2018	28,40	16,40	22,40	75,00	0,000
17/02/2018	28,80	15,80	22,30	73,00	0,000
18/02/2018	30,80	18,60	24,70	79,80	0,000
19/02/2018	32,00	19,80	25,90	80,00	0,000
20/02/2018	26,40	22,60	24,50	89,00	1,400
21/02/2018	29,30	20,60	24,95	84,80	3,600
22/02/2018	26,50	16,50	21,50	86,80	2,400
23/02/2018	28,20	16,00	22,10	80,00	0,000
24/02/2018	27,10	16,40	21,75	84,30	3,300
25/02/2018	27,20	16,60	21,90	86,00	0,000
26/02/2018	27,60	17,80	22,70	83,00	0,000
27/02/2018	28,40	16,90	22,65	90,00	15,000
28/02/2018	28,10	15,00	21,55	86,30	0,200
01/03/2018	29,30	20,10	24,70	86,30	0,000
02/03/2018	30,10	19,40	24,75	86,00	0,000

03/03/2018	29,00	17,40	23,20	86,80	0,200
04/03/2018	29,80	21,30	25,55	90,00	8,300
05/03/2018	30,40	19,20	24,80	85,00	0,000
06/03/2018	25,60	17,20	21,40	75,80	0,000
07/03/2018	25,70	13,80	19,75	85,50	0,700
08/03/2018	27,60	12,80	20,20	84,50	0,000
09/03/2018	27,60	13,40	20,50	82,30	0,000
10/03/2018	29,30	16,30	22,80	86,00	0,000
11/03/2018	30,40	18,50	24,45	84,00	1,900
12/03/2018	23,80	12,60	18,20	72,00	0,000
13/03/2018	28,00	10,30	19,15	72,50	0,000
14/03/2018	28,80	12,60	20,70	78,80	0,000
15/03/2018	27,60	17,10	22,35	72,80	12,200
16/03/2018	27,00	14,30	20,65	84,80	0,000
17/03/2018	27,30	16,20	21,75	89,30	2,000
18/03/2018	36,80	20,00	28,40	83,80	7,300
19/03/2018	25,30	16,30	20,80	76,50	0,400
20/03/2018	28,10	11,50	19,80	81,30	0,000
21/03/2018	24,00	13,40	18,70	83,80	0,000
22/03/2018	25,20	9,40	17,30	75,80	0,000
23/03/2018	28,00	13,10	20,55	83,00	0,000
24/03/2018	22,80	18,30	20,55	98,30	58,700
25/03/2018	22,80	15,60	19,20	86,30	1,800
26/03/2018	22,80	10,30	16,55	80,50	0,000
27/03/2018	24,20	17,80	21,00	83,00	0,000
28/03/2018	27,10	17,60	22,35	91,00	0,000
29/03/2018	28,60	19,00	23,80	90,30	0,000
30/03/2018	28,40	18,40	23,40	88,30	0,000
31/03/2018	24,00	19,00	21,50	97,00	8,100
01/04/2018	23,60	19,80	21,70	98,00	11,300
02/04/2018	26,20	18,20	22,20	92,00	7,000
03/04/2018	27,10	18,80	22,95	89,80	2,800
04/04/2018	26,60	16,60	21,60	89,50	0,000
05/04/2018	26,60	14,60	20,60	87,50	0,000
06/04/2018	26,60	14,30	20,45	87,80	0,000
07/04/2018	30,20	15,10	22,65	83,50	0,000
08/04/2018	29,20	18,00	23,60	88,00	0,000
09/04/2018	28,00	18,40	23,20	86,00	0,000
10/04/2018	31,20	20,80	26,00	75,50	0,000
11/04/2018	33,80	20,00	26,90	74,50	0,000
12/04/2018	33,80	19,80	26,80	83,00	14,200
13/04/2018	23,20	16,60	19,90	76,30	0,800
14/04/2018	23,40	15,40	19,40	75,80	0,000
15/04/2018	24,20	17,00	20,60	85,30	0,000

16/04/2018	25,40	15,00	20,20	76,80	0,000
17/04/2018	27,40	16,00	21,70	77,50	0,000
18/04/2018	30,60	14,00	22,30	80,80	0,000
19/04/2018	32,20	15,40	23,80	79,00	0,000
20/04/2018	31,40	19,40	25,40	89,50	15,000
21/04/2018	26,40	19,20	22,80	89,30	17,800
22/04/2018	24,80	18,00	21,40	95,80	6,500
23/04/2018	27,60	19,60	23,60	91,00	0,000
24/04/2018	26,10	20,90	23,50	92,30	0,000
25/04/2018	27,90	21,20	24,55	92,50	0,000
26/04/2018	27,30	19,60	23,45	93,00	0,000
27/04/2018	30,80	19,60	25,20	89,00	0,000
28/04/2018	30,40	19,60	25,00	91,50	0,000
29/04/2018	27,40	20,60	24,00	92,30	0,300
30/04/2018	24,30	18,70	21,50	90,50	9,400
01/05/2018	22,20	16,30	19,25	82,30	0,800
02/05/2018	21,60	16,70	19,15	92,80	5,900
03/05/2018	24,20	18,30	21,25	91,50	4,800
04/05/2018	23,40	16,80	20,10	94,00	1,400
05/05/2018	24,60	17,80	21,20	92,30	0,200
06/05/2018	23,40	18,80	21,10	86,80	0,000
07/05/2018	22,90	16,00	19,45	83,80	0,000
08/05/2018	24,40	17,60	21,00	87,00	0,000
09/05/2018	22,90	18,20	20,55	93,80	0,500
10/05/2018	26,20	18,80	22,50	90,00	1,800
11/05/2018	24,00	18,00	21,00	85,30	0,900
12/05/2018	21,40	12,80	17,10	85,30	0,000
13/05/2018	22,00	7,60	14,80	86,50	0,000
14/05/2018	24,60	9,80	17,20	87,30	0,000
15/05/2018	22,60	14,20	18,40	91,30	0,000
16/05/2018	19,00	10,60	14,80	80,30	0,000
17/05/2018	19,00	6,60	12,80	84,80	0,700
18/05/2018	17,00	11,80	14,40	91,50	0,900
19/05/2018	16,40	12,20	14,30	86,50	1,200
20/05/2018	17,50	10,20	13,85	93,30	1,300
21/05/2018	18,80	10,30	14,55	84,00	0,000
22/05/2018	18,30	8,60	13,45	76,00	0,000
23/05/2018	18,30	6,50	12,40	76,80	0,000
24/05/2018	19,60	4,60	12,10	83,30	0,000
25/05/2018	19,10	3,00	11,05	82,50	0,000
26/05/2018	21,30	5,40	13,35	87,80	0,000
27/05/2018	25,80	10,80	18,30	89,00	0,000
28/05/2018	29,80	13,80	21,80	79,50	0,000
29/05/2018	27,80	12,30	20,05	80,30	0,000

30/05/2018	28,20	12,70	20,45	78,50	0,000
31/05/2018	18,80	16,40	17,60	95,80	23,500
01/06/2018	17,20	14,40	15,80	96,30	18,800
02/06/2018	15,60	10,00	12,80	77,00	0,000
03/06/2018	18,20	8,00	13,10	87,00	0,000
04/06/2018	19,40	9,80	14,60	86,80	0,000
05/06/2018	15,80	11,60	13,70	97,30	6,200
06/06/2018	14,20	7,20	10,70	81,00	0,000
07/06/2018	16,60	6,20	11,40	73,30	0,000
08/06/2018	16,40	6,00	11,20	82,30	0,000
09/06/2018	19,20	3,80	11,50	81,80	0,000
10/06/2018	20,00	12,80	16,40	89,50	10,400
11/06/2018	20,40	15,40	17,90	94,00	39,300
12/06/2018	17,40	13,50	15,45	93,00	0,000
13/06/2018	13,00	8,20	10,60	75,50	0,000
14/06/2018	12,60	5,20	8,90	81,80	0,000
15/06/2018	12,70	4,00	8,35	82,50	0,000
16/06/2018	13,10	4,60	8,85	93,50	0,000
17/06/2018	15,00	4,40	9,70	90,80	0,000
18/06/2018	16,20	1,60	8,90	91,00	0,000
19/06/2018	18,40	7,00	12,70	92,00	0,000
20/06/2018	25,00	6,70	15,85	81,30	0,000
21/06/2018	23,00	11,20	17,10	75,30	5,400
22/06/2018	16,20	4,90	10,55	77,80	0,000
23/06/2018	15,20	7,20	11,20	90,00	0,500
24/06/2018	13,90	6,70	10,30	84,50	0,000
25/06/2018	13,00	5,40	9,20	92,80	0,000
26/06/2018	17,50	1,60	9,55	82,80	0,000
27/06/2018	19,30	2,10	10,70	85,00	0,000
28/06/2018	12,90	6,20	9,55	97,80	0,500
29/06/2018	19,80	12,30	16,05	95,80	0,100
30/06/2018	19,40	11,00	15,20	95,00	0,000
01/07/2018	22,30	11,80	17,05	92,50	0,000
02/07/2018	19,00	15,20	17,10	94,30	47,100
03/07/2018	11,20	6,20	8,70	75,80	0,500
04/07/2018	11,90	4,10	8,00	90,00	1,400
05/07/2018	13,20	6,10	9,65	91,30	1,800
06/07/2018	16,00	10,20	13,10	95,00	9,600
07/07/2018	15,60	12,80	14,20	94,80	33,100
08/07/2018	15,60	11,60	13,60	91,00	2,200
09/07/2018	12,00	9,40	10,70	92,50	4,900
10/07/2018	16,00	7,80	11,90	92,30	0,000
11/07/2018	14,90	8,10	11,50	93,50	0,000
12/07/2018	15,60	7,40	11,50	95,50	0,000

13/07/2018	20,60	4,90	12,75	79,00	0,000
14/07/2018	24,20	7,00	15,60	86,00	0,000
15/07/2018	21,80	14,20	18,00	90,80	6,600
16/07/2018	15,60	11,60	13,60	86,80	17,600
17/07/2018	16,00	13,80	14,90	97,80	29,100
18/07/2018	23,20	15,30	19,25	93,30	28,400
19/07/2018	29,00	14,20	21,60	81,00	0,000
20/07/2018	21,60	16,60	19,10	90,50	6,100
21/07/2018	15,30	7,30	11,30	70,50	0,000
22/07/2018	14,40	2,20	8,30	85,30	0,000
23/07/2018	11,50	9,30	10,40	83,30	17,600
24/07/2018	16,10	6,10	11,10	82,00	0,000
25/07/2018	14,80	12,60	13,70	95,30	20,800
26/07/2018	18,00	14,20	16,10	94,50	43,900
27/07/2018	16,20	9,10	12,65	86,00	0,000
28/07/2018	14,20	6,80	10,50	96,50	16,600
29/07/2018	16,80	9,20	13,00	80,00	0,000
30/07/2018	16,60	11,20	13,90	76,50	0,000
31/07/2018	14,40	6,90	10,65	85,80	0,000
01/08/2018	14,00	2,00	8,00	83,00	0,000
02/08/2018	16,50	5,90	11,20	91,00	0,000
03/08/2018	15,80	13,00	14,40	93,50	0,000
04/08/2018	17,20	13,00	15,10	86,50	0,200
05/08/2018	16,80	9,20	13,00	83,50	0,200
06/08/2018	20,40	5,20	12,80	84,50	0,000
07/08/2018	20,40	8,20	14,30	83,50	0,000
08/08/2018	17,80	11,30	14,55	91,30	10,800
09/08/2018	15,40	8,90	12,15	84,00	5,200
10/08/2018	12,70	7,60	10,15	87,00	0,000
11/08/2018	17,80	10,50	14,15	92,30	0,200
12/08/2018	17,20	13,00	15,10	91,80	0,000
13/08/2018	20,90	13,00	16,95	89,00	0,000
14/08/2018	21,60	11,20	16,40	90,50	0,000
15/08/2018	15,70	8,00	11,85	89,00	0,000
16/08/2018	19,20	7,40	13,30	84,30	0,000
17/08/2018	21,60	8,00	14,80	86,50	0,000
18/08/2018	23,20	9,20	16,20	85,30	0,000
19/08/2018	14,20	10,10	12,15	97,80	5,700
20/08/2018	13,20	6,90	10,05	64,20	2,800
21/08/2018	15,60	7,30	11,45	85,50	0,000
22/08/2018	11,40	7,60	9,50	95,80	10,100
23/08/2018	16,60	9,80	13,20	92,00	1,600
24/08/2018	14,80	12,00	13,40	91,50	28,800
25/08/2018	13,80	8,00	10,90	72,50	0,600

26/08/2018	16,00	5,80	10,90	71,80	0,000
27/08/2018	19,80	4,20	12,00	71,00	0,000
28/08/2018	22,20	7,00	14,60	83,30	0,000
29/08/2018	22,60	9,60	16,10	86,30	2,400
30/08/2018	20,00	16,50	18,25	94,30	12,800
31/08/2018	14,60	13,20	13,90	96,50	40,900
01/09/2018	14,80	12,00	13,40	97,80	27,800
02/09/2018	16,30	13,50	14,90	97,00	12,900
03/09/2018	18,90	14,20	16,55	88,00	2,100
04/09/2018	18,80	11,90	15,35	88,50	0,000
05/09/2018	20,30	7,50	13,90	79,30	0,000
06/09/2018	23,20	8,90	16,05	87,50	0,000
07/09/2018	26,20	10,70	18,45	77,30	0,000
08/09/2018	22,60	11,10	16,85	90,50	0,000
09/09/2018	20,40	14,00	17,20	86,30	0,000
10/09/2018	18,00	14,90	16,45	81,30	0,000
11/09/2018	19,00	12,80	15,90	73,00	0,000
12/09/2018	19,30	13,10	16,20	78,00	0,000
13/09/2018	21,30	16,40	18,85	93,00	0,000
14/09/2018	19,00	16,30	17,65	97,30	16,600
15/09/2018	20,60	16,60	18,60	88,00	8,000
16/09/2018	21,00	12,10	16,55	86,30	0,000
17/09/2018	19,50	17,40	18,45	93,80	0,400
18/09/2018	23,00	16,90	19,95	91,50	1,800
19/09/2018	26,40	15,80	21,10	80,00	0,000
20/09/2018	21,20	12,80	17,00	80,30	0,000
21/09/2018	26,40	12,30	19,35	87,30	0,000
22/09/2018	31,50	15,00	23,25	80,80	0,000
23/09/2018	18,40	18,00	18,20	92,30	39,600
24/09/2018	21,40	16,80	19,10	87,00	14,700
25/09/2018	20,20	16,40	18,30	85,00	0,200
26/09/2018	25,80	16,80	21,30	92,80	0,800
27/09/2018	18,00	16,70	17,35	96,80	28,700
28/09/2018	20,90	17,10	19,00	95,50	0,500
29/09/2018	28,20	19,00	23,60	89,00	24,000
30/09/2018	25,10	17,80	21,45	88,00	11,800
01/10/2018	23,40	17,80	20,60	92,50	7,600
02/10/2018	17,50	12,80	15,15	68,30	0,600
03/10/2018	19,00	9,30	14,15	77,80	0,000
04/10/2018	23,00	9,40	16,20	62,30	0,000
05/10/2018	18,20	6,40	12,30	73,00	0,000
06/10/2018	18,80	6,20	12,50	80,00	0,000
07/10/2018	24,90	12,40	18,65	83,80	0,000
08/10/2018	25,80	18,20	22,00	88,00	0,000

09/10/2018	22,00	19,00	20,50	93,50	21,100
10/10/2018	21,20	13,90	17,55	71,50	0,000
11/10/2018	18,80	11,20	15,00	74,50	0,000
12/10/2018	18,20	13,60	15,90	98,30	67,400
13/10/2018	17,30	14,30	15,80	90,50	0,300
14/10/2018	21,20	10,20	15,70	87,30	0,200
15/10/2018	23,00	9,60	16,30	82,00	0,000
16/10/2018	25,50	14,80	20,15	86,50	0,000
17/10/2018	28,20	19,30	23,75	86,80	0,700
18/10/2018	25,30	20,40	22,85	89,50	0,000
19/10/2018	22,20	17,30	19,75	74,00	0,000
20/10/2018	20,20	14,00	17,10	67,00	0,000
21/10/2018	21,40	13,30	17,35	73,80	0,000
22/10/2018	27,50	15,40	21,45	73,80	0,000
23/10/2018	22,40	15,60	19,00	76,00	1,400
24/10/2018	21,90	12,40	17,15	70,80	0,000
25/10/2018	24,00	17,40	20,70	91,00	0,000
26/10/2018	24,20	17,00	20,60	86,50	0,400
27/10/2018	22,20	15,60	18,90	87,30	13,400
28/10/2018	22,80	13,40	18,10	76,00	0,300
29/10/2018	22,60	12,30	17,45	73,50	0,000
30/10/2018	27,00	18,80	22,90	83,30	0,000
31/10/2018	24,40	20,10	22,25	86,80	5,300
01/11/2018	21,10	15,80	18,45	81,50	0,000
02/11/2018	21,60	9,00	15,30	78,50	0,000
03/11/2018	25,20	17,00	21,10	80,80	6,400
04/11/2018	23,30	12,50	17,90	82,00	0,000
05/11/2018	25,00	16,20	20,60	80,30	0,000
06/11/2018	25,40	17,80	21,60	85,50	0,000
07/11/2018	22,40	17,90	20,15	79,00	0,200
08/11/2018	25,30	18,10	21,70	72,30	0,000
09/11/2018	29,20	17,70	23,45	74,30	0,000
10/11/2018	34,30	18,00	26,15	73,00	0,000
11/11/2018	30,00	21,20	25,60	83,00	0,000
12/11/2018	28,60	21,50	25,05	84,00	0,000
13/11/2018	26,60	22,80	24,70	87,50	1,800
14/11/2018	28,20	21,40	24,80	54,00	0,000
15/11/2018	31,00	16,40	23,70	56,50	0,000
16/11/2018	24,00	16,20	20,10	77,30	0,000
17/11/2018	25,20	17,40	21,30	88,50	21,200
18/11/2018	22,80	18,40	20,60	73,50	12,000
19/11/2018	23,80	8,80	16,30	58,80	0,000
20/11/2018	25,00	11,40	18,20	72,00	0,000
21/11/2018	30,00	15,40	22,70	75,00	0,000

22/11/2018	30,80	17,80	24,30	76,50	0,000
23/11/2018	28,80	20,40	24,60	84,80	0,000
24/11/2018	25,80	20,40	23,10	88,30	8,700
25/11/2018	25,00	13,50	19,25	71,50	0,000
26/11/2018	24,60	10,40	17,50	71,00	0,000
27/11/2018	25,30	18,00	21,65	79,80	0,000
28/11/2018	23,60	19,60	21,60	92,50	2,600
29/11/2018	27,40	18,60	23,00	84,80	0,000
30/11/2018	28,20	18,40	23,30	84,50	0,000
01/12/2018	27,20	19,00	23,10	75,80	4,600
02/12/2018	21,80	12,90	17,35	72,80	0,000
03/12/2018	26,00	8,70	17,35	48,30	0,000
04/12/2018	28,40	17,40	22,90	67,30	0,400
05/12/2018	24,20	13,10	18,65	76,50	0,000
06/12/2018	23,20	13,00	18,10	71,50	0,000
07/12/2018	21,60	10,60	16,10	72,50	0,000
08/12/2018	24,20	8,20	16,20	60,80	0,000
09/12/2018	31,60	14,80	23,20	64,00	0,000
10/12/2018	33,00	18,60	25,80	70,00	0,000
11/12/2018	33,40	17,70	25,55	76,80	0,000
12/12/2018	29,50	20,40	24,95	85,50	9,400
13/12/2018	27,00	17,00	22,00	75,00	0,000
14/12/2018	29,30	21,80	25,55	74,00	1,100
15/12/2018	27,20	20,80	24,00	73,00	0,000
16/12/2018	29,20	17,00	23,10	82,80	0,000
17/12/2018	35,70	22,30	29,00	88,30	8,600
18/12/2018	22,60	19,40	21,00	90,80	0,600
19/12/2018	22,70	19,40	21,05	95,30	5,100
20/12/2018	25,00	21,60	23,30	91,00	13,400
21/12/2018	28,60	20,40	24,50	87,00	1,500
22/12/2018	30,00	19,80	24,90	79,50	0,000
23/12/2018	27,00	18,60	22,80	81,50	0,000
24/12/2018	27,00	16,60	21,80	80,80	0,000
25/12/2018	27,20	16,80	22,00	67,50	0,000
26/12/2018	27,80	21,60	24,70	79,50	0,000
27/12/2018	30,20	21,80	26,00	75,80	0,000
28/12/2018	34,10	21,50	27,80	75,30	0,000
29/12/2018	31,90	21,20	26,55	82,00	0,000
30/12/2018	33,60	22,30	27,95	74,50	0,000
31/12/2018	27,10	20,00	23,55	80,30	0,000
01/01/2019	30,40	23,00	26,70	83,30	0,000
02/01/2019	39,70	25,10	32,40	80,80	3,300
03/01/2019	24,60	22,00	23,30	86,50	27,600
04/01/2019	26,20	15,20	20,70	72,50	0,000

05/01/2019	27,60	15,60	21,60	69,30	0,000
06/01/2019	32,00	22,30	27,15	82,50	0,000
07/01/2019	29,10	23,60	26,35	81,00	4,500
08/01/2019	30,70	18,40	24,55	78,80	0,000
09/01/2019	25,40	20,80	23,10	91,00	27,300
10/01/2019	27,60	20,40	24,00	90,00	44,900
11/01/2019	24,60	19,90	22,25	84,80	0,000
12/01/2019	24,60	18,80	21,70	88,00	4,000
13/01/2019	29,40	20,70	25,05	92,00	0,500
14/01/2019	30,40	22,20	26,30	87,30	25,000
15/01/2019	29,00	23,40	26,20	96,50	34,700
16/01/2019	30,60	22,80	26,70	81,80	5,000
17/01/2019	27,40	21,40	24,40	88,00	1,000
18/01/2019	22,40	20,40	21,40	96,50	59,700
19/01/2019	21,20	17,40	19,30	92,30	13,800
20/01/2019	25,00	16,40	20,70	84,50	3,300
21/01/2019	28,60	18,80	23,70	82,30	0,000
22/01/2019	30,40	20,20	25,30	82,50	0,000
23/01/2019	29,80	22,40	26,10	87,00	0,000

APÊNDICE B - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Rompimento 3 dias - compressão axial			Rompimento 7 dias - compressão axial			Rompimento 28 dias - compressão axial		
Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)
0% - 1	144,30	18,37	0% - 1	174,60	22,23	0% - 1	232,50	29,60
0% - 2	144,80	18,44	0% - 2	184,30	23,47	0% - 2	237,50	30,24
0% - 3	152,20	19,38	0% - 3	162,20	20,65	0% - 3	246,30	31,36
0% - 4	141,30	17,99	0% - 4	167,50	21,33	0% - 4	228,20	29,06
0% - 5	152,10	19,37	0% - 5	190,90	24,31	0% - 5	230,40	29,34
5% - 1	142,40	18,13	5% - 1	152,40	19,40	5% - 1	245,10	31,21
5% - 2	142,30	18,12	5% - 2	182,80	23,27	5% - 2	263,60	33,56
5% - 3	155,60	19,81	5% - 3	147,20	18,74	5% - 3	215,10	27,39
5% - 4	147,40	18,77	5% - 4	187,80	23,91	5% - 4	240,80	30,66
5% - 5	160,60	20,45	5% - 5	192,30	24,48	5% - 5	201,50	25,66
7.5% - 1	164,50	20,94	7.5% - 1	173,40	22,08	7.5% - 1	223,80	28,50
7.5% - 2	164,80	20,98	7.5% - 2	174,30	22,19	7.5% - 2	261,30	33,27
7.5% - 3	164,20	20,91	7.5% - 3	182,90	23,29	7.5% - 3	212,90	27,11
7.5% - 4	172,20	21,93	7.5% - 4	173,30	22,07	7.5% - 4	250,50	31,89
7.5% - 5	164,20	20,91	7.5% - 5	187,10	23,82	7.5% - 5	228,20	29,06
10% - 1	167,10	21,28	10% - 1	182,30	23,21	10% - 1	233,30	29,70
10% - 2	154,30	19,65	10% - 2	181,00	23,05	10% - 2	194,00	24,70
10% - 3	140,90	17,94	10% - 3	177,60	22,61	10% - 3	232,40	29,59
10% - 4	155,40	19,79	10% - 4	153,40	19,53	10% - 4	232,80	29,64
10% - 5	157,00	19,99	10% - 5	150,00	19,10	10% - 5	242,90	30,93
12,5% - 1	139,32	17,74	12% - 1	155,27	19,77	12% - 1	207,81	26,46
12,5% - 2	136,03	17,32	12% - 2	147,41	18,77	12% - 2	206,60	26,31
12,5% - 3	137,39	17,57	12% - 3	143,25	18,24	12% - 3	206,90	26,34
12,5% - 4	140,50	17,89	12% - 4	149,77	19,07	12% - 4	191,80	24,42
12,5% - 5	137,13	17,46	12% - 5	142,62	18,16	12% - 5	189,90	24,18

APÊNDICE C - Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade

Corpo de prova	Peso seco	3h	6h	24h	48h	72h
0% - 1	3601,8	3612,1	3632,4	3663	3682,5	3689,8
0% - 2	3564,8	3577	3594,3	3623,8	3641	3645,7
0% - 3	3537,8	3550,9	3569,1	3600,4	3619,7	3625,2
5% - 1	3426,5	3437,4	3456,8	3487,1	3504,5	3510,6
5% - 2	3356,1	3368,7	3387,9	3419,7	3437,2	3443,5
5% - 3	3397,7	3411,3	3429,2	3460,7	3466,9	3472,3
75% - 1	3480,7	3490,5	3506,4	3532,1	3549	3556,5
75% - 2	3347,5	3357	3373,8	3400,1	3418,3	3423,8
75% - 3	3444	3454,7	3472,8	3501,6	3519,4	3524,7
10% - 1	3393,6	3405,1	3428,1	3462,6	3478,9	3486,6
10% - 2	3454,1	3466,3	3490,3	3526,5	3545,9	3553,8
10% - 3	3381,3	3394,6	3418,7	3456,1	3470,6	3479,2
12,5%-1	3293,3	3307,6	3332,5	3371,7	3388,9	3398,3
12,5%-2	3415,1	3430,7	3452,7	3490,3	3508,1	3517,7
12,5%-3	3311,8	3326,5	3350,9	3390	3408,8	3418,6

APÊNDICE D - Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão

Corpo de prova	Peso seco	Após saturação	Após saturação e fervura (Balança hidrostática)
REF - 1	3560,90	3782,50	2067,70
REF - 2	3393,50	3624,90	1895,60
REF-3	3537,40	3736,60	2083,00
5% - 1	3412,30	3634,20	1934,70
5% - 2	3416,10	3649,30	1940,50
5% - 3	3362,70	3584,55	1923,50
75% - 1	3446,50	3655,80	1981,80
75% - 2	3410,40	3615,60	1998,54
75% - 3	3439,10	3642,60	2035,60
10% - 1	3418,60	3655,50	1957,43
10% - 2	3440,60	3676,50	1980,60
10% - 3	3439,10	3671,80	1983,70
12.5% - 1	3440,50	3693,60	1881,51
12.5% - 2	3325,60	3555,60	1882,52
12.5% - 3	3406,10	3645,60	1985,50

APÊNDICE E - Resultados do ensaio de penetração de íons cloreto em ambiente de laboratório

Teor de substituição	Corpo de prova	Penetração de cloretos(mm)
Referencia	1	28,25
		26,42
	2	24,13
		23,87
5.0%	1	20,76
		22,52
	2	25,45
		27,23
7.50%	1	21,55
		22,63
	2	24,72
		23,15
10.0%	1	24,2
		25,25
	2	26,58
		24,60

**APÊNDICE F-1 - Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto na
cidade de Pelotas (6 meses)**

Teor de substituição	Corpo de prova	Penetração de cloretos(mm)
Referencia	1	4,10
		4,00
	2	3,90
		3,80
5%	1	3,80
		3,70
	2	3,75
		3,85
7.50%	1	3,95
		3,8
	2	3,74
		3,78
10%	1	3,88
		3,89
	2	3,91
		3,94

APÊNDICE F-2 - Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto na cidade de Pelotas (12 meses)

Teor de substituição	Corpo de prova	Penetração de cloretos
Referencia	1	7,50
		7,55
	2	7,43
		7,42
5%	1	7,35
		7,32
	2	7,40
		7,45
7.50%	1	7,30
		7,32
	2	7,37
		7,39
10%	1	7,50
		7,51
	2	7,40
		7,35

APÊNDICE F- 3 - Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto na cidade de Rio Grande(6 meses)

Teor de substituição	Corpo de prova	Penetração de cloretos
Referencia	1	7,95
		7,88
	2	7,98
		7,95
5%	1	7,86
		7,87
	2	7,85
		7,82
7.50%	1	7,81
		7,83
	2	7,8
		7,82
10%	1	7,85
		7,80
	2	7,87
		7,86

APÊNDICE F-4 - Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto na cidade de Rio Grande (12 meses)

Teor de substituição	Corpo de prova	Penetração de cloretos
Referencia	1	10,55
		10,45
	2	10,40
		10,38
5%	1	10,35
		10,30
	2	10,42
		10,37
7.50%	1	10,32
		10,36
	2	10,38
		10,35
10%	1	10,39
		10,40
	2	10,41
		10,42