



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

# **CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO COM RESÍDUO DE POLIMENTO DO PORCELANATO – COMPORTAMENTO EM RELAÇÃO À CORROSÃO DE ARMADURAS**

*Por*

***Evelyne Emanuelle Pereira Lima***

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Dezembro de 2015**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

# **CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO COM RESÍDUO DE POLIMENTO DO PORCELANATO – COMPORTAMENTO EM RELAÇÃO À CORROSÃO DE ARMADURAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Evelyne Emanuelle Pereira Lima**

**Orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira**

**João Pessoa – Paraíba**

**Dezembro de 2015**

**EVELYNE EMANUELLE PEREIRA LIMA**

**CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO COM  
RESÍDUO DE POLIMENTO DO PORCELANATO –  
COMPORTAMENTO EM RELAÇÃO À CORROSÃO DE  
ARMADURAS**

Dissertação aprovada em 21/12/2015 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Aprovado em: 21/12/2015

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira – UFPB  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro– UFPE  
(Examinador Externo)

A Deus e à minha família que  
sempre esteve ao meu lado,  
apoando, incentivando, **DEDICO**.

## AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, pelo dom da vida, por me escolher, me capacitar e me salvar. Sem Ele nada disso seria possível. A Ele toda honra e toda glória para sempre.

Ao **Prof. Dr. Gibson Rocha Meira**, pelos ensinamentos transmitidos, pela paciência e incentivo constantes e orientação para execução deste trabalho. Exemplo de mestre e profissional.

Aos **meus pais e irmãos** que dividiram as angústias e conheceram no íntimo todas as minhas alegrias, tristezas e dificuldades durante a realização deste mestrado.

A **Prof. Valdith Lopes, Pablo Ramon, Munique Lima e aos integrantes do GMAT** pelo companheirismo, por dividirem seus conhecimentos e me apoiarem em todos esses momentos.

**Alsaiane, Vanessa dos Santos e Juliana**, bolsistas que me apoiaram na realização dos ensaios dessa pesquisa.

A **Prof. Ieda Garcia dos Santos**, pela atenção dispensada e por ceder as dependências e equipamentos do LACOM para realização de alguns ensaios desta pesquisa.

Ao **Prof. Dr. Normando Perazzo** por todo apoio dado durante o período de mestrado.

Aos amigos do UNIPÊ Centro Universitário de João Pessoa, em especial a **Antônio Sobrinho, Erika Aranha, Lisieux Andrade e Ricardo Vasconcelos** por todo apoio no fim dessa jornada

A **Ricardo, Zito, Sebastião, Otoniel, Cláudio e Delby**, funcionários do LABEME (Laboratório de Materiais e Estruturas), companheiros de trabalho que se transformaram em bons amigos e contribuíram de forma imprescindível para a concretização desta pesquisa.

A **Marcos Padilha, Carlos Santana, Antônio Henrique e Wellintânea**, amigos que nasceram durante o mestrado e que levarei comigo por toda a vida.

À **Indústria de Porcelanato Elizabeth** por ceder o material usado na pesquisa e por sempre nos receber tão bem em suas dependências.

À amiga **Carla Martins** por todas as palavras de incentivo quando eu achava que nada mais ia dar certo, orando e me apoiando sempre.

Aos amigos **Leila S. Viegas, André Luiz, Joselita, Penha, Sônia, Paulo Sérgio, Lígia, Marcílio, Sueny, Mary, Elenice e Aparecida** pelo apoio durante essa jornada.

À família **IEB - Jaguaribe**, companheiros de todas as horas. Sem vocês tudo seria mais difícil.

Ao **PPGECAM** (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental).

A todos que de alguma forma se dedicaram e contribuíram para a elaboração deste trabalho, agradeço.

## RESUMO

A busca da sustentabilidade do setor da construção civil e da preservação ambiental tem fomentado a realização de pesquisas voltadas para o emprego de resíduos em concretos e argamassas. Dentro desses resíduos industriais encontramos o Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) que é produzido no final do processo de fabricação da cerâmica, decorrente da etapa de polimento. No entanto, para que um produto seja aceito no mercado, é necessário conhecer o seu comportamento físico e químico, bem como o seu potencial de utilização e impacto que, porventura, possa causar, quando incorporado a outros materiais. Este trabalho estuda os efeitos do fenômeno de empacotamento de agregados e da adição do RPP em concreto convencional e auto adensável frente à corrosão de armaduras provocada pela ação de íons cloretos. Para isso foram preparados concretos convencionais (referência 0%, 10%, 20% de adição de RPP) e concreto auto adensável (40% de adição de RPP) em dois traços 1:1,6:2,4:0,50 e 1:2,2:3,3:0,60. Observou-se nos ensaios a partir de normas brasileiras e de termogravimetria que o resíduo da região do estudo não apresentava propriedades pozolânicas. Como resultados da confecção de traços usando o método de empacotamento de agregados, foram obtidos concretos com menores índices de vazios e absorção, à medida que aumentou-se a quantidade de RPP nos traços e com significativos ganhos de resistência aos 90 dias, com uma variação de 19 a 35% no traço 1 e de 44 a 83% no traço 2. Em relação aos ensaios de corrosão por cloretos, observou-se que o tempo decorrido até a despassivação das armaduras incorporadas para concretos de com 10% de adição de RPP aumentou em 327% nos concretos do traço 1 e de 551% nos concretos do traço 2 quando comparados aos concretos de referência. As adições de RPP também provocam uma redução na quantidade de cloretos livres e totais da matriz cimentícia e um decréscimo do coeficiente de difusão no concreto, podendo ser justificado pela diminuição do índice de vazios provocada pelo empacotamento de agregados. Esses resultados mostram que a adição de RPP em concretos pode ser uma alternativa sustentável de destinação desse resíduo e, ainda, pode se mostrar um grande aliado no aumento da vida útil das estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão de armaduras.

**Palavras Chave:** Sustentabilidade. Resíduo. Concreto. Corrosão. Porcelanato.

## ABSTRACT

The search of sustainability in the construction sector and environmental preservation has fostered conducting research for the use of waste concrete and mortars. Within these industrial waste found the porcelain polishing residue (RPP) which is produced at the end of the manufacturing process of ceramics, due to the polishing step. However, for a product to be accepted in the market, it is necessary to know the physical and chemical behavior as well as their potential use and impact that perhaps may cause, when incorporated into other materials.

This study examines the effects of the packing of aggregated and adding the RPP phenomenon in conventional concrete, self compacting front reinforcement corrosion caused by chloride ions action. For this conventional concretes were prepared (reference 0%, 10%, 20% addition RPP) and self compacting concrete (40% added RPP) in two dashes 1:1,6:2,4:0,50 e 1:2,2:3,3:0,60. It was observed in the trials from Brazilian and thermogravimetry standards that the residue of the study area did not have pozzolanic properties. As a result of making strokes using aggregates packaging method, there was obtained concrete with lower levels of voids and absorption, as increased the amount RPP in the features with significant strength gains after 90 days with a variation in 19% to 35 % in trace 1 and 44% to 83% in dash 2. With respect to chloride corrosion tests, it was observed that the time elapsed until the depassivation of reinforcement for concrete incorporated with 10% added RPP increased by 327.00% trace 1 in the concrete and in 551 % dash concrete 2 when compared to the reference concrete. The RPP additions also cause a reduction in the amount of free and total chlorides of the cementitious matrix and decrease the diffusion coefficient of the concrete, can be explained by the decrease of the void ratio caused by aggregates packaging. These results show that the addition of RPP in concrete can be a sustainable alternative for disposal of this waste and also can prove to be a great ally in extending the shelf life of reinforced concrete structures subject to corrosion of armor.

**Keywords:** Sustainability. Residue. Concrete. Corrosion. Porcelain.



## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	11
ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
CAPÍTULO I.....	1
1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.2 - OBJETIVOS .....	3
1.2.1 - Objetivo Geral .....	3
1.2.2 - Objetivos Específicos.....	3
1.3 - JUSTIFICATIVA .....	3
CAPÍTULO II.....	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1. Uso de adições em concreto.....	6
2.2 Resíduos de Polimento do Porcelanato (RPP) .....	8
2.3 Concreto Auto Adensável (CAA).....	16
2.4 – Corrosão de armaduras .....	22
2.4.1 – Corrosão causada por cloretos .....	26
CAPÍTULO III	
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 – Características dos materiais empregados .....	33
3.1.1 Cimento Portland.....	34
3.1.2 Resíduo de Polimento do Porcelanato - RPP .....	36
3.1.2 Agregado miúdo .....	38
3.1.3 Agregado graúdo.....	39
3.1.4 Aditivo Plastificante .....	41
3.1.5 Aditivo Superplastificante .....	41
3.1.6 Armadura.....	41
3.2 – Métodos para análise da influência do RPP em pastas.....	42
3.2.1 – Ensaios de pozolanicidade com o resíduo do polimento de porcelanato .	42
3.2.2 – Confecção de pastas contendo resíduo e cimento .....	42

3.2.3 – Análise Termogravimétrica .....	43
3.2.4 – pH da água de Equilíbrio.....	45
3.3 - Métodos para análise da influência do RPP em concreto .....	46
3.3.1 – Ensaios para definição do esqueleto granular .....	46
3.3.2 – Definição das dosagens e dos teores de adição do RPP .....	48
3.3.3 – Confeção dos corpos de prova .....	48
3.3.4 Ensaios de autoadensabilidade do CAA .....	51
3.3.5 - Ensaios de resistência à compressão .....	51
3.3.6 – Ensaios de compatibilidade do superplastificante com o cimento.....	51
3.4 – Ensaios de durabilidade .....	52
3.3.1 Método acelerado de indução da corrosão por cloretos .....	53
3.3.1.1 Ensaios de Eletromigração .....	53
3.3.1.2 Técnicas de Avaliação de Corrosão .....	54
3.3.1.3 Teor crítico de cloretos.....	56
3.3.3 Migração de cloretos .....	59
CAPÍTULO IV .....	61
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1 Ensaios de pozolanicidade com RPP .....	61
4.2 Análises Termogravimétrica.....	62
4.3 Alcalinidade da matriz cimentícia.....	65
4.4 Ensaios para definição do esqueleto granular .....	65
4.5 Definição das dosagens e dos teores de adição do RPP .....	69
4.6 Compatibilidade do superplastificante com o cimento .....	70
4.7 Concreto auto adensável: Classificação, controle e aceitação no estado fresco	72
4.8 Resistência à Compressão .....	73
4.9 Absorção e Índice de vazios .....	75
4.10 Durabilidade .....	76
4.10.1 Monitoramento eletroquímico.....	76
4.10.2 Perfis de Cloretos.....	78
4.10.3 Migração de cloretos .....	80
CAPÍTULO V .....	82
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	82
5.1 – Conclusões.....	82
5.2 – Sugestões para Pesquisas Futuras.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1: Estimativa de geração de RCC no Brasil.

Tabela 2.1: trabalhos com uso de RPP

Tabela 2.2: trabalhos com uso de adições em CAA

Tabela 3.1: Características do cimento utilizado

Tabela 3.2 - Composição química do resíduo do porcelanato

Tabela 3. 3: Ensaio de caracterização do agregado miúdo

Tabela 3. 4: Ensaio de caracterização do agregado miúdo

Tabela 3.5: Dados granulométricos dos agregados miúdo e graúdo

Tabela 3.6: Características da armadura utilizada

Tabela 3.7 : Traços de concreto usados no ensaio experimental

Tabela 3.8: Critérios de avaliação do Potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876 (1991)

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de pozolanicidade (NBR 5752)

Tabela 4.2: Teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$  nas pastas de cimento

Tabela 4.3: pH da água de equilíbrio

Tabela 4.4: Massa unitária, massa específica e índice de vazios das misturas dos agregados miúdo e graúdo

Tabela 4.5: Massa Unitária

Tabela 4.6: Massa Unitária da adição do RPP à mistura dos agregados

Tabela 4.7: Características de dosagens e propriedades no estado fresco do CAA com adição de RPP

Tabela 4.8: Coeficiente de difusão no regime estacionário

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Deposição de Resíduo do Polimento de Porcelanato na fábrica de cerâmica

Figura 2.1 – Fluxograma do processo de fabricação do grês porcelanato

Figura 2.2: Modelo de Tuutti para corrosão de armaduras

Figura 2.3 - Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras – modelo ajustado.

Figura 2.4: Representação gráfica de pilha eletroquímica.

Figura 2.5: Representação esquemática da corrosão por pite devido aos íons cloretos (iniciação e propagação).

Figura 3.1: Visão geral do programa experimental

Figura 3.2: Análise da distribuição do tamanho de partículas

Figura 3.3: Fluxograma dos ensaios com o resíduo

Figura 3.4: Análise da distribuição do tamanho de partículas

Figura 3.5: corpos de prova para ensaios de pozolanicidade

Figura 3.6: Pasta de cimento + RPP

Figura 3.7: Aparelho de análise térmica

Figura 3.8: pHmetro digital para leituras da água de equilíbrio

Figura 3.9: Ensaio de empacotamento de agregados

Figura 3.10: Limpeza mecânica das barras de aço

Figura 3.11: Sequência de limpeza das barras

Figura 3.12: Características geométricas dos corpos de prova para ensaios de cloretos

Figura 3.13: Ensaio de eletromigração

Figura 3.14: Esquema do ensaio de eletromigração

Figura 3.15: Equipamento para ensaio de Resistência de Polarização (a) visão geral (b) eletrodo de referência

Figura 3.15: Retirada das barras do corpo de prova

Figura 3.16: Detecção do pite de corrosão e medida da distância pra face do cp

Figura 3.17: Corte das camadas dos cp's

Figura 3.18: Sequência de pulverização das amostras

Figura 3.19: Titulador potenciométrico

Figura 3.20: Célula de migração de cloretos

Figura 4.1: Rompimento dos corpos de prova com cal

Figura 4.2: TG/DTA da pasta de referência (sem adição de RPP)

Figura 4.3: TG/DTA da pasta com 10% de adição de RPP

Figura 4.4: TG/DTA da pasta com 20% de adição de RPP

Figura 4.5: TG/DTA da pasta com 30% de adição de RPP

Figura 4.6: TG/DTA da pasta com 40% de adição de RPP

Figura 4.9: Empacotamento com substituição do agregado miúdo pelo RPP

Figura 4.10: Massa Unitária dos agregados naturais com adição de RPP

Figura 4.11: Teste de compatibilidade do plastificante

Figura 4.12: Teste de compatibilidade do plastificante 2

Figura 4.13: (a)Ensaio de espalhamento com anel J, (b)Determinação da habilidade passante e (c) coesão do concreto

Figura 4.14: Resistencia à compressão – Traço 01

Figura 4.15: Resistencia à compressão – traço 02

Figura 4.16: Resultado do ensaio de Absorção em Corpos de prova cilíndricos

Figura 4.17: Resultado do ensaio de índice de vazios

Figura 4.18: Tempo médio de ensaio para despassivação dos corpos de prova

Figura 4.19: Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão para os concretos de referência e com 10% de adição

Figura 4.20: Evolução, ao longo do tempo, da densidade de corrente

Figura 4.21: Perfis de cloretos totais para os traços de referência e 10% de adição de RPP

Figura 4.22: Perfis de cloretos livres para os traços de referência e 10% de adição de RPP

Figura 4.23: Gráfico de migração por cloretos - Traço 1

Figura 4.24: Gráfico de migração por cloretos - Traço II

## SÍMBOLOS E ABREVIações

ACI - American Concrete Institute

ASTM: American society for testing and materials

CAA – Concreto Auto Adensável

CVV – Concreto Convencional

CEB - Comitê Euro-International du Béton

C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico

C<sub>4</sub>AF: ferroaluminato tetracálcico

CAA: concreto autoadensável

CCV: concreto convencional

C-A-H: cálcio aluminato hidratado

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

CP V – ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

D<sub>NS</sub> – Coeficiente de difusão no regime estacionário

D<sub>SS</sub> – Coeficiente de difusão no regime não estacionário

DRX: difração de raio X

DTG: Termogravimetria diferencial

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ISO - International Organization for Standardization

NBR: Norma Brasileira

pH: potencial de Hidrogênio

RILEM: International union of laboratories and experts in construction, materials, systems and structures

RPP – Resíduo de Polimento do Porcelanato

TR 1 – Traço 1 (1: 1,6 : 2,4: 0,50): concreto de referência (sem adição de resíduo)

TR2 - Traço 2 (1: 2,2 : 3,3: 0,60): concreto de referência (sem adição de resíduo)

TI 10% - Traço 1: concreto com 10% adição de resíduo

TII 10% - Traço 2: concreto com 10% adição de resíduo

TI 20% - Traço 1: concreto com 20% adição de resíduo

TII 20% - Traço 2: concreto com 20% adição de resíduo

TI 40% - Traço 1: concreto com 40% adição de resíduo

TII 40% - Traço 2: concreto com 40% adição de resíduo

TG: Termogravimetria

## ESTRUTURA DO TRABALHO

---

O trabalho está subdividido em cinco capítulos:

O Capítulo 1 descreve a introdução, ressaltando a justificativa, apresentando um breve histórico da importância da pesquisa e o objetivo geral, bem como os objetivos específicos que foram estabelecidos para a realização deste trabalho.

O Capítulo 2 aborda conceitos relacionados à revisão bibliográfica dos temas relevantes para a pesquisa tais como corrosão, concreto auto adensável, cloretos e temas relacionados aos ensaios a serem realizados.

O Capítulo 3 relata os materiais e os métodos empregados durante o processo de realização da pesquisa, detalhando os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova e os ensaios realizados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e análises de todos os ensaios realizados, à luz dos estudos prévios e das observações diretas resultantes do trabalho experimental.

No Capítulo 5 são relatadas as considerações finais do trabalho, expondo as conclusões, bem como sugestões para trabalhos futuros.





## CAPÍTULO I

---

### 1 – INTRODUÇÃO

Tem-se generalizado, no meio técnico-científico, uma concordância sobre a necessidade de preservar o meio ambiente e os recursos naturais. A busca da sustentabilidade do setor da construção civil e dessa preservação ambiental tem fomentado a realização de pesquisas voltadas para o emprego de resíduos em concretos e argamassas. Ao mesmo tempo em que há um grande aumento do consumo de matéria prima e recursos naturais, cresce a geração de resíduos industriais e, conseqüentemente, a busca por adequada deposição, reutilização ou reciclagem desses resíduos.

A construção civil, além de consumir grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, é geradora de muito resíduo e poluição. Segundo o anuário 2010 do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM, 2010), a quantidade da produção mineral comercializada no ano de 2009, foi de 255.807.957 toneladas, dos quais o mercado consumidor da construção civil foi responsável por 96,54% deste consumo. No entanto, esse setor também tem se mostrado com grande potencial para reaproveitamento, não só de seus próprios resíduos, como de resíduos oriundos de outras atividades industriais.

Uma alternativa bastante utilizada nas últimas décadas tem sido a adição de rejeitos industriais na produção de concretos e argamassas. Vários estudos têm usado esses rejeitos na produção desses compostos, como Gonçalves (2000), que obteve, em sua pesquisa, um incremento na resistência de concretos produzidos com resíduos, bem como maior coesão e consistência, menor exsudação e absorção em algumas faixas de adição; Lisbôa (2004), utilizou resíduo de beneficiamento do mármore e do granito para confecção de concreto auto adensável e obteve resultados satisfatórios em propriedades como resistência à segregação e passagem por obstáculos e resistência à compressão.

A utilização desses resíduos na produção de concreto vem se estabelecendo como uma prática importante para sustentabilidade na construção, com a possibilidade de reduzir os impactos ambientais relacionados à deposição de resíduos, diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> que é advindo da produção de cimento, reduzir os danos causados pela extração de matéria prima, bem como reduzir o gasto de energia.

Dentro desses resíduos industriais encontramos o Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) que é produzido no final do processo de fabricação da cerâmica, decorrente da etapa de polimento (figura 1.1).

Figura 1.1: Deposição de Resíduo do Polimento de Porcelanato na fábrica de cerâmica



Fonte: Arquivos do autor, 2015

No entanto, para que um produto seja aceito no mercado, é necessário conhecer o seu comportamento físico e químico, bem como o seu potencial de utilização e impacto que, porventura, possa causar, quando incorporado a outros materiais.

Os estudos sobre durabilidade das estruturas de concreto armado apontam a corrosão da armadura devido à ação dos íons cloretos como um dos grandes problemas que podem ocorrer nas estruturas de concreto (ANDRADE, 1997; NEVILLE, 1997). No entanto, estudos sobre os efeitos desse tipo de resíduo em relação ao fenômeno da corrosão de armaduras são muito tímidos, mesmo a corrosão sendo uma das principais causas de degradação das estruturas de concreto armado em todo o mundo, com repercussões em função do volume de casos registrados, da precocidade com que ocorrem, bem como do montante de recursos envolvidos (MEIRA, 2004).

## **1.2 - OBJETIVOS**

### **1.2.1 - Objetivo Geral**

A presente proposta de estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato (RPP), no comportamento de concretos em relação à resistência à compressão e à corrosão de armaduras desencadeada pela ação de íons cloretos.

### **1.2.2 - Objetivos Específicos**

Para que o objetivo geral pudesse ser atingido foi necessário estabelecer-se alguns objetivos específicos:

- Analisar o pH da água de equilíbrio obtida em pastas produzidas com diferentes teores de adição de RPP;
- Verificar se o RPP empregado apresenta atividade pozolânica;
- Avaliar a influência do RPP empregado no desenvolvimento de CAA;
- Caracterizar os concretos produzidos com adição do RPP;
- Avaliar a influência do teor de adição do resíduo empregado na velocidade de transporte de cloretos;
- Avaliar a influência da adição do resíduo empregado no teor crítico de cloretos para iniciar a corrosão;
- Avaliar a influência do teor do resíduo empregado no comportamento eletroquímico das armaduras;

## **1.3 - JUSTIFICATIVA**

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o setor da construção civil apresentou no ano de 2014 uma queda no crescimento, em torno de 1,9% em relação a 2013, porém nos primeiros trimestres do ano de 2015, voltou a crescer cerca de 1,9%, em relação a 2014, voltando ao mesmo patamar de desempenho, mostrando uma tendência à recuperação. Considerado o setor que mais consome recursos naturais, responsável também por um uso intensivo de energia elétrica, a construção civil gera sérios impactos ambientais (JOHN E AGOPYAN, 2011).

A reutilização e a reciclagem destes resíduos industriais são as soluções mais apropriadas para dá-lhes o destino adequado, reduzindo custos, preservando recursos naturais não renováveis, diminuindo a carga de poluentes lançados no meio ambiente e reduzindo os impactos ambientais e efeitos danosos à saúde humana causados pelo descarte indiscriminado de resíduos na natureza. Lisboa (2004) afirma que países como Japão e Holanda tem assumido essa responsabilidade de incorporação dos resíduos das mais diversas atividades industriais (provenientes das indústrias metalúrgicas, termoelétricas, etc) como material para uso na construção civil. Com isso, o reaproveitamento do RPP em concretos e argamassas pode constituir-se uma maneira apropriada para dar um destino ambientalmente adequado a este resíduo.

Considerando a indústria cerâmica de revestimentos; a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos (ANFACER, 2015), indicou que a produção brasileira de revestimentos cerâmicos que era da ordem de 903,3 milhões de metros quadrados em 2014, deve apresentar um crescimento da ordem de 6,81% no ano de 2015. Dentro dessa produção, o porcelanato produzido no país foi da ordem de 93 milhões de metros quadrados no ano de 2013 e de 104 milhões de metros quadrados no ano de 2014 e, a perspectiva para crescimento de sua produção é bastante positiva pelo fato do porcelanato ser, atualmente, o material para revestimentos que apresenta as melhores características técnicas e estéticas se comparadas com as demais encontradas no mercado.

O RPP - Resíduo de Polimento do Porcelanato é um resíduo com potencial para aproveitamento em concretos, como já comprovado em estudo realizado por Souza (2007). Bernardin (2006), em seu estudo no aproveitamento do Resíduo de Polimento do Porcelanato para a fabricação de novos materiais cerâmicos, afirma que dentre os vários resíduos com potencial para uso em reaproveitamento e reciclagem estão os provenientes dos processos da indústria cerâmica.

Segundo Taylor (1997), a adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Por outro lado, essas adições podem alterar as condições do meio que circundam as armaduras, alterando o seu comportamento em relação à corrosão. Mehtae Monteiro (2008), afirmam que há uma relação muito próxima entre a durabilidade dos materiais e a sustentabilidade,

haja vista que a conservação de recursos naturais através de materiais de construção duradouros é uma atitude sustentável.

Do ponto de vista ambiental, a indústria cerâmica, na região de João Pessoa, produz grande quantidade diária de resíduos de porcelanato com pouca ou nenhuma aplicação relevante para esses resíduos. A sua deposição em aterros sanitários além de elevados custos econômicos pode acarretar sérios problemas ambientais, como contaminação do solo e da vegetação locais. Segundo Souza (2007), a Indústria de Cerâmica da região do estudo chega a produzir entre 30 e 35 toneladas deste resíduo por dia.

O rejeito produzido na etapa de polimento do porcelanato pode ser estudado para ser aproveitado como adição em concretos, agregando valor ao resíduo, dando destino ambientalmente adequado e minimizando o descarte irregular do mesmo, trazendo, desta forma, economia de recursos naturais e diminuição da poluição produzida pela indústria da construção civil. A aplicação em concretos auto adensáveis também se configura como uma possibilidade viável.

Como toda estrutura, concretos confeccionados com RPP também estão sujeitos à ação de processos de degradação, decorrentes de ações é uma fonte de degradação de estruturas de concreto armado quando possibilita a corrosão de armaduras. Neste ambiente, a durabilidade das estruturas pode ser fortemente influenciada pela presença desses agentes agressivos que estará diretamente ligada ao pH da fase líquida do concreto e à sua porosidade.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de conhecer melhor a influência deste tipo de adição na durabilidade de estruturas de concreto e no comportamento dessas estruturas sujeitas à corrosão de armaduras.

## CAPÍTULO II

### 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Uso de adições em concreto

O uso de adições em concreto tem se tornado uma excelente alternativa para dar um destino ambientalmente adequado a alguns rejeitos industriais e para melhorar as propriedades do concreto nos seus estados fresco e endurecido. Essas adições quando desenvolvem ações químicas são denominadas, ativas. Quando desenvolvem ações físicas são denominadas adições inertes.

A influência das adições em concreto, influencia na consistência e na exsudação no estado fresco e na permeabilidade, estrutura dos poros, resistência mecânica e resistência a íons agressivos no estado endurecido. Mehta e Monteiro (2008), afirmam que em concretos frescos que mostram uma grande tendência à segregação e à exsudação, a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade, reduzem o tamanho dos poros e o volume de vazios.

Dados de estudos realizados pelo IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, no ano de 2012, mostrados na Tabela 1.1 abaixo, apresentam uma estimativa de Resíduos da Construção Civil (RCC) em diferentes países.

Tabela 1.1: Estimativa de geração de RCC no Brasil.

Estimativa de geração de RCC em alguns países			
País	Quantidade anual		Fonte
	Em milhões t/ano	Em kg/habitante/ano	
Suécia	1,2 - 6	136 - 680	Tolstoy, Borklund e Carlson (1998) e EU (1999)
Holanda	12,8 - 20,2	820 - 1.300	Lauritzen (1998), Brossink, Brouwers e Van Kessel (1996) e EU (1999)
Estados Unidos	136 - 171	463 - 584	EPA (1998), Peng, Grosskopf e Kibert (1994)
Reino Unido	50 - 70	880 - 1.120	Detr (1998) e Lauritzen (1998)
Bélgica	7,5 - 34,7	735 - 3.359	
Dinamarca	2,3 - 10,7	440 - 2.010	Lauritzen (1998) e EU (1999)
Itália	35 - 40	600 - 690	
Alemanha	79 - 300	963 - 3.658	
Japão	99	785	Kasai (1998)
Portugal	3,2 - 4,4	325 - 447	EU (1999) e Ruivo e Veiga ( <i>apud</i> Marques Neto, 2009)
<b>Brasil</b>	31	230 - 760	<b>Abrelpe (2011), Pinto (1999), Carneiro et al. (2001) e Pinto e González (2005)</b>

Fonte: IPEA – 2012.

Percebe-se, diante dos dados apresentados pela pesquisa, o alto índice de geração de RCC no Brasil, com uma estimativa que varia de 230 a 760kg/habitante/ano. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, o SNIS, somente 12,5% dos resíduos coletados nos municípios pesquisados chega às áreas de triagem e transbordo de RCC, aterro de RCC e áreas de reciclagem, com base em informações autodeclaradas (SNIS, 2014). Tais dados evidenciam que a destinação ambientalmente adequada dos RCC ainda é uma realidade distante em muitos municípios brasileiros. Vemos a partir deles, a necessidade de estudos que viabilizem o uso desses resíduos gerados no setor da construção civil.

Além do consumo de recursos naturais e da geração de resíduos em seu próprio processo produtivo de construção de edificações, as indústrias de materiais para a construção civil também geram resíduos no seu processo de produção e tem fomentado várias pesquisas para reaproveitá-los.

Isaia *et al* (2005), afirmam que as adições que podem ser utilizadas em materiais cimentícios podem ser divididas em três grupos:

- Inertes: Não apresentam reação química considerável quando adicionada ao concreto ou à argamassa. Agem pelo processo físico, como: refinamento dos poros e aumentando a densidade da pasta. Ex.: material carbonático, pó de quartzo, pó de pedra, etc

- Hidráulicos: Reagem em presença de água e possuem características aglutinantes. Ex.: escória de alto forno, cinza volante – Classe C

- Pozolanas: Que consomem o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento e o transforma em silicato de cálcio hidratado. Segundo Sabir *et al* (2001), o hidróxido de cálcio, produzido na hidratação do cimento não trás grande contribuição à sua resistência e pode ser prejudicial à sua durabilidade, sendo o ponto fraco da estrutura da pasta de cimento, visto que, sendo um produto solúvel, pode ser lixiviado, deixando a estrutura porosa, resultando não apenas na diminuição da resistência, mas também no aumento da permeabilidade do composto. Ex.: sílica ativa, cinza de casca de arroz - Classe F.

As adições inertes, denominadas de fillers, que atuam apenas com efeitos físicos na microestrutura do concreto, atuando como material de enchimento. Esses materiais contribuem para o refinamento dos poros e para a redução da porosidade



total do concreto, tornando a matriz mais densa. Esse efeito atua diretamente na durabilidade das estruturas, pois ao diminuirmos sua permeabilidade, impedimos a entrada de agentes agressivos como cloretos e sulfatos que causam danos ao aço e ao concreto. A adição de um material finamente dividido de forma que a relação água/sólidos da pasta seja diminuída, implica em menor porosidade total e também um refinamento do sistema de poros e dos produtos de hidratação.

Além das melhorias trazidas às propriedades do concreto, a adição de resíduos industriais nos possibilita a diminuição dos custos desse material.

Para uma estrutura de concreto armado que necessita de uma vida útil elevada, a redução na sua durabilidade reflete diretamente no aumento dos custos com reparos, renovação e manutenção das edificações. Esses custos elevados podem ser diminuídos se houver essa preocupação com a durabilidade e a vida útil da estrutura desde o início. Com isso, aumentar a vida útil de uma estrutura pode ser uma boa solução para a preservação de recursos naturais, redução de impactos ambientais e economia de energia em longo prazo.

## **2.2 Resíduos de Polimento do Porcelanato (RPP)**

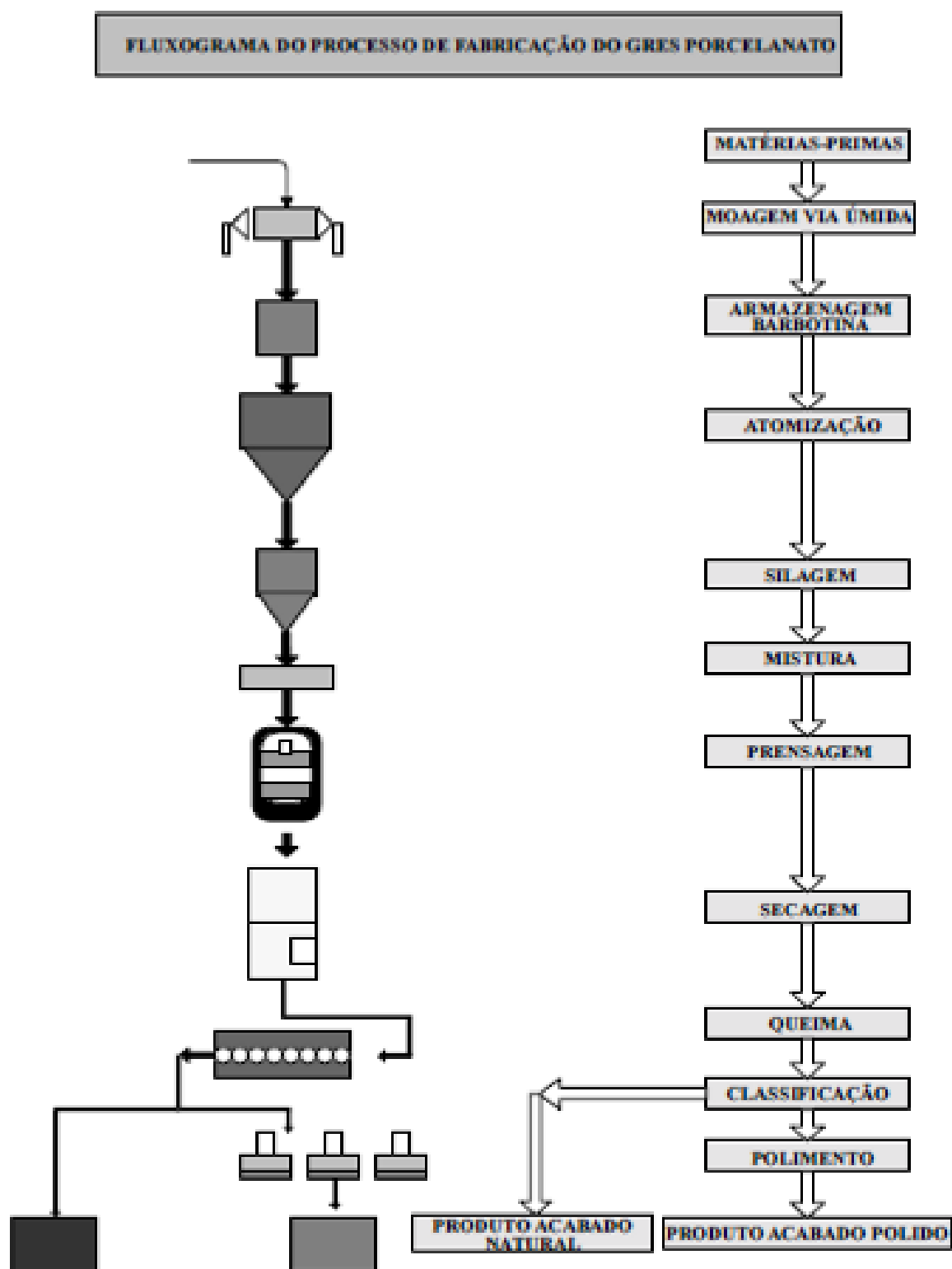
A indústria cerâmica possui como matéria prima principal de seus componentes a argila, que submetida a um processo industrial, resulta em produtos para aplicação na indústria da construção em geral. Um dos principais produtos dessa indústria é o porcelanato, que consiste em uma cerâmica de revestimento, de porosidade reduzida e elevada resistência mecânica, sendo empregadas em obras da construção civil de elevado padrão de acabamento. O porcelanato é caracterizado por uma microestrutura densa, constituída por fases cristalinas, mullita e quartzo, em quantidade minoritária, imersas em uma fase vítrea (BERNARDIN et al, 2006).

Os fabricantes de porcelanato oferecem ao mercado consumidor, basicamente, dois tipos de porcelanatos o polido e o rústico, ambos com algumas variações, como: rústico-polido, antiderrapante, esmaltado, acetinado, natural, dentre outros. No entanto, o maior consumo é do porcelanato polido que em sua fabricação inclui a etapa de polimento das peças ao final do processo.

Na fase de polimento, as peças de porcelanato passam por máquinas polidoras com discos diamantados e tijolos abrasivos, a fim de nivelar as peças, retirar defeitos e dar brilho à superfície. Bittercourt e Benincá (2002) afirmam que o processo de polimento consiste em um equipamento dotado de várias cabeças polidoras

compostas de materiais abrasivos, que em contato com as peças com alta rotação, velocidade controlada e em presença de água, executam o polimento, sendo, que à medida que a peça passa pela máquina, os abrasivos usados apresentam gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado de polimento desejado. A primeira parte da polidora é responsável pelo desgaste acentuado da peça, ou seja, é onde se dá o nivelamento da superfície da peça, com abrasivos diamantados e magnesianos de grãos grossos (100 a 220  $\mu\text{m}$ ). O material abrasivo utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de diamante ou carbetos de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos (BERNADIN, 2007). A figura 2.1 mostra o fluxograma de fabricação do Grês Porcelanato, ilustrando todo esse processo descrito acima.

Figura 2.1 – Fluxograma do processo de fabricação do gres porcelanato



Fonte: Revista Cerâmica Industrial, 01 (04/05) Agosto/Dezembro, 1996

É nesta fase do processo de fabricação que é gerado o Resíduo de Polimento do Porcelanato (RPP). O resíduo do polimento é constituído por uma mistura de material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e material abrasivo desprendido durante o processo (SOUZA, 2007).

O RPP produzido na região de estudo costuma ser armazenado pela indústria produtora, para posterior reaterro das jazidas exploradas para extração das matérias primas usadas na fabricação de seus produtos.

Alguns pesquisadores já têm trabalhado com esse rejeito industrial, aplicando-o em produtos cimentícios; conforme pode ser visto na tabela 2.1, que descreve sucintamente as observações de cada estudo.

Tabela 2.1: trabalhos com uso de RPP

AUTOR/ANO	TRABALHOS
<b>Cauduro&amp;Pelisser (2012)</b>	<p>Pela alta geração de RPP na região Sul de Santa Catarina, que chega a ordem de mil toneladas por mês, sendo descartado na forma de lama em aterros sanitários, os autores utilizaram esse resíduo em substituição ao cimento.</p> <p>Neste trabalho, foram desenvolvidos ensaios em bancada de retração autógena com transdutores de deslocamento, onde foram avaliadas duas composições em intervalos de 20 segundos, durante aproximadamente 11 dias.</p> <p>A primeira composição com 100% da mistura em cimento-CPV-RS, e outra com substituição de 20% do volume de cimento em adição de RPP. Utilizou-se para as duas formulações água deionizada com relação a/agl de 0,34 e aditivo superplastificante à base de policarboxilato (1% em relação à massa de cimento).</p> <p>O estudo possibilitou visualizar o comportamento da retração autógena desde as primeiras horas até aproximadamente 11 dias de idade e em curtos intervalos de tempo. Pode-se medir as três fases da retração autógena e a diferença da mesma em pastas de cimento com e sem adição de RPP. Como resultado, obtiveram uma redução média de 29,56% da retração autógena, expansão, em 33,45%, e a autosssecagem,</p>

	<p>em 33,91%, com 20% de substituição.</p> <p>Inferindo os resultados com o percentual de substituição de cimento, pois o estudo mostra que o percentual de redução da retração autógena é maior que o percentual de substituição de cimento, concluí-se que a substituição de cimento por RPP contribui de forma positiva na redução da retração autógena.</p>
<b>Steiner (2011)</b>	<p>Utilizou RPP na composição de argamassas com traço de 1:3:0,6 destinada à fabricação de blocos para alvenaria de vedação.</p> <p>O autor estudou o efeito aglomerante como potencializador do efeito do cimento. Para caracterização física e química do material, foram realizados ensaios de granulometria a laser, fluorescência de raio – x e absorção atômica.</p> <p>Na mistura foram utilizados quatro composições de argamassas de traço 1:3, adicionando 0, 5, 10 e 20% do RPP em massa de cimento, sendo avaliados por meio de ensaios de índice de consistência, resistência à compressão e medida do calor de hidratação</p> <p>Como resultado, o autor estudou o efeito aglomerante como potencializador do efeito do cimento e verificou melhoria nas características de trabalhabilidade e consistência das argamassas, uma diminuição na porosidade das argamassas, com consequente aumento da resistência (da ordem de 50% com 20% de adição de RPP).</p> <p>Percebeu, também, melhoria no acabamento das peças, pois a presença de finos na massa conferiu uma textura mais suave das argamassas e uma superfície mais lisa.</p> <p>No entanto, o autor ressalta que o resíduo possui alto teor de álcalis, limitando o uso em concretos que tenham agregados graúdos com presença de sílica amorfa, causando reação deletéria álcali-agregado.</p>
<b>Jacoby&amp;Pelisser (2011)</b>	<p>Os autores buscaram fazer o reaproveitamento do RPP, utilizando-as em argamassas de revestimentos. Para isso, avaliaram suas propriedades no estado fresco e endurecido, com acréscimo de resíduo em relação à massa de cimento. Conseguiram incorporar até 20% de resíduo, mantendo a consistência na faixa de <math>260 \pm 5</math>mm.</p> <p>Após os ensaios que avaliaram propriedades, como absorção, índice de</p>

	<p>vazios, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, os autores puderam observar que os traços com a adição não provocaram nenhum resultado insatisfatório, quando comparados ao traço de referência. Ainda, submeteram os traços a apreciação de mestre de obras experiente, o qual, concluiu que as argamassas com adição seriam bem aceitas no canteiro. O uso do RPP apresentou ainda, melhoria das propriedades das argamassas e permitiu atingir resistência à compressão superior a 18% na idade de 84 dias com redução de 20% do consumo de cimento, levando a um índice de eficiência de consumo de cimento de 7,5kg/MPa/m<sup>3</sup>.</p> <p>O resultado obtido neste trabalho foi atribuído ao fato do RPP produzido nas fábricas da região sul de Santa Catarina apresentarem propriedades pozolânicas.</p>
<p><b>Ramos (2008)</b></p>	<p>Estudou argamassas no estado fresco e endurecido com adição de Resíduo de Pedreira de Rocha Calcária (RPRC) e RPP (substituindo parcialmente o cimento), comparando o resultado com argamassas de referência.</p> <p>Na produção das argamassas utilizou o Cimento Portland CP II F- 32, nos traços 1:1:6:1,87 e 1:0,5:4,5:1,45. Foram produzidas 18 composições de argamassas, 16 usando o RPPC e o RPP e 02 de referência.</p> <p>Os resíduos utilizados foram caracterizados quanto à massa específica, massa unitária, granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raio-x e fluorescência de raio- x.</p> <p>Nas argamassas frescas foram realizados ensaios de índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado.</p> <p>No estado endurecido, os ensaios realizados foram densidade de massa aparente, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção por capilaridade.</p> <p>Os resultados encontrados mostram que as argamassas formuladas com resíduos não sofreram alterações significativas no que se refere ao índice de consistência, retenção de água, densidade de massa no estado</p>

	<p>fresco, teor de ar incorporado e densidade de massa aparente no estado endurecido. Já em relação ao módulo de elasticidade a presença dos resíduos na mistura ocasionou a diminuição do mesmo, melhorando assim o desempenho da argamassa. Porém, a resistência à tração na flexão e à resistência à compressão, além da absorção de água por capilaridade, tiveram o seu desempenho comprometidos.</p>
<b>Marques et al (2007)</b>	<p>Estudaram a composição do RPP e a viabilidade de sua adição na massa cerâmica comercial (1, 2 e 3% de adição em massa). O resíduo do polimento foi caracterizado através da determinação de sua composição química, distribuição de tamanho de partículas e difração de raios X. O resíduo dopolimento foi adicionado a uma massa comercial utilizada para a produção de revestimento.</p> <p>As amostras foram sinterizadas em ciclos de queima rápida e em seguida determinou-se sua absorção de água e densidade aparente</p> <p>Os resultados indicaram que o resíduo é constituído basicamente por sílica, alumina e óxido de magnésio, apresentando quartzo, mulita, carbeto de silício e periclase como fases cristalinas. A adição do resíduo reduziu a temperatura de queima dos corpos de prova mas também provocou uma leve redução na sua densidade aparente. Obteve uma redução na temperatura ótima de queima e um leve aumento na densidade aparente dos corpos de prova.</p>
<b>Bernardin et al (2007)</b>	<p>Usou RPP e restos de abrasivos de Silício na produção de cerâmicas celulares de baixa densidade.</p> <p>Os resíduos foram coletados em estações de tratamento de efluentes (ETE). Os resíduos coletados foram caracterizados por análise química (FRX), de fases (DRX), de distribuição de tamanhos de partículas (difração laser) e por análise térmica (ATD).</p> <p>Após devida preparação, o resíduo de abrasivo foi adicionado ao resíduo de polimento em frações mássicas de 0,5% a 12,0% e as misturas foram granuladas e compactadas (30 MPa). Os compactos foram sinterizados a 1.180 °C por 20 min e as espumas resultantes foram analisadas quanto à</p>

	<p>densidade aparente, expansão linear, resistência mecânica à flexão. A microestrutura resultante mostra que a cerâmica celular obtida tem poros fechados e deve apresentar boas características de isolamento térmica, propriedade ainda não analisada, com resistência mecânica adequada ao uso na construção civil em substituição de agregados leves, concreto celular ou polímeros expandidos.</p> <p>Como resultado conseguiram observar que os resíduos estudados podem ser utilizados para a obtenção de cerâmicas celulares de baixa densidade e podem ser utilizadas na indústria da construção civil em substituição ao concreto celular, resultando em estruturas leves e com resistência mecânica aceitável. Com o aumento da adição do resíduo do abrasivo, o material apresentou aumento de porosidade. No entanto, apresentou boa resistência à tração (em torno de 18Mpa).</p> <p>Aparentemente, as espumas obtidas apresentam boa isolamento térmica e acústica. A expansão do produto ocorre pela formação de bolhas, que durante o resfriamento formam poros fechados na microestrutura.</p>
<b>Kummer et al (2007)</b>	<p>Realizaram estudos com o RPP e com resíduo de uma indústria beneficiadora de feldspato.</p> <p>Para reaproveitamento destes resíduos, foram desenvolvidas pesquisas para a fabricação de um produto comercial. Após a caracterização físico-química das matérias-primas, foram preparadas diferentes massas cerâmicas, que foram produzidas em diferentes temperaturas de queima (1100, 1150 e 1200 °C) e com variações das proporções dos constituintes da massa cerâmica: misturando 1:1 (M1); 1:3 (M2) e 3:1 (M3) de resíduo feldspato:porcelanato.</p> <p>Foram realizados ensaios de caracterização dos resíduos empregados. Foram realizadas análises por fluorescência de raios X (FRX) nos resíduos de feldspato, do polimento de porcelanato e da bentonita. Foram realizadas as análises para a determinação de perda ao fogo, do tamanho de partícula (a seco para o feldspato e úmida para a bentonita), da densidade real, do teor umidade, e da cor de queima das matérias-primas.</p> <p>Os autores concluíram que os corpos de prova queimados a temperatura</p>



	<p>de 1100 °C podem ser utilizados pela indústria de revestimento cerâmico para a fabricação de revestimento de paredes. Para os corpos queimados às temperaturas de 1150 e 1200 °C, devido à ocorrência de expansão do material, seria necessário maior tratamento e retificação na peça final. A aplicação desse último material seria em diferentes tipos de revestimentos, como, por exemplo, placas de isolamento térmico e acústico, agregados leves, divisórias ou forros de telhados. Este tipo de aplicação seria interessante devido ao material ter estrutura leve, resultando em economia nas estruturas das edificações.</p>
<p><b>Lorenzi</b> <b>(2005)</b></p>	<p>Propôs o reaproveitamento do resíduo sólido proveniente da estação de tratamento de efluentes líquidos da indústria cerâmica de gres porcelanato na fabricação de tijolos para alvenaria estrutural.</p> <p>Os resíduos e a massa de tijolo passaram por análises físicas e químicas. Os ensaios realizados foram retração linear de secagem e de queima, densidade aparente seco e queimado, resistência mecânica seco e queimado, absorção de água, perda ao fogo, colorimetria, resistência à compressão, dilatação térmica, lixiviação, solubilidade e difração de raio x.</p> <p>Formulações foram realizadas com adição de 0 a 70% de resíduo, queimadas a temperaturas de 900°C, 950 °C, 1000°C, 1050°C e 1100°C.</p> <p>Obteve como resultado satisfatório a incorporação de até 5% do resíduo em massa cerâmica, com aumento na resistência mecânica.</p> <p>Além disso, o autor fez uma análise de custos, onde concluiu que se a empresa fizer o reaproveitamento de todo o resíduo gerado, teria uma economia na ordem de quase R\$ 30.000,00 ao ano que é gasto com seu descarte e a fábrica de tijolos teria um ganho de quase R\$ 17.000,00 ao ano em sua produção.</p>

### 2.3 Concreto Auto Adensável (CAA)

Apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo, atualmente não se pode mais considerar apenas o estudo de concretos convencionais

(CCV). O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais, como os concretos de alta resistência, de alto desempenho, auto adensáveis, com fibras, com altos teores de adições pozolânicas, aparentes, coloridos, brancos e sustentáveis, entre outros (TUTIKIAN, 2008).Dentre eles, o concreto auto-adensável vem se destacando com ótimas características para o desenvolvimento tecnológico de concretos mais sustentáveis(GOMES et al., 2003).

O Concreto Auto Adensável (CAA) surgiu no Japão na década de 80 pelas mãos do Professor HajimeOkamura (Tutikian, 2008). Trata-se de um concreto capaz de moldar-se nas fôrmas por conta própria e preencher, sem necessidade de vibração. A alta fluidez do CAA é alcançada com a utilização de Aditivos Plastificantes e Superplastificantes e a moderada viscosidade e coesão entre suas partículas é conseguida com o incremento de um percentual adequado de adição de granulometria muito fina. Além disto, segundo Lisboa (2008), um maior volume de pasta, um menor diâmetro característico máximo do agregado graúdo, são importantes para obtenção de CAA.

Rigueira Victor et al (2004) afirmam que a utilização dos concretos auto adensáveis,desde que foi proposto por Okamura em 1986, ganha espaço no mercado da construção civil. Maior rapidez na execução, menor demanda de pessoal no processo de concretagem, a possibilidade de fabricar elementos complexos e densamente armados e melhoria das condições de trabalho, devido à redução de ruído diante da ausência danecessidade de vibração, são apenas algumas das vantagens citadas de sua utilização.

A obtenção de um concreto auto-adensável, exige uma dosagemmais complexa do que a dos concretos utilizados no dia a dia, como também requer ensaios de caracterização não convencionais. Ainda que os componentes deste concreto sejam os mesmos que os de um concreto tradicional, as proporções utilizadas em sua dosagem são distintas, principalmente no que se refere ao conteúdo de finos, imprescindíveis para evitar os riscos de segregação (DINIZ, 2005).

Como o CAA foi idealizado para possuir a propriedade de preencher formas com ferragens altamente densas, minimizando problemas de vazios oriundos do lançamento, eles devem ser altamente fluidos e homogêneos. Ao contrário de concretos convencionais, onde o fator água/cimento e a trabalhabilidade são os parâmetros principais, as dosagens destes concretos fluidos requerem uma avaliação criteriosa de diversos parâmetros que lhes conferem a propriedade auto adensável,

tais como: teor de finos, para lhes dar coesão, dosagem e compatibilidade de superplastificante com o aglomerante, e o percentual de pasta no concreto.

Segundo Taylor (1997), a adição de materiais finos no Concreto Auto Adensável (CAA), melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água. Obtém-se, assim, ganhos de resistência nas primeiras idades da mesma forma que, ao aumentar o pacote de partículas finas, cresce a compacidade da pasta, dificultando a penetração de agentes externos agressivos, melhorando a zona de transição.

A adição de finos no CAA abre espaço para o uso de resíduos industriais, o que contribui positivamente para tecnologia sustentável do concreto. Considerando que tal utilização represente uma ação alternativa de redução no consumo de cimento e agregados, preservando os recursos não-renováveis e diminuindo o impacto negativo ao meio ambiente, estes concretos são um apoio ao desenvolvimento sustentável. Neste sentido vários estudos têm desenvolvido concretos com elevado volume de subprodutos industriais, como nos mostra a tabela 2.2.

Tabela 2.2: trabalhos com uso de adições em CAA

AUTOR/ANO	TRABALHOS
<b>Alencar (2008)</b>	<p>Produziu CAA em diversos traços, com dois níveis de auto adensabilidade, onde usou a adição de metacaulim (em substituição ao cimento) e filler calcário (em substituição ao agregado miúdo), para resistências entre 50-70MPa.</p> <p>O autor buscou propor uma nova metodologia de dosagem de CAA, considerando duas inovações: correção da coesão e incorporação de ensaios de trabalhabilidade. Também observou os cuidados específicos para a produção do CAA, analisando aspectos de produtividade e viabilidade de implantação.</p> <p>O trabalho conseguiu identificar que para elevados teores de adição, os parâmetros reológicos começam a aumentar, por causa do aumento de superfície sólida com alta área específica. Identificou-se também, um</p>

	<p>ganho de resistência aos 28 dias nos traços com adição.</p> <p>Com isso, o autor concluiu a grande vantagem de produção do CAA com adições minerais.</p>
<b>Silva (2008)</b>	<p>Em seu trabalho, o autor propôs a produção de CAA usando quatro dosagens, das quais, duas usavam finos (metacaulim). O que diferenciava essas duas dosagens era o uso de Aditivo Moderador de Viscosidade.</p> <p>Para os traços com adição de finos, o autor concluiu que além de ser economicamente viável, apresentaram as seguintes características: redução do consumo de cimento (em torno de 22% para o CAA sem uso de moderador de viscosidade). Para completar a análise econômica, o autor avaliou o custo, em reais por MPa e constatou a vantagem econômica do uso do CAA.</p> <p>A adição pozolânica contribuiu para que os traços apresentassem elevada resistência mecânica e quando usados com Aditivos Moderadores de Viscosidade apresentaram ganho de coesão para teores menores de argamassa.</p>
<b>Araújo (2007)</b>	<p>Em seu estudo, a autora avaliou as propriedades mecânicas do CAA, realizando substituições parciais da areia natural por finos de pedreira (micaxisto, granito e gnaiss) e substituições parciais do cimento por sílica ativa, metacaulim e pozolana de argila calcinada.</p> <p>Foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido, como: espalhamento, caixa U, teor de ar, massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral e por flexão.</p> <p>Como resultado, observou baixo teor de ar, baixa massa específica, bem como ganho de resistência. Após verificação dos resultados, concluiu a viabilidade da utilização de diferentes adições na produção de CAA.</p>

<p><b>Gomes et al (2006)</b></p>	<p>Os autores afirmam que os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto estão relacionados com a permeabilidade do concreto às substâncias agressivas presentes em nossa atmosfera e que a penetração destas substâncias na estrutura interna do concreto é facilitada quando sua porosidade, é alta e ressalta que um dos caminhos que tem sido usado para diminuir esta porosidade é proporcionar ao concreto, um bom adensamento que atua na formação de uma microestrutura mais densa com menos vazios.O CAA proporciona uma estrutura menos permeável comparada com a do concreto convencional.</p> <p>Nesse mesmo estudo, verificaram algumas características de durabilidade em cinco tipos de concreto, três convencionais, sendo dois com e um sem inibidor de corrosão, e dois autoadensáveis. Para cada concreto eles estudaram a absorção e índice de vazios e permeabilidade ao ar pelo método de Figg.</p> <p>Como resultados, os concretos autoadensáveis apresentaram melhor comportamento em relação às propriedades de durabilidade avaliadas. No estado endurecido, os concretos autoadensáveis apresentaram maiores resistências à compressão, nas idades de 07 e 28 dias, quando comparados com os concretos convencionais com mesma relação água/cimento. O Concreto auto adensável com adição de finos apresentou maior resistência e melhores propriedades de durabilidade.</p>
<p><b>Cavalcanti (2006)</b></p>	<p>Produziu concreto auto adensável com adição mineral do resíduo de serragem de mármore e granito e suas propriedades mecânicas foram determinadas e comparadas com as de um concreto convencional e de outros CAA.</p> <p>Diferentes métodos de moldagem em corpos de prova cilíndricos com o CAA também foram analisados, a fim de verificar sua autoadensabilidade. Como resultado verificou-se a redução na dimensão máxima característica das partículas do aditivo mineral que modificou de forma considerável as propriedades do CAA,principalmente no estado fresco. O uso de finos passante na peneira com malha de abertura de 300 <math>\mu</math>m melhorou as propriedades de auto adensabilidade do CAA obtido, com comparadas às propriedades alcançadas no CAA com finos passante na peneira de 600 <math>\mu</math>m,principalmente com relação à coesão da mistura.</p>

<b>Diniz (2005)</b>	<p>O autor estudou a utilização de resíduos de cerâmicas vermelhas e pó calcário, caulim, sílica ativa e outros resíduos industriais na produção compostos cimentícios auto adensáveis.</p> <p>No estudo avaliou a interação de diversos tipos de cimentos presentes no mercado com os aditivos superplastificantes.</p> <p>Obteve para tal, o esqueleto granular com os agregados, optando pela maior massa unitária e menor índice de vazios. Como resultado obteve dosagens de concretos com resistência de 48 MPa para o CAA com adição de 40 % de pozolana de resíduo de tijolo moído, de 45 MPa para o CAA com adição de 40 % de pó calcário e de 62 MPa para o CAA com 30 % de adição de pó calcário e 10 % de sílica ativa aos 28 dias. Os concretos com maiores resistências também foram os que apresentaram menor índice de vazios e absorção.</p>
<b>Jerônimo (2014)</b>	<p>A autora estudou a durabilidade de concretos com adição de Resíduo de Telha Moída (RTM) em substituição ao cimento, com foco na corrosão de armaduras (cloretos e carbonatação). O trabalho foi realizado com concreto convencional com 10, 20 e 30% de substituição do cimento pelo RTM nos traços (aglomerante: materiais secos) 1:3,18; 1:4,11; Foram também analisados concretos autoadensáveis (CAA) com traço de 1:3 e 20%, 30% e 40% de substituição de resíduos, além dos traços sem resíduos usados como referências. Como resultado a autora observou que o uso do RTM diminuiu o índice de vazios nos traços, porém houve perdas de resistência que alcançaram até 19% aos 90 dias. Os concretos autoadensáveis (CAA) mostraram melhores resultados de resistência apresentando melhoria em todos os traços para a mesma idade dos CCV, atingindo 11% de aumento. Em relação aos ensaios de carbonatação, os concretos com RTM tiveram maiores profundidades de carbonatação do que os concretos de referência, fato explicado pela redução da sua reserva alcalina. Porém, a autora afirma que esse aumento não inviabiliza o uso de concretos com RTM, principalmente para dosagens de menor porosidade e adições em patamares de substituição menos elevados; para a penetração de cloretos o RTM apresentou bom resultado, tanto para os CCV como para os CAA. Embora o RTM tenha diminuído o teor crítico de cloretos, ele aumentou o tempo necessário à despassivação das armaduras. Fato explicado pelo</p>

	refinamento dos poros e pela maior capacidade de fixação de cloretos.
--	---

Os estudos nos mostram que podemos ter no concreto auto adensável, um material com grande potencial de uso de materiais finos, como o RPP.

## **2.4– Corrosão de armaduras**

Dyer (2015), afirma que a ideia de incorporação do aço em elementos estruturais de concreto foi originada em meados do século 19, com uma patente para a tecnologia concedida a seu inventor, Joseph Monier, em 1867. Após essa invenção foi-se eventualmente, ampliando radicalmente a maneira pela qual o concreto poderia ser usado em estruturas. A alta força de tensão e ductilidade do aço transformaram um material que só poderia receber esforços de compressão, em um outro que pode ser usado em tensão de flexão. No entanto, uma das desvantagens do aço como material estrutural é a sua suscetibilidade à corrosão.

Corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química e eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração (RIBEIRO, 2014). Definida pela ASTM G15-99b como sendo uma reação química ou eletroquímica entre um material, em geral um metal, e o seu meio ambiente, que produz uma deterioração do material e suas propriedades. É a forma mais destrutiva de deterioração do concreto armado e é uma das grandes responsáveis pela deterioração das estruturas.

A corrosão de armaduras em estruturas de concreto se dá por um processo eletroquímico, com a formação de uma célula de corrosão. Segundo Mehta& Monteiro (2008), os potenciais eletroquímicos que formam essa célula de corrosão podem ser gerados de duas formas e uma delas é a formação de células de concentração na vizinhança da armadura devido às diferenças na concentração de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos. Assim, a taxa de corrosão do reforço é fortemente influenciada pela umidade relativa dentro dos poros do concreto e da extensão em que o oxigênio pode acessar a superfície do aço.

O concreto é um material essencialmente alcalino, porque todos os compostos de cálcio que constituem os produtos de hidratação do cimento são alcalinos (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Ele oferece à armadura uma alta alcalinidade, que gira entre

12,5 e 14,0 e, essa condição unida a potenciais de corrosão entre 0,1 e - 0,4 Volts asseguram ao aço a formação de uma película passivadora, camada de óxido altamente impermeável de menos de 1  $\mu\text{m}$  de espessura, que atua como uma proteção adicional a taxa de recobrimento do concreto. Essa proteção adicional garante ao aço uma alta resistência ôhmica, resistência a umidade, ao oxigênio e aos agentes agressivos do meio (CASCUDO, 1997; DYER, 2015). Com isso, a proteção do aço no interior do concreto é assegurada por duas barreiras, uma barreira mecânica – oferecida pelo cobrimento da armadura, e outra química – pH do meio, garantindo a formação e a estabilidade da película passivadora ao redor da armadura.

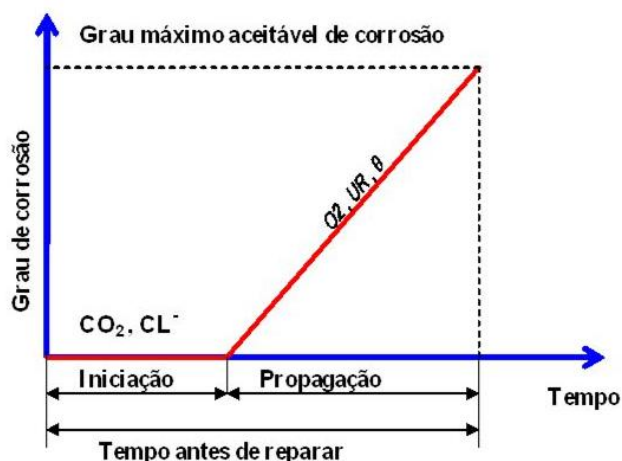
No entanto, esse papel protetor que o concreto desempenha é, por várias razões, finito. Há vários fatores internos e externos que criam essas condições para que ocorra a corrosão de armaduras: carbonatação, redução de pH e ingresso de cloretos (MURALIDHARAN, 2005). Do ponto de vista da durabilidade, qualquer meio com pH menor que 12,5 torna-se prejudicial e pode ser agressivo ao concreto. Isto porque a redução da alcalinidade leva a uma desestabilização dos produtos cimentícios da hidratação (SILVEIRA, 1996).

Um dos fatores que pode levar à destruição dessa camada passiva ao redor da armadura é a presença de íons dissolvidos, sendo os íons de cloreto os de maior preocupação (DYER, 2015). Outro fator que desencadeia o processo de corrosão, é a carbonatação que é uma reação entre os produtos de hidratação do cimento e o dióxido de carbono atmosférico. Os processos de deterioração no concreto desencadeadas por reações químicas, em geral, envolvem interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente.

O processo de corrosão do metal no interior do concreto pode ser explicado através do modelo de previsão de vida útil de estruturas, proposto por Tuutti (1982). Esse modelo (Figura 2.2) consiste em um período de iniciação, onde agentes agressivos como, cloretos e dióxidos de carbono, penetram na estrutura até atingir a armadura, despassivando-a. Esta fase, além das características do concreto, como do tipo de cimento e a porosidade superficial, depende, também do nível de agressividade do meio onde a estrutura está inserida, principalmente, da presença de cloretos e do  $\text{CO}_2$  (FIGUEIREDO & MEIRA, 2011). E, posteriormente, num período de propagação, onde inicia-se o processo de corrosão que irá depender da temperatura, umidade relativa e da solução dos poros onde a armadura está inserida.

Figura 2.2: Modelo de Tuutti para corrosão de armaduras

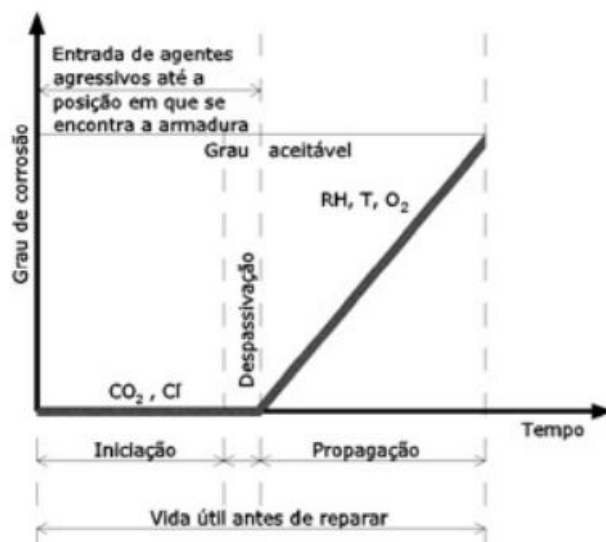




Fonte: Figueiredo & Meira, 2011

Figueiredo e Meira (2011), propuseram um ajuste ao modelo de Tuutti (1982), considerando que o momento da despassivação envolve alterações eletroquímicas na superfície do aço e que essas alterações demandam certo tempo para que o início da corrosão ocorra de forma consistente. Com isso, eles introduziram uma fase intermediária, denominada fase de despassivação (Figura 2.3), em que os autores propõem que ocorre a partir do momento em que o aço é despassivado, quando ocorrem as reações eletroquímicas em sua superfície, demandando certo tempo para iniciar de fato o processo de corrosão, a partir desta proposta, o modelo passa a ter três fases: iniciação, despassivação e propagação.

Figura 2.3 - Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras – modelo ajustado.



Fonte: FIGUEIREDO; MEIRA, 2011, p.909

Segundo a NBR 6118, um dos mecanismos preponderantes de deterioração, relativo a armaduras, é a despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto). O vergalhão de aço dentro de estruturas de concreto é susceptível a corrosão quando a permeação de cloretos em sua superfície excede um teor crítico. Em zonas litorâneas a situação de agressão às estruturas de concreto armado se agrava, devido a existência da névoa salina que leva esses íons até certa distância (MEIRA, 2004).

Os danos resultantes da corrosão em estruturas de concreto armado se manifestam em forma de expansão, fissuração e eventual lascamento do concreto de cobrimento (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Esses danos podem causar, além da perda de aderência entre o concreto e o aço, a perda de área de seção transversal da barra. O produto resultante da corrosão ocupa um volume maior do que o aço não corroído. Esta expansão cria tensões de tração no concreto, o que pode, eventualmente, causar rachaduras e fragmentação.

Pelos danos causados, essa manifestação patológica aparece como a terceira maior patologia em incidência em estruturas de concreto armado, conforme levantamento efetuado por GEHO em 52 províncias espanholas. Na análise de 844 casos, a corrosão foi a causa de 15% do total de manifestações patológicas encontradas, somente atrás das fissuras (62%) e das deformações excessivas (22%) (RIBEIRO, 2014). Dados desse mesmo autor, nos informa que o comitê *Concrete Durability* afirmou que em 1987, o valor de todos os edifícios e estruturas de concreto dos Estados Unidos alcançava a cifra de 6 trilhões de dólares. Em relação a esse

volume de recursos, os custos de reparos podem ser estimados em 50 bilhões de dólares/ano.

No Brasil, levantamento efetuado por Dal Molin (1988) no Rio Grande do Sul, mostra que, se por um lado, a incidência de corrosão de armaduras gira em torno de 11% das manifestações patológicas encontradas, por outro lado, esse valor atinge o patamar dos 40% de custo, quando analisada segundo a gravidade e implicação na segurança estrutural. Em estudo realizado por, Meira e Padaratz (2002) foi observado que os investimentos em intervenções de manutenção, em uma estrutura com alto grau de deterioração, podem chegar a aproximadamente 40% dos custos de execução do componente degradado.

A ocorrência de corrosão de armaduras implica em um custo adicional significativo, seja para substituir o material corroído, seja como consequência das perdas indiretas causadas pela corrosão, como a necessidade de manutenção, reforço ou reparo estrutural. Por se tratar de uma manifestação patológica tão incidente em estruturas e por seu elevado custo de reparação, há uma preocupação para que, dentro da linha de estudos e de pesquisas sobre alternativas construtivas sustentáveis e socialmente mais responsáveis haja, também o conhecimento da corrosão das armaduras como ferramenta para o desenvolvimento de novos produtos e para o reaproveitamento de resíduos industriais, como no caso dos Resíduos provenientes do polimento das peças de porcelanato.

#### **2.4.1 – Corrosão causada por cloretos**

Devido às suas interações com o ambiente onde estão expostas, as estruturas de concreto sofrem alterações que podem, ao passar do tempo, comprometer a sua estabilidade e a sua funcionalidade. A ruptura dessa proteção desencadeia um processo de deterioração na estrutura.

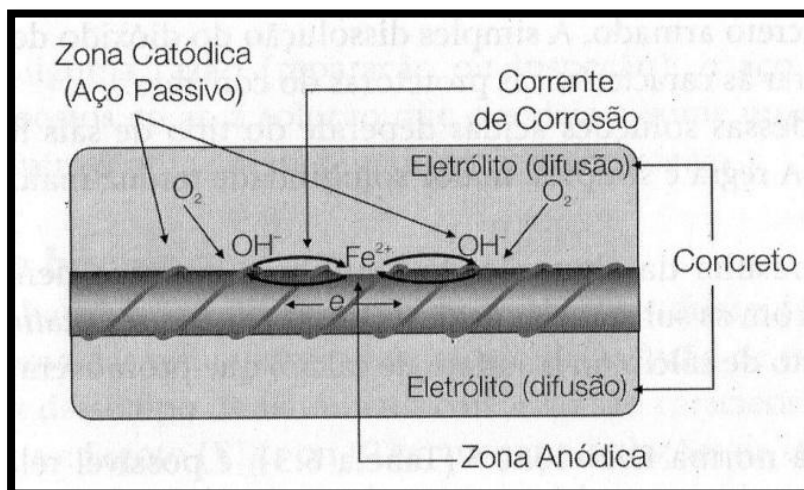
Um dos mecanismos que podem causar essa ruptura é a contaminação do concreto de cobrimento pelo ingresso de cloretos. De todos os fatores, a contaminação por cloreto é, provavelmente, o mais crítico, uma vez que já foi observada que é a forma mais intensa e prejudicial para a integridade da estrutura de concreto (SARASWATHY, 2003).

Segundo Ribeiro (2014) a corrosão, na verdade, é causada pela ação de um agente oxidante como o oxigênio e o hidrogênio que, ao entrar em contato com a superfície do metal, passa a receber elétrons, ocorrendo, assim a reação de redução. Os elétrons consumidos na reação de redução, que ocorre no cátodo, são fornecidos

pela reação de oxidação do metal, que atua como um eletrodo (material no qual ocorre a transferência de elétrons). Quando o metal sofre oxidação, perde elétrons e se transforma em um cátion, que se desprende da estrutura metálica passando, assim a ocorrer a dissolução do metal.

Portanto, para que ocorra a corrosão, deve haver um eletrólito, que será o meio que permitirá a dissolução e movimentação dos íons ao longo das regiões anódicas e catódicas na interface entre a superfície do aço e a matriz porosa do concreto. Deve haver uma diferença de potencial – em solução, parte dos átomos do ferro tendem a se transformar em cátions de ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), com carga positiva, deixando a armadura com carga negativa, que na presença de reagentes capazes de sofrer redução, ou seja, capazes de combinar com o elétron liberado na reação de formação de íon ferroso, pode-se formar uma célula de corrosão eletroquímica. Deve existir oxigênio para que haja a transformação do hidróxido de ferro. Para que isso progrida de forma acelerada, a microestrutura em torno do aço deve permitir o movimento desses íons e, os níveis de umidade presentes devem ser suficientemente altos. Toda corrosão do aço à temperatura ambiente em meio aquoso é de natureza eletroquímica, onde se pressupõe a existência de uma reação de oxi-redução e a circulação de íons em um eletrólito.

Figura 2.4: Representação gráfica de pilha eletroquímica.



Fonte: Ribeiro et al (2014).

Para que a corrosão da armadura tenha início é necessário que agentes agressivos capazes de destruir a camada passivadora atravessem o concreto de cobrimento e alcancem a armadura em concentrações suficientes para provocar a sua

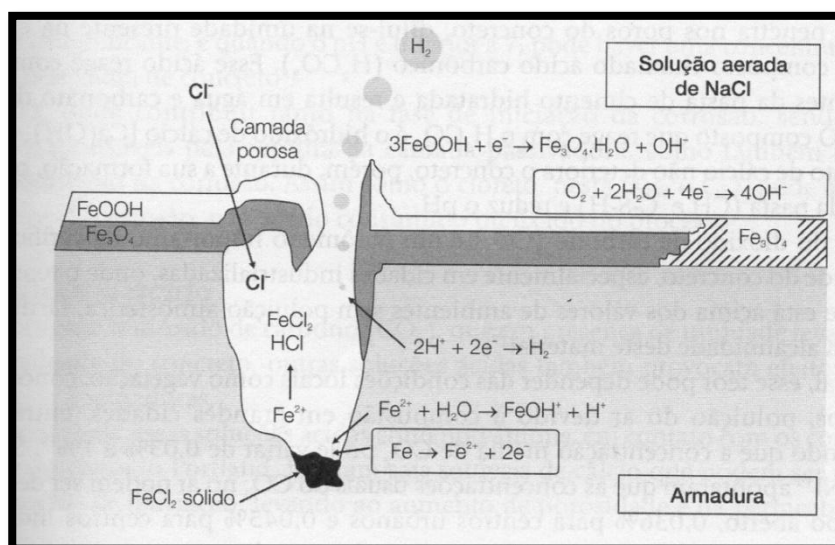
despassivação. Os processos eletroquímicos envolvidos na corrosão exigem o transporte de íons através da solução. A corrosão que ocorre na armadura de aço, assim como a maioria dos processos de corrosão, caracteriza-se pela transferência de elétrons e íons entre duas regiões distintas do metal, sendo denominada de corrosão eletroquímica.

Na armadura, a corrosão pode ser tanto uniforme, quando ocorre uniformemente ao longo da armadura, como localizada, em uma determinada área. Essa corrosão localizada é denominada de pite e é considerada o tipo mais grave de corrosão. É causada, principalmente pela ação de íons cloretos que atacam a armadura pontualmente deteriorando, significativamente, as propriedades mecânicas da armadura de aço.

A corrosão por pite é localizada, caracterizada pela formação de um pite, que é uma cavidade. Um dos íons causadores da corrosão por pite é o íon cloreto  $\text{Cl}^-$ . O pequeno diâmetro dos íons cloretos os torna capazes de penetrar com relativa facilidade através do filme de óxido, o que os torna mais agressivos. Esse sal age de forma localizada, causando o rompimento do filme de forma pontual e causando a corrosão por pite. Após o rompimento da película passivadora pelos íons cloretos, esses ainda atuam no processo sob a forma de catalisadores da corrosão.

Esse tipo de corrosão causa uma perda de massa em regiões específicas. Segundo Ribeiro (2014), a presença do pite causa também um efeito altamente prejudicial às propriedades mecânicas do material metálico ao atuar como sítio amplificador de tensões e que pelo fato do pite atuar como um sítio nucleador de trincas causa também uma diminuição significativa da resistência à fadiga do material metálico. Portanto, além da corrosão por pite causar perda de massa, também pode causar efeitos em suas propriedades mecânicas.

Figura 2.5: Representação esquemática da corrosão por pite devido aos íons cloretos (iniciação e propagação).



Fonte: Ribeiro et al (2014)

Os íons cloretos podem ser adicionados involuntariamente a partir de aditivos aceleradores de pega, agregados e água contaminada ou de tratamentos de limpeza, sais de gelo-degelo ou ambientes de atmosfera marinha. Outros fatores que podem influenciar a penetração dos cloretos no concreto estão relacionados às características ambientais ou aos concretos estudados, como a temperatura e umidade, tipo de cimento (devido a quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  em sua composição, pois o  $\text{C}_3\text{A}$  pode combinar-se com íons cloreto para formação de cloro-aluminato de cálcio hidratado, diminuindo a quantidade de cloretos livres disponíveis), relação água/cimento e emprego de adições.

Meira et al 2007, constataram uma diferença no aumento de conteúdo de cloretos livres em concretos com diferentes cimentos, onde o cimento com maior quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  apresentou um aumento de concentração de cloretos mais lento ao longo do tempo. Oh e Jang (2007), observaram em seu trabalho que a umidade e a temperatura afetam bastante a penetração de cloretos, pois a temperatura mais elevada provoca maior penetração de cloretos e a umidade relativa do ar mais alta provoca maior acúmulo de cloreto, pois os íons movimentam-se na água dos poros do concreto. Andrade (1993), afirma que ao estarem com os poros do concreto totalmente saturados, os cloretos penetram apenas pelo mecanismo de difusão, neste caso alimentado pela diferença de concentração. A difusão ocorre devido a gradientes de concentração iônica. Estas diferenças nas concentrações de cloretos provocam o movimento dos íons para que haja um equilíbrio.

Os cloretos podem estar presentes no concreto na forma de cloretos livres ou totais. Ribeiro et al (2014), afirma que o cloreto pode se apresentar em três formas: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico, formando cloroaluminato de cálcio; adsorvido fisicamente na superfície dos poros; e sob a forma de íons livres na solução contida nos poros. Esses cloretos livres são os que, efetivamente, potencializam o processo corrosivo. São potencialmente prejudiciais, porque, em determinadas quantidades podem iniciar o processo corrosivo das armaduras. O teor crítico de cloretos pode ser definido como a quantidade de cloretos para iniciar o processo de corrosão (SCHIESSL, 1990). É uma influência importante sobre o tempo de vida útil das estruturas de concreto expostas a ambiente com cloretos (SONG, 2007).

Apesar da importância, ainda não existe um método padrão para ensaio, nem um valor de concentração de cloretos definido como o que despasse a armadura no concreto. A ABNT 12655 – 1996 estabelece um valor menor ou igual a 0,15% em relação à massa de cimento para concreto armado em ambientes com cloretos, menor ou igual a 0,40% em relação à massa de cimento, em ambiente seco ou protegido da umidade, menor ou igual a 0,05% em relação à massa de cimento para concreto protendido e menor ou igual a 0,03% em relação à massa de cimento para outros tipos de construção em concreto armado.

Muralidharan et al(2005), afirmam que se a relação entre cloretos livres e o hidróxido for superior a 0,6 a corrosão será iniciada. Segundo Andrade (1993), o tempo necessário para que esses íons alcancem a armadura depende do mecanismo de intrusão, da concentração externa de cloretos e da microestrutura do concreto. SyedHussain et al (1996), em pesquisa onde avaliaram três amostras de argamassas armadas confeccionadas com três tipos de cimento, relataram a importância da determinação do teor crítico de cloreto em estruturas de concreto armado.

A variação no teor crítico de cloretos encontrados na literatura é devida às diferenças nas definições de teor crítico e nas diferentes técnicas aplicadas para encontrar esse valor. Angst e Vennesland (2009), após avaliarem alguns trabalhos encontrados na literatura recomendam ensaios eletroquímicos para detectar a despassivação das armaduras.

Neste trabalho avaliamos o efeito do empacotamento de partículas na composição do traço de concreto com uso de RPP e o teor crítico de cloretos para desencadear o processo de corrosão.





## CAPÍTULO III

---

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentam-se a seguir os materiais empregados neste trabalho e a metodologia que foi utilizada.

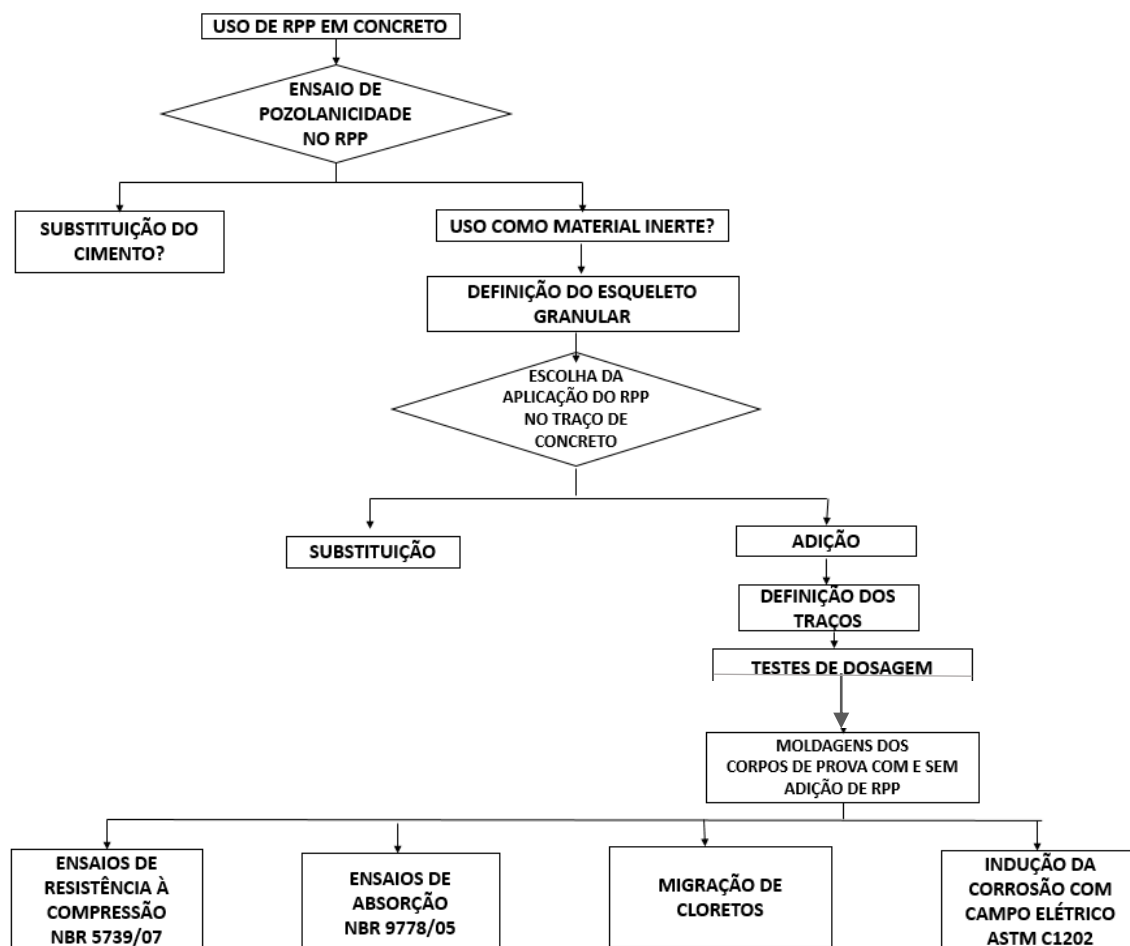
O planejamento experimental inclui a realização de uma sequência de etapas que envolvem a seleção dos resíduos e sua caracterização, avaliação da microestrutura de pastas, moldagem e cura dos corpos de prova de concreto, indução da corrosão e monitoramento eletroquímico, avaliação do teor crítico de cloretos e velocidade de transporte.

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Cimento Portland
- Areia média quartzosa
- Brita 0
- Resíduo de Polimento do Porcelanato
- Aditivo plastificante
- Aditivo superplastificante
- Água potável

Na figura 3.1 é apresentado um esquema com a visão geral do trabalho experimental

Figura 3.1: Visão geral do programa experimental



Fonte: autor, 2015

O programa experimental foi iniciado com ensaios para determinar se o resíduo possuía propriedades de pozzolanicidade. Após esses ensaios, optou-se por usá-lo como material inerte e definiu-se o esqueleto granular com o método de empacotamento de agregados. Com essa definição, foram realizados os traços de concreto convencional e auto adensável, bem como as porcentagens de RPP a serem adicionadas aos traços para moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência, absorção, migração e indução da corrosão com campo elétrico.

### 3.1 – Características dos materiais empregados

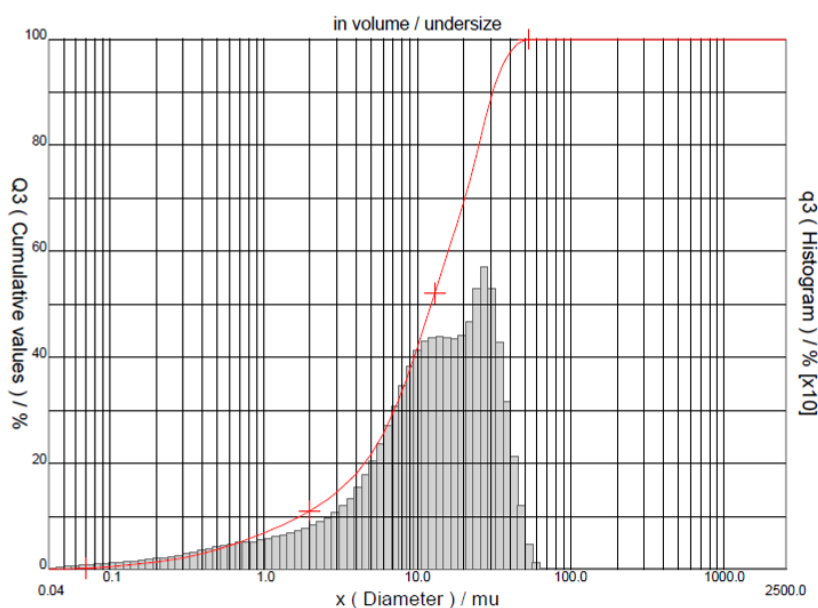
Neste item, são elencados os ensaios feitos para caracterizar os insumos utilizados na preparação do concreto, assim como os ensaios feitos nos concretos endurecidos.

### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CPV - ARI, em sacos de 40kg, fabricado pela empresa MIZU cimentos. A escolha desse tipo de cimento se deu em função das baixas adições no seu processo de fabricação, quando comparado aos que são comercializados na região de estudo.

A figura 3.1 apresenta a granulometria a laser do cimento, realizada no equipamento Malvern Mastersize 2000 V 5.6., onde observamos que o resíduo apresenta um diâmetro médio de  $14.94\mu\text{m}$  e  $D_{10} = 1.72\mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 12,35\mu\text{m}$  e  $D_{90} = 31,18\mu\text{m}$ . Já a tabela 3.1 contém as propriedades físicas, químicas e mecânicas. A caracterização química foi realizada a partir de ensaio de fluorescência de Raios X, empregando o espectrômetro de fluorescência de raios x Rigaku equipado com tubo de Rh, modelo RIX 300. A preparação da amostra para este ensaio se deu da seguinte forma: a amostra foi seca em estufa a  $110^\circ\text{C}$ , colocada em uma cápsula, prensada em prensa hidráulica a 25tf e analisadas semiquantitativamente para alguns elementos leves e pesados. Alguns outros ensaios foram realizados na amostra de cimento, conforme a NBR NM 65:2003 (tempo de pega), NBR NM 76:1998 (área específica - Blaine), NBR 5473:1997 (perda ao fogo) e NBR NM 23:2001 (área específica).

Figura 3.2: Análise da distribuição do tamanho de partículas



Sample Ref	: Cimento 07-03-12	Ultrasounds	: 60	s (+during)
Type produit	: Cimento	Concentration	: 157	
Client	: LEME	Diameter at 10%	: 1.72	mu
Comments		Diameter at 50%	: 12.35	mu
Liquid	: Isopropyl alcohol	Diameter at 90%	: 31.18	mu
Dispersing agent		Mean diameter	: 14.94	mu
Operator	: Malu	Fraunhofer		
Company		Density/Factor		
Location		Specific surface		
Date : 13/03/2012	Time : 14:48:01	Automatic dilution	: No / No	
Index meas.	: 1353	Meas./Rins.	: 60/60/8	
		SOP	: LACER	

Standards classes

in volume / undersize

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Tabela 3.1: Características do cimento utilizado

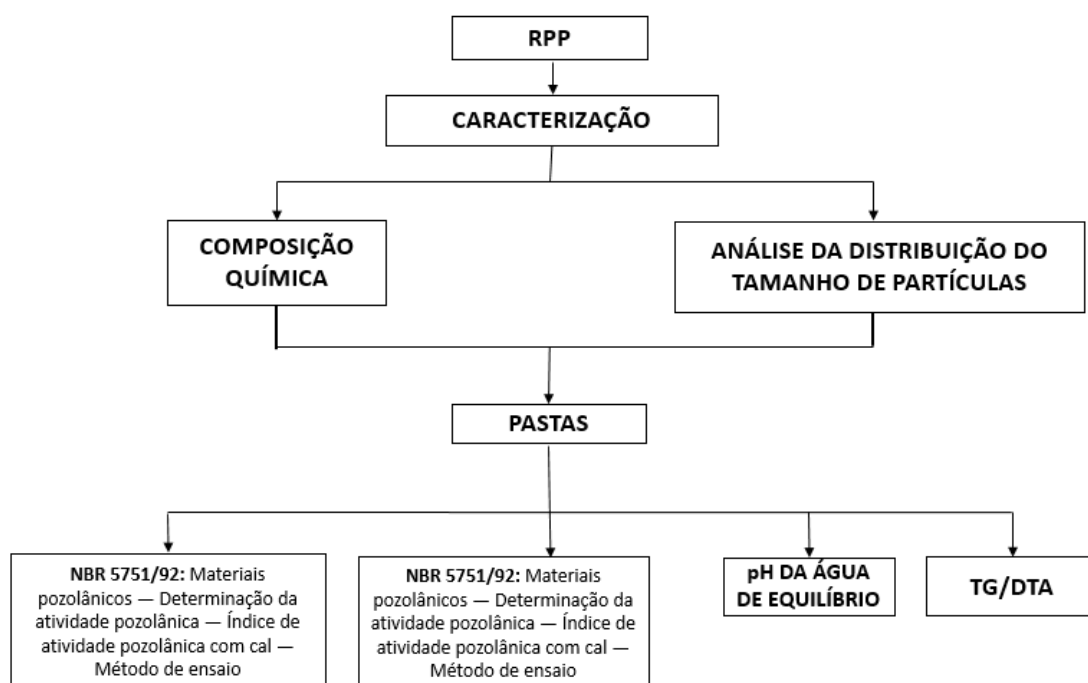
1 – Composição Química		
Ensaio	Resultados (%)	Limites da NBR 5733/91
Perda ao Fogo (PF)	1,15	≤ 4,5%
Dióxido de Silício – SiO <sub>2</sub>	18,96	
Óxido de Alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,92	
Óxido de Ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,95	
Óxido de Cálcio Total - CaO	61,06	
Óxido de Magnésio - MgO	3,08	≤ 6,5%
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	3,19	3,5 a 4,0%
Óxido de Sódio – Na <sub>2</sub> O	0,15	
Óxido de Potássio – K <sub>2</sub> O	1,03	
Anidrido Carbônico – CO <sub>2</sub>		≤ 3%
Resíduo Insolúvel - RI	0,67	≤ 1,0%
Óxido de Cálcio Livre – CaO Livre	2,96	
2 – Ensaio Físicos e Mecânicos		
Ensaio	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Finura – Resíduos na peneira de 75mm (%)	0,1	≤ 8,0%
Finura – Resíduos na peneira de 44mm (%)	2,2	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	
Área específica – Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	402	≥ 300 m <sup>2</sup> /kg
Água da pasta de consistência normal (%)	29	
Tempo de início de pega (h:min)	02:40	≥ 1h
Tempo de fim de pega (h:min)	03:18	≤ 10
Expansibilidade de Le Chatelier a quente (mm)	0,56	≤ 5 mm
Resistência à compressão na idade de 1 dia (MPa)	20	≥ 14 MPa

Fonte: dados da pesquisa, 2015

### 3.1.2 Resíduo de Polimento do Porcelanato - RPP

O resíduo de polimento do Porcelanato foi obtido na Fábrica de Porcelanatos Elizabeth, localizada na Rod. BR 101, Km 98, Distrito Industrial – Conde/PB. A figura 3.3 apresenta o fluxograma de ensaios realizados com o RPP.

Figura 3.3: Fluxograma dos ensaios com o resíduo



Fonte: autor, 2015

O RPP é constituído parte pelo material constituinte da cerâmica e parte pelo material usado nas peças abrasivas para o polimento. Marques *et al* (2007), constataram em seu trabalho que o RPP é constituído predominantemente por sílica, alumina e óxido de magnésio, sendo a sílica o constituinte principal e que as fases cristalinas presentes no resíduo são quartzo, mulita, periclase e carbeto de silício.

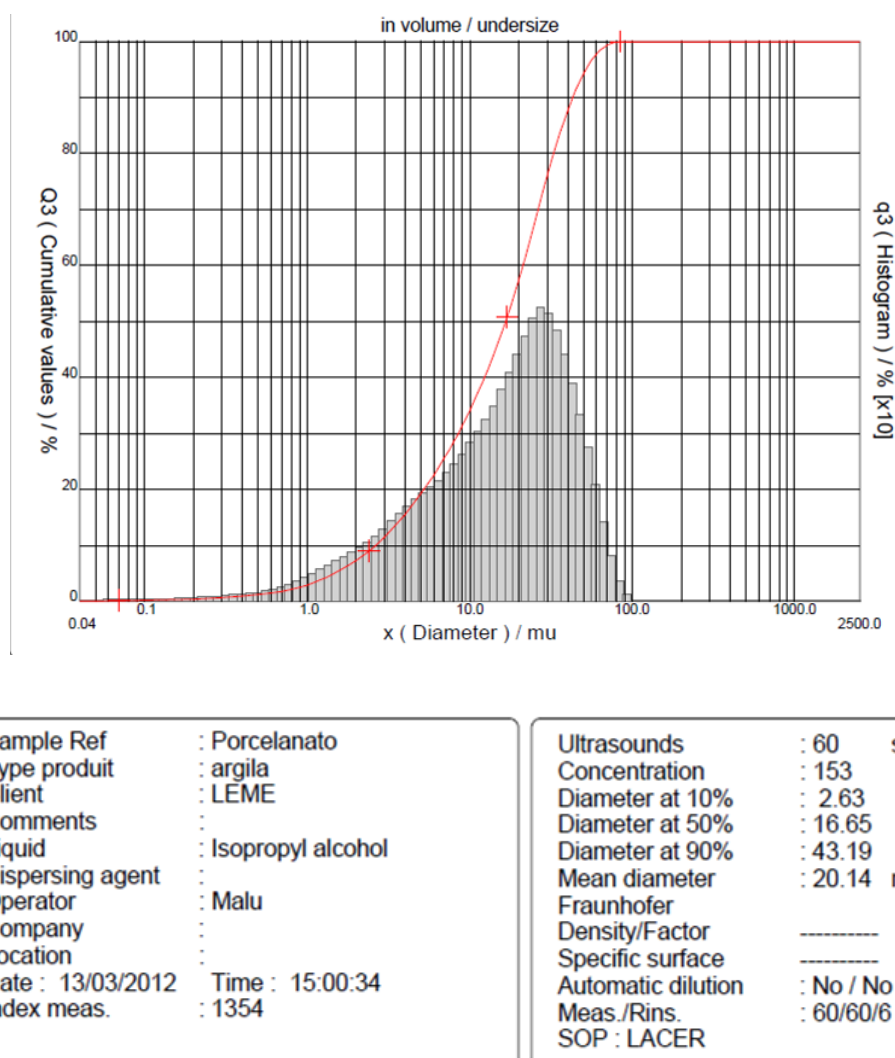
O resultado é um póesbranquiçado comum com a granulometria fina e composição química variada. A seguir temos os resultados de granulometria a laser (tabela 3.2) e a caracterização química (figura 3.4) realizadas no material. O resíduo apresenta um diâmetro médio de 20.14 $\mu\text{m}$  e  $D_{10}$ :2.63 $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$ :16,65 $\mu\text{m}$  e  $D_{90}$ :43,19 $\mu\text{m}$ . A granulometria a laser e os ensaios de fluorescência de raios X seguiram os mesmos procedimentos adotados para a caracterização do cimento.

Tabela 3.2 - Composição química do resíduo do porcelanato

<b>Componentes</b>	<b>RPP (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	62.1488
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.4163
MgO	10.4066
Na <sub>2</sub> O	3.0556
K <sub>2</sub> O	1.9641
CaO	1.5262
ZrO <sub>2</sub>	1.197
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7461
TiO <sub>2</sub>	0.5049
BaO	0.1
SrO	0.079
MnO	0.0459
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0245
CuO	0.0142
HfO <sub>2</sub>	0.013
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0077
NiO	0.00771
ZnO	0.0067
Rb <sub>2</sub> O	0.0062

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 3.4: Análise da distribuição do tamanho de partículas



Fonte: dados da pesquisa, 2015

### 3.1.2 Agregado miúdo

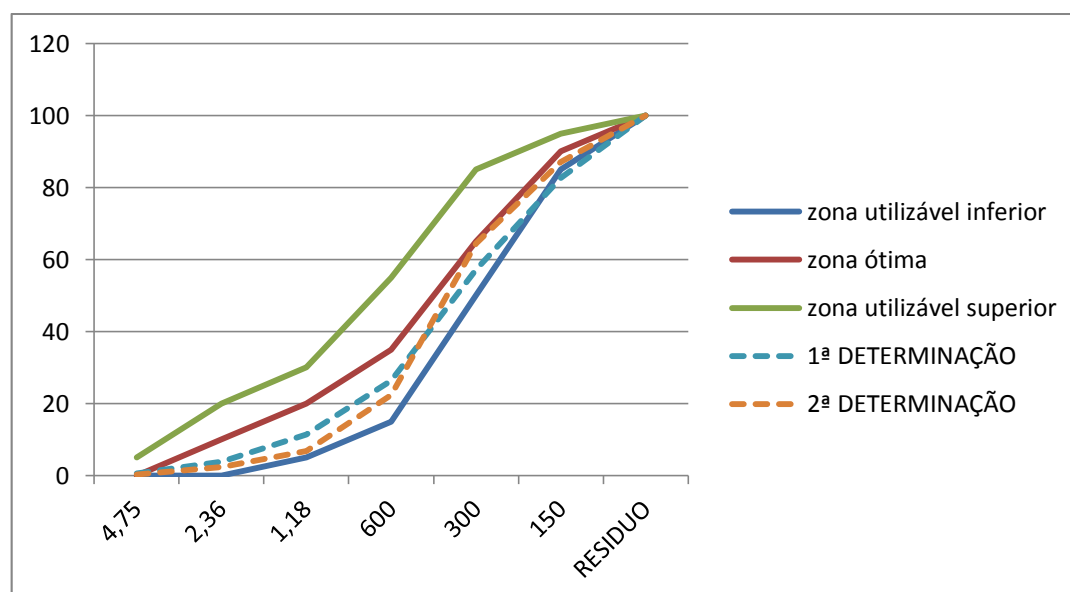
Para caracterização do agregado miúdo foram utilizadas as NBR/NM 248, 45, e 52 (tabela 3.4).

Tabela 3. 4: Ensaio de caracterização do agregado miúdo

<b>NBR 248</b>	Agregados - Determinação da composição granulométrica (Anexos 1 e 2)
<b>NBR 45</b>	Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios
<b>NBR 52</b>	Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura : Curva granulométrica do agregado miúdo e zonas ótimas inferior e superior (NBR 7211)



Fonte: dados da pesquisa, 2015

### 3.1.3 Agregado graúdo

Para a escolha do agregado graúdo, priorizou-se os de formato mais arredondado e com  $D_{\text{máx}}$  o menor possível para facilitar o processo de empacotamento e, conseqüentemente, diminuir a possibilidade de segregação da mistura. Portanto, o agregado graúdo utilizado foi a brita zero (cascalhinho). Para sua caracterização foram utilizadas as NBR/NM 53, 45 e 248.



Tabela 3. 4: Ensaios de caracterização do agregado miúdo

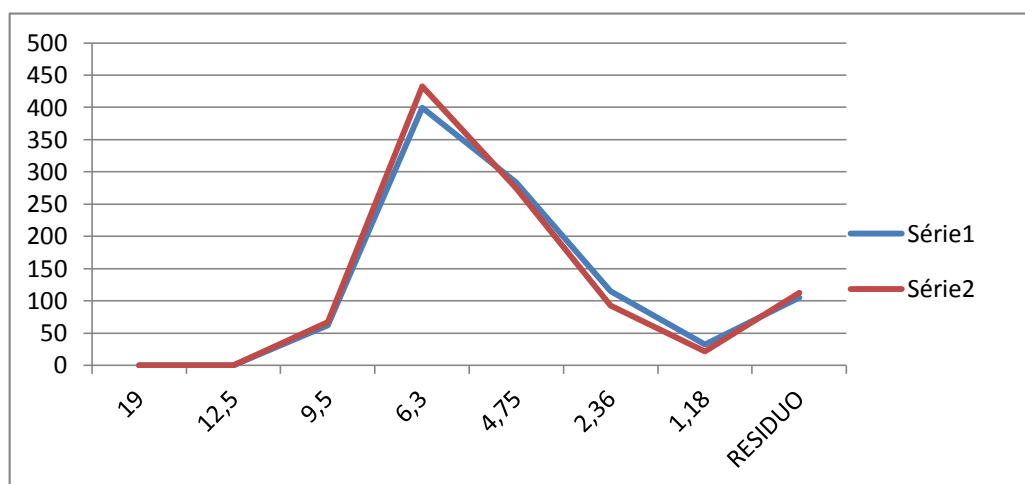
**NBR 248      Agregados - Determinação da composição granulométrica**

<b>NBR 45</b>	Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios
<b>NBR 53</b>	Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente

Fonte: dados da pesquisa, 2015

O diâmetro máximo característico ( $D_{max}$ ) do agregado graúdo em estudo é 9,5 mm.

Figura B: Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: dados da pesquisa, 2015

São apresentados na tabela 3.5, os resultados dos ensaios para caracterização dos agregados miúdos e graúdos.

Tabela 3.5: Dados granulométricos dos agregados miúdo e graúdo

ENSAIO	AGREGADO GRAUDO	AGREGADO MIUDO	RPP
<b>SAT. SUPERFÍCIE SECA (NBR 53 e 52)</b>	2,53 g/cm <sup>3</sup>	2,63 g/cm <sup>3</sup>	2,68 g/cm <sup>3</sup>
<b>MASSA ESPECÍFICA</b>	1,67 g/cm <sup>3</sup>	1,53 g/cm <sup>3</sup>	2,2 g/cm <sup>3</sup> .
<b>MASSA ESPECÍFICA APARENTE (NBR 53 e NBR52)</b>	2,61 g/cm <sup>3</sup>	2,4g/cm <sup>3</sup>	2,1 g/cm <sup>3</sup>
<b>MASSA UNITÁRIA (NBR 45)</b>	1,57 g/cm <sup>3</sup>	1,41 g/cm <sup>3</sup>	1,32 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: dados da pesquisa, 2015

### 3.1.4 Aditivo Plastificante

O aditivo plastificante utilizado nas moldagens foi o MIRA 93 do fabricante Grace ConstructionProducts.

### 3.1.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo plastificante utilizado nas moldagens foi o ADVA 585 do fabricante Grace ConstructionProducts. É um superplastificante de última geração. Sua densidade é de 1,10 g/cm<sup>3</sup> e a dosagem recomendada é de 0,3 a 0,6% quando combinado com polifuncional e 0,6% a 1,2% quando utilizado sozinho.

### 3.1.6 Armadura

A armadura utilizada para as moldagens dos corpos de prova empregados ensaios de indução acelerada da corrosão com cloretos foi o aço CA – 50, bitola 6,3mm, fabricação da Gerdau Aço norte. Todas as barras foram de um mesmo lote. A tabela 3.6 apresenta a composição química e as características mecânicas do aço.

Tabela 3.6: Características da armadura utilizada

Características	Aço CA 50	Limite (NBR 7480:07)
<b>Composição química</b>		
<b>Fe</b>	98,483	-
<b>Ca</b>	0,481	-
<b>P</b>	0,017	-
<b>S</b>	0,015	-
<b>Si</b>	0,223	-
<b>Mg</b>	0,76	-
<b>Outros</b>	0,021	-
<b>Massa (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	0,247	0,228 a 0,262

<b>Resistência característica ao escoamento - <math>f_y</math> (Mpa)</b>	500	500
<b>Limite de resistência (Mpa)</b>	540	540
<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	298,7	-

Fonte: dados da pesquisa, 2015

### 3.2 – Métodos para análise da influência do RPP em pastas

A partir dos fluxogramas apresentados no item 3.1 foram realizados ensaios para determinar o uso do RPP na dosagem de concreto.

#### 3.2.1 – Ensaios de pozolanicidade com o resíduo do polimento de porcelanato

No intuito de verificar se havia algum potencial pozolânico no resíduo, foram realizados ensaios de pozolanicidade. Para esses ensaios utilizamos as normas NBR 5751/92 - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal e a NBR 5752/92 Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento (figura 3.5).

Figura 3.5: corpos de prova para ensaios de pozolanicidade



Fonte: arquivos do autor, 2015

#### 3.2.2 – Confeção de pastas contendo resíduo e cimento

Para as análises do pH da água de equilíbrio e as análises de TG/DTA foram confeccionadas pastas contendo resíduo e cimento (tabela 3.7) nas seguintes proporções:

Tabela 3.7: Composição das pastas cimentícias

<b>PASTA</b>	<b>RELAÇÃO a/c</b>
<b>Referência (cimento)</b>	0,35
<b>Cimento + 10% de adição de RPP em relação à massa do cimento</b>	0,35
<b>Cimento + 20% de adição de RPP em relação à massa do cimento</b>	0,35
<b>Cimento + 30% de adição de RPP em relação à massa do cimento</b>	0,40
<b>Cimento + 40% de adição de RPP em relação à massa do cimento</b>	0,40

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Todas as misturas foram realizadas manualmente. Após vinte e quatro horas as pastas foram retiradas dos moldes e mantidas em cura, submersas, para evitar carbonatação até as datas de ensaio, quando eram quebradas e transformadas em pó.

### 3.2.3 – Análise Termogravimétrica e Térmica-diferencial

A análise termogravimétrica (TG) e a análise térmica-diferencial (DTA) determinam a perda de massa de uma amostra em função da elevação da temperatura, enquanto esta é submetida a uma programação controlada. Esses ensaios foram realizados para determinar, também, a pozolanicidade do RPP, a partir do consumo do hidróxido de cálcio do cimento. Foi feita uma análise comparativa entre o consumo do hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das amostras.

Os ensaios foram realizadas no Laboratório de Combustíveis (LACOM) da Universidade Federal da Paraíba, utilizando o analisador térmico simultâneo da Shimadzu (figura 3.7). Foram utilizadas 10g de amostras para cada análise, sob fluxo de Nitrogênio.

As análises de TG e DTA permitem observar que os produtos hidratados perdem a água quimicamente combinada em picos característicos. A desintegração do hidróxido de cálcio pode ocorrer entre 425-455°C e do carbonato de cálcio entre 500-700°C. A partir do gráfico da termogravimetria diferencial em função da

temperatura (DTA) foram identificados os limites das parcelas de perda de massa referentes à desintegração do  $\text{Ca(OH)}_2$ , do  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$ .

Figura 3.7: Aparelho de análise térmica



Fonte: arquivos do autor, 2015

Para calcular o teor de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio nas amostras foram utilizadas as equações usadas por Pilar (2012). A Equação 3 relaciona a massa molecular do hidróxido de cálcio à massa molecular da água, de forma análoga, a Equação 4 relaciona a massa molecular do carbonato de cálcio à massa molecular do  $\text{CO}_2$ .

$$\text{Ca(OH)}_2 = M\text{Ca(OH)}_2 / M\text{H}_2\text{O} \times \text{H}_2\text{O} = 74/18 \times \text{H}_2\text{O} = 4,11 \times \text{H}_2\text{O} \text{ (Equação 01)}$$

Onde:

$\text{Ca(OH)}_2$  = teor de hidróxido de cálcio (%);

$M\text{Ca(OH)}_2$  = massa molecular do hidróxido de cálcio (74);

$M\text{H}_2\text{O}$  = massa molecular da água (18);

$\text{H}_2\text{O}$  = perda de massa de água referente à decomposição do hidróxido de cálcio (%);

$$\text{CaCO}_3 = M\text{CaCO}_3 / M\text{CO}_2 \times \text{CO}_2 = 100/44 \times \text{CO}_2 = 2,27 \times \text{CO}_2 \text{ (Equação 02)}$$

Onde:

$CaCO_3$  = teor de carbonato de cálcio (%);

$MCaCO_3$  = massa molecular do carbonato de cálcio (100);

$MCO_2$  = massa molecular do dióxido de carbono ou anidro carbônico (44);

$CO_2$  = perda de massa referente à decomposição do dióxido de carbono (%).

### 3.2.4 – pH da água de Equilíbrio

Em uma pasta de cimento Portland bem hidratada, a fase sólida composta por hidratos de cálcio relativamente insolúveis (como C-S-H, CH e C-A-S-H) se encontra em estado de equilíbrio estável com a solução dos poros de alto pH. Dependendo da concentração de íons de  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$ , o valor do pH varia entre 12,5 e 13,5 (MEHTA, 2008).

A água de equilíbrio é a água livre contida nos poros capilares das pastas cimentícias apta a reagir com os produtos hidratados ou componentes externos que possam adentrar a rede porosa do material (OLIVEIRA & AGOPYAN, 2000). Trata-se de um método mais simples e prático quando comparado ao método tradicional de obtenção da água do poro por extração sob pressão descrito por outros pesquisadores (LONGUET et al, 1973; BARNEYBACK, DIAMOND, 1981).

De acordo com o método proposto por OLIVEIRA & AGOPYAN (2000), o equilíbrio se dá por difusão das espécies dissolvidas do interior da pasta para a água no entorno do corpo de prova submerso. O contato do corpo de prova com a água de pH 6,5 dá origem a uma diferença de concentração iônica entre a água do poro e a água que envolve a amostra.

Este ensaio foi usado para analisar a influência do RPP no pH de pastas cimentícias. Foram retiradas amostras sólidas trituradas de cada uma das composições e, posteriormente, foram colocadas em recipientes fechados com água deionizada.

Para isto, foram moldadas pastas de cimento de referência e com cimento e adições em 10, 20, 30 e 40% de RPP. Após vinte e quatro horas as pastas foram retiradas dos moldes e mantidas em cura, submersas por um período de 28 dias, para evitar carbonatação até as datas de ensaio, quando eram quebradas e transformadas em pó, pesadas e submersas em água deionizada. O pH da água foi inicialmente medido, e obteve-se como resultado um valor de 6,65. Após essa medida, colocaram-

se as amostras dentro dos recipientes com esta água. Após um período de 24h foi medido novamente, para ser analisada a variação do pH da água em contato com as amostras de argamassa com adições de RPP. As leituras foram feitas semanalmente com pHmetro digital com erro de  $\pm 0,05$  (Figura 3.8).

Figura 3.8: pHmetro digital para leituras da água de equilíbrio



Fonte: arquivos do autor, 2015

As análises foram feitas em intervalos de 7 dias, com o intuito de avaliar a variação do pH da água onde estavam imersas as amostras com os diversos teores de resíduo.

### 3.3 - Métodos para análise da influência do RPP em concreto

#### 3.3.1 – Ensaios para definição do esqueleto granular

A determinação do pacote granular é muito importante para misturas granulares embebidas em matrizes cimentícias, como o concreto, objetivando sempre a combinação dos agregados de forma que minimize a porosidade, diminuindo o consumo de pasta na mistura. Alguns estudos de dosagens de concreto vêm sendo realizados em trabalhos já publicados utilizando o Método de Empacotamento, a exemplo de Tutikian(2007).

Para determinação do esqueleto granular, seguimos o procedimento desenvolvido por Tutikian (2007). O objetivo desta etapa foi determinar a proporção dos materiais que possuísse a menor quantidade de vazios. Para tanto, realizamos o empacotamento da brita, da areia e do RPP. No primeiro passo realizamos o

empacotamento com a brita e a areia e, posteriormente com o RPP, formando um esqueleto granular com o menor número de vazios.

Após essas misturas eram avaliadas as massas unitárias e índices de vazios. O empacotamento seguiu os seguintes passos:

- Inicialmente, o recipiente foi cheio, compactado e pesado com 100% de areia;
- Em seguida, acrescentou-se brita e areia para que a mistura ficasse com 90% de areia e 10% de brita, pesou-se a mistura;
- Seguiram-se as misturas e pesagens variando-se em 10% a massa de cada material até que houvesse 100% de brita;
- Todas as proporções foram homogeneizadas, compactadas e pesadas;

Na sequência, após a definição da melhor proporção de areia e brita, foi adicionado o RPP. Numa primeira tentativa substituímos o agregado miúdo por RPP nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50% e, posteriormente adicionamos o RPP em massa do agregado miúdo, com intervalos de 2,5% até uma porcentagem de 70%.

Figura 3.9: Ensaio de empacotamento de agregados



Fonte: arquivos do autor, 2015

Nas primeiras misturas entre os agregados naturais foram avaliadas as seguintes proporções em massa e obtidas as suas massas unitárias, conforme tabela 4.3. A massa específica do conjunto e o índice de vazios foram calculados para essa primeira etapa do empacotamento porque alguns autores (Tutikian, 2007; Pereira, 2010) afirmaram que nem sempre a menor massa unitária do conjunto corresponde ao menor índice de vazios. Para esses cálculos foram usadas as seguintes equações:



$$MespAB = \frac{(MespA * \%A) + (MespB * \%B)}{100}$$

(Massa Específica - equação. 03)

$$V = \frac{MespAB - MunitAB}{MespAB} * 100$$

(Índice de Volume de Vazios – equação.04)

### 3.3.2 – Definição das dosagens e dos teores de adição do RPP

Após análise dos resultados de ensaio de esqueleto granular foram definidas as dosagens a serem trabalhadas, bem como os teores de adição de RPP nos traços. Inicialmente foram definidos os seguintes traços:

Tabela 3.7 : Traços de concreto usados no ensaio experimental

Traço em Volume	Traço em Massa	Consumo de Cimento
<b>TRAÇO 1 - 1:4</b>	1 : 1,6 : 2,4: 0,50 (cimento : areia : brita : água)	416,66 Kg/m <sup>3</sup>
<b>TRAÇO 2 – 1: 5,5</b>	1 : 2,2 : 3,3: 0,60 (cimento : areia : brita : água)	324,67 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Dados da pesquisa, 2015

Foram moldados traços de concreto convencional e de concreto auto adensável. Todos os traços, exceto os de referência, utilizaram o RPP em adição. E, posteriormente, foram realizados testes para verificação da influência da adição do RPP na trabalhabilidade do concreto e na sua resistência. A partir destes resultados é que foram definidas as porcentagens de aditivos plastificantes e superplastificantes adicionadas às misturas.

### 3.3.3 – Confecção dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) para ensaios de resistência à compressão e absorção de água e de (9 x 20 cm) usados nos ensaios de

migração. Nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água foram usadas fôrmas cilíndricas metálicas. Já para os ensaios de migração, foi confeccionada uma fôrma específica com 9 x 20 cm, adequando os discos que seriam posteriormente retirados para ensaios de migração ao molde da célula de migração.

Para os ensaios de durabilidade, foram moldados corpos de prova prismáticos (8 x 8 x 8 cm). Nos corpos de prova utilizados nos ensaios de cloretos, foram inseridas duas barras de aço CA- 50, bitola 6,3mm, comprimento de 100mm, chanfrados nas pontas por um esmeril. Nestes ensaios, antes da incorporação nos cp's, as armaduras passaram por um tratamento mecânico, sofrendo um tratamento de decapagem superficial, onde foram limpas com o auxílio de uma escova de aço acoplada a uma politriz, com o objetivo de evitar a influência de quaisquer oxidações prévias na superfície do metal. Após a limpeza (Figura 3.10), as extremidades foram envoltas em fita adesiva PVC, deixando um comprimento de 3cm. A sequência desta etapa está ilustrada na figura 3.11.

Figura 3.10: Limpeza mecânica das barras de aço



Fonte: arquivos do autor, 2015



### **3.3.4 Ensaios de autoadensabilidade do CAA**

Para as adições de 40% optou-se por concreto autoadensável. Para sua dosagem, foi adotado neste trabalho, o método de dosagem de concreto autoadensável desenvolvido por Tutikian e Dal Molin (2007). Este método busca o melhor proporcionamento dos agregados através da redução do volume de espaços entre as partículas e utiliza plastificante para melhoria do concreto antes da adição do superplastificante.

Para o concreto auto adensável foram realizados os testes da autoadensabilidade do CAA, que basearam-se no que preconiza a norma brasileira ABNT NBR 15823-1 (2010) como pré-requisitos mínimos para que um concreto seja aceito como um CAA. Essas características são fluidez, viscosidade plástica aparente e habilidade passante. Para analisar essas características foram utilizados os ensaios de determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – método do cone de Abrams (ABNT NBR 15823-2, 2010); e determinação da habilidade passante – método do anel J (ABNT NBR 15823-3, 2010).

Segundo a NBR15823-2 (ABNT, 2010), o espalhamento deve ficar na faixa de 550mm a 850mm. Não há recomendação quanto ao tempo necessário para que o concreto atinja esta circunferência. A segunda recomendação da norma é que a diferença do diâmetro do espalhamento sem o anel J para o diâmetro do espalhamento com o anel não seja superior a 50 mm.

### **3.3.5 - Ensaios de resistência à compressão**

Para avaliar essa propriedade foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm para cada traço e composição estudada. As moldagens foram feitas com adensamento manual, seguindo recomendação da norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Os CP foram desmoldados depois de 24h e permaneceram em cura submersa, em um tanque saturado de cal, até as datas de ensaio. Os ensaios de resistência à compressão foram efetuados aos 7, 28 e 90 dias de moldados; para cada idade foram usados dois CP e dois CP ficaram para uma reserva caso houvesse algum resultado incoerente.

### **3.3.6 – Ensaios de compatibilidade do superplastificante com o cimento**

Este ensaio deve ser realizado porque há um risco de haver componentes químicos nos superplastificantes que possam reagir com componentes do cimento, causando diminuição ou mesmo total eliminação do efeito do superplastificante.

Nesse sentido, avalia-se, depois de certo tempo, se o superplastificante mantém o efeito desejado nas pastas de cimento.

O cone de Marsh utilizado neste ensaio foi um recipiente metálico tronco cônico, com capacidade de 2 litros, diâmetro superior de 155 mm, altura de 290 mm e abertura inferior de diâmetro igual a 8 mm. Foram testados dois superplastificantes de terceira geração. O ensaio foi realizado com relação a/c de 0,4. O método consistiu em preparar-se uma pasta e medir quanto tempo era necessário para que 1 litro desta pasta escoasse através do cone.

O preparo da pasta a ser analisada seguiu os passos adotados por Diniz *apud* Jerônimo, 2014:

- pesou-se a água, o cimento e o superplastificante;
- colocou-se a água na argamassadeira e acrescentou-se o cimento aos poucos, num intervalo de 1,5 minutos;
- em seguida houve uma pequena pausa ( $\pm$  15 segundos) para limpeza das paredes e misturadores da argamassadeira;
- misturou-se por mais 60 segundos;
- mediu-se o tempo de escoamento de 1 litro de pasta pelo cone de Marsh, para 5 minutos e 60 minutos após o fim da mistura.

Foram feitas diferentes dosagens dos superplastificantes. Para todas as dosagens foram medidos os tempos de escoamento aos 5 e 60 minutos e plotadas as duas curvas do tempo de escoamento em função do teor de superplastificante na pasta. A incompatibilidade do cimento com o superplastificante ocorre quando a pasta não mantém suas características de fluidez aos 60 minutos, seja por endurecimento ou segregação, e não é possível a curva de 60 minutos encontrar a curva de 5 minutos (DINIZ *apud* JERÔNIMO, 2014).

### **3.4– Ensaio de durabilidade**

Esta etapa do trabalho experimental teve como objetivo avaliar a durabilidade de concretos com adição do RPP.

### **3.3.1 Método acelerado de indução da corrosão por cloretos**

#### **3.3.1.1 Ensaios de Eletromigração**

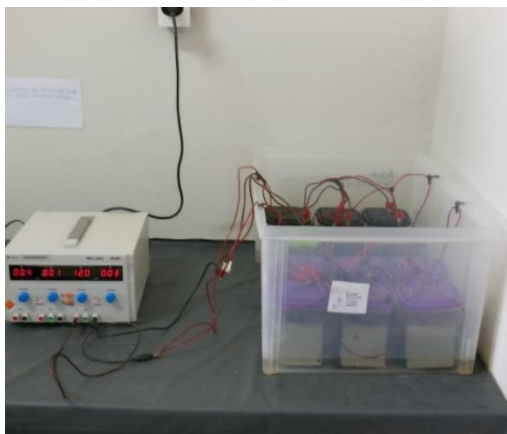
Ensaios de indução da corrosão por campo elétrico caracterizam-se pela migração de íons através de uma membrana porosa com emprego de um campo elétrico (MIETZ, 1998). O sal mais empregado nestes estudos é o cloreto de sódio (CASTELLOTE, 2002; AUSTIN, 2004; SPAINHOUR, 2008), cujas concentrações mais empregadas estão em torno de 3% e 1M e usam a barra como um dos polos gerador de campo elétrico.

Várias metodologias experimentais têm sido empregadas para avaliação do processo de corrosão, simulando ambientes agressivos. Neste estudo, os ensaios de eletromigração seguiram o esquema de montagem recomendado por CASTELLOTE et al (2002), que consiste no emprego de uma diferença de potencial pré-estabelecida entre duas malhas metálicas submersas em solução contendo cloretos e água deionizada; sendo o pólo positivo, a malha metálica e o polo negativo, a malha submersa em solução contendo cloretos (Figura 3.13). Essa forma de esquema induz a migração dos cloretos para o interior do concreto.

Após um período de 120 dias, com o intuito de estabilizar a microestrutura do concreto, os corpos de prova foram imersos em água destilada até constância de massa, para minimizar o efeito de difusão por sucção do agente agressivo nas primeiras horas de ensaio e, assim, termos apenas o mecanismo de transporte por migração iônica.

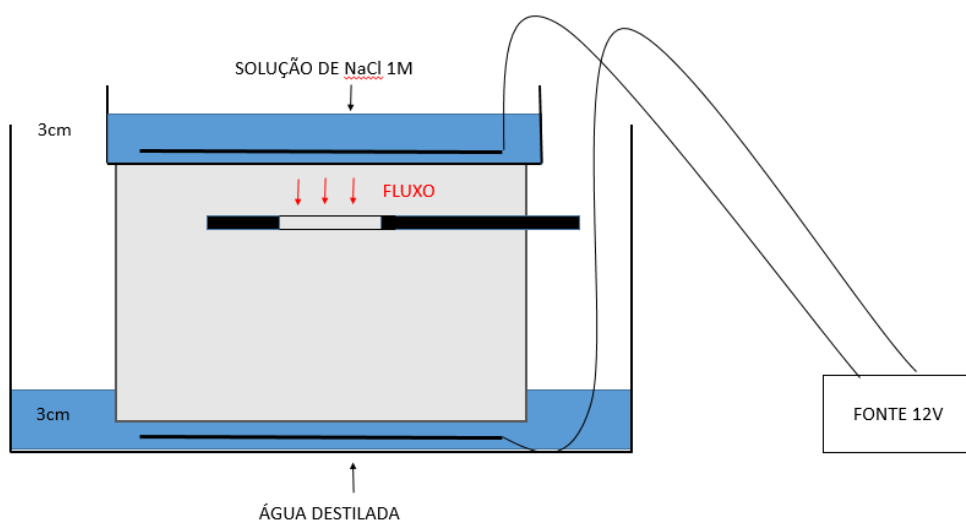
A solução adotada foi de um molar de cloreto de sódio (NaCl) que era renovado a cada 20 horas de ensaio. Os corpos de prova passavam 5 horas diárias em ensaio de campo elétrico com diferença de potencial de 12V, através de emprego de uma fonte de bancada (figura 3.13). As malhas usadas como polos do campo elétrico foram as malhas metálicas de titânio e eram cobertas por uma lâmina de água destilada de 3cm na parte inferior e uma lâmina de água com cloretos, de 3cm, na parte superior (figura 3.14).

Figura 3.13: Ensaio de eletromigração



Fonte: arquivos do autor, 2015

Figura 3.14: Esquema do ensaio de eletromigração



Fonte: autor, 2015

### 3.3.1.2 Técnicas de Avaliação de Corrosão

#### Monitoramento eletroquímico

Dentre as técnicas de avaliação e monitoramento comumente utilizadas para avaliar os processos corrosivos em estruturas de concreto armado, as adotadas neste trabalho foram as técnicas do Potencial de Corrosão e de Resistência de Polarização.

A técnica de resistência de polarização ( $R_p$ ) tem sido amplamente empregada com o objetivo de detecção da despassivação das armaduras e estudos sobre o teor crítico de cloretos (ANGST et al., 2009; MEIRA et al., 2014). O monitoramento das barras foi realizado através de medidas de potencial de corrosão em circuito aberto e

técnica eletroquímica de resistência à polarização com compensação da queda ôhmica para obtenção da densidade de corrente instantânea de corrosão.

A técnica de Potencial de corrosão se traduz em um ensaio não destrutivo, que é utilizado para mensurar a diferença de potencial entre a barra de aço empregada no concreto e um eletrodo de referência (ELSENER, 2003). É uma técnica recomendada pela RILEM TC 154-EMC/2003 “*Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion Half-cell Potential Measurements Metallic Corrosion – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures*”.

A técnica consiste em determinar a diferença de potencial entre o aço/concreto e um eletrodo de referência. Um potenciômetro de alta impedância é conectado entre a armadura e o eletrodo de referência, o qual é colocado em contato com a superfície do concreto, segundo critérios da ASTM C-876 (1991), como mostra a tabela 3.8.

Tabela 3.8: Critérios de avaliação do Potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876 (1991)

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre - ESC (mV)	Probabilidade de corrosão
mais negativo que -350	superior a 90%
mais positivo que -200	inferior a 10%
de -200 a -350	incerta

Fonte: Adaptado de ASTM C-876 (1991)

Para essas medidas foram utilizados eletrodos de Cu –CuSO<sub>4</sub> e um contra eletrodo de aço inoxidável, e todo o conjunto foi mantido envolto em uma gaiola de Faraday para evitar interferências externas. Para as medidas foi utilizado um potenciostato de bancada, modelo GILL AC da ACM Instruments (Figura 3.13).

Através do monitoramento eletroquímico se obtém o comportamento das variáveis: potencial de corrosão  $E_{\text{corr}} - \text{ESC}$  (mV) e densidade de corrente de corrosão  $i_{\text{corr}}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Em conjunto, elas podem trazer informações sobre o estado a barra no interior do concreto. Os critérios para detecção da despassivação da armadura eram leituras de potencial de corrosão inferiores a -350 mV (ESC) e densidade de corrente de corrosão superior a 0,1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  para o eletrodo empregado (ANGST *et al.*, 2009; CASCUDO, 1997).



Figura 3.15: Equipamento para ensaio de Resistência de Polarização (a) visão geral (b) eletrodo de referência



(a)

(b)

Fonte: arquivos do autor, 2015

O ensaio de eletromigração durava cinco horas e as medidas eram realizadas após um período de repouso de dezenove horas, o que ocorreu até a despassivação das armaduras.

### 3.3.1.3 Teor crítico de cloretos

Após os ensaios de eletromigração, ou seja, quando detectado o início do processo corrosivo, os corpos de prova foram retirados do ensaio. Em seguida, as barras foram retiradas com o auxílio de uma talhadeira e de um martelo (Figura 3.15), e detectado o pite de corrosão e obtida a distância desse pite à face do concreto (Figura 3.16).

Figura 3.16: Retirada do corpo de prova



Fonte: arquivos do autor, 2015

Figura 3.16: Detecção do pite de corrosão e medida da distância pra face do cp



Fonte: arquivos do autor, 2015

Com o intuito de determinar as concentrações de cloretos em camadas predefinidas, os corpos de prova foram cortados numa máquina corte com disco diamantado em camadas de 1mm para superfície de 5mm para as quatrocamadas posteriores (Figura 3.17). Em seguida essas amostras foram pulverizadas manualmente, peneiradas em peneira de abertura 0,149 mm (100 *mesh*) e, imediatamente, imersas em acetona para evitar a carbonatação da amostra (Figura 3.18).

Figura 3.17: Corte das camadas dos cp's



Figura 3.18: Sequência de pulverização das amostras



Fonte: arquivos do autor, 2015

Após a pulverização e imersão em acetona, as amostras foram submetidas à titulação potenciométrica para a determinação dos teores de cloretos livres e totais. Para este ensaio seguiram-se as recomendações da RILEM (2002a, 2002b) para a extração das amostras e as recomendações da ASTM C114 (1992), para as titulações potenciométricas, nas quais empregamos um titulador automático, modelo Titrino da Metrohm (Figura 3.19).

Perfis de cloretos são gráficos que mostram as concentrações do agente agressivo, em relação à massa de aglomerante ou a hidroxilas, ao longo da profundidade em uma peça de concreto submetida à penetração de um contaminante, neste caso os íons cloretos (CASCUDO, 1997), eles podem ser expressos para cloretos livres e totais. A análise comparativa entre perfis de cloretos permitem a obtenção de informação sobre a evolução da penetração de cloretos ao longo do tempo, levando em consideração a influência da qualidade do concreto e das condições de exposição (COSTA & APPLETON, 2007).

Avaliando as características dos concretos sobre a formação dos perfis de cloretos, percebe-se a influência da relação água/cimento e do uso de adições no concreto. Portanto, concretos com maior relação a/c, apresentam maiores concentrações de cloretos ao longo da profundidade para um mesmo tempo de exposição, esse comportamento é explicado pela porosidade do material. A porosidade explica o comportamento do uso de adições e da relação a/c. Assim, concretos com menores relações a/c e uso de adições tendem a apresentar menores concentrações de cloretos, para um mesmo tempo de exposição.

Figura 3.19: Titulador potenciométrico



Fonte: arquivos do autor, 2015

### 3.3.3 Migração de cloretos

Este ensaio corresponde ao transporte de íons através do concreto, devido à ação de um campo elétrico, decorrente da aplicação de uma diferença de potencial (OLLIVIER, 1998). Foi baseado no procedimento adotado na norma da ASTM C1202/97 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* realizado em concreto na idade de 90 dias. Este método de ensaio abrange a avaliação laboratorial da condutibilidade elétrica de amostras de concreto para proporcionar uma rápida indicação da sua resistência à penetração de íons cloreto.

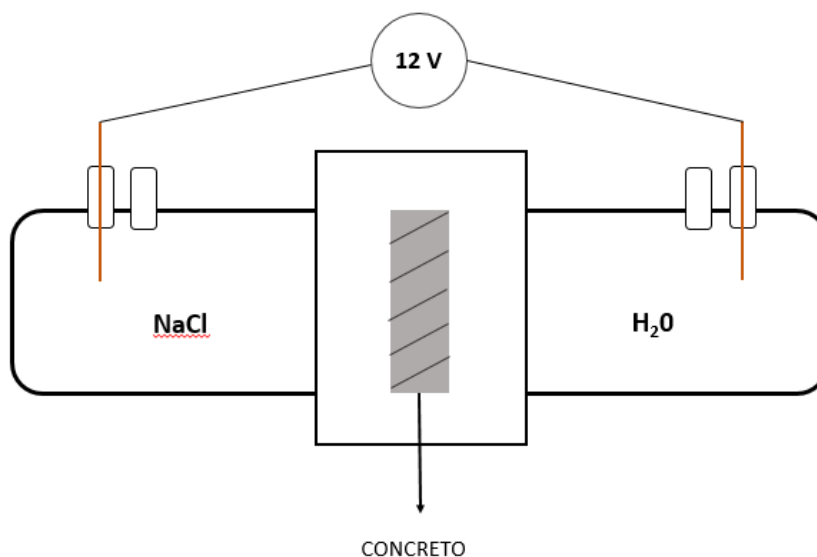
O ensaio baseou-se no princípio eletroquímico, onde a amostra de concreto era colocada entre duas câmaras, aplicando-se uma tensão nominal de 12V por um período de cinco horas diárias. Neste tempo foram registradas as intensidades de corrente que se desenvolveram através da amostra.

Para a realização deste ensaio foram confeccionadas células de acrílico e nylon. As amostras eram retiradas dos corpos de prova, utilizando uma serra de disco de corte diamantado. Para cada concreto estudado foram retiradas duas amostras com 90mm de diâmetro e 10mm de espessura, as quais foram imersas em água destilada

até constância de massa. Depois, as amostras foram seladas nas laterais e colocadas entre duas câmaras da célula de acrílico (Figura 3.20). Em uma das câmaras havia uma solução de 3,0% NaCl e na outra uma solução de água deionizada. Na célula anódica verificar- a passagem desses cloretos para uma solução deionizada, sendo aplicada uma tensão por meio de eletrodos. Essa tensão aplicada forçará a migração dos íons cloretos de uma célula a outra.

Com esse ensaio podemos obter a concentração de cloretos na câmara anódica para cada teor de adição de RPP e verificar a influência das adições no transporte de cloretos através dos corpos de prova. Ele possibilita uma comparação entre os concretos estudados nesse trabalho quanto à penetração de cloretos.

Figura 3.20: Célula de migração de cloretos



Fonte: autor, 2015

## CAPÍTULO IV

### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados e as discussões acerca dos ensaios empregados neste trabalho.

#### 4.1 Ensaio de pozolanicidade com RPP

Após moldagem e cura dos corpos de prova, estes foram rompidos e foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de pozolanicidade com cimento (NBR 5752)

TRAÇO	MÉDIA DA RESISTÊNCIA (MPa)
<b>Cimento</b>	29,61
<b>Cimento + RPP</b>	13,37

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Obtidos estes resultados, foi calculado o Índice de Atividade Pozolânica, cujo resultado foi de 45,15%. De acordo com a NBR 12653/92 – Materiais pozolânicos: especificações, esse índice deve ser de, no mínimo, 75%, ou seja, o material avaliado não atende a essa exigência mínima da norma, indicando ausência de pozolanicidade do resíduo.

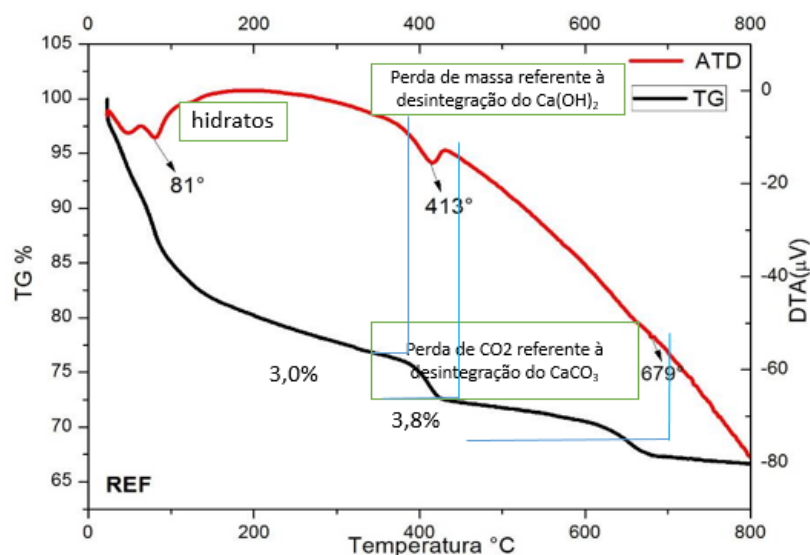
Também foi realizado o ensaio baseado na NBR 5751 – Índice de atividade pozolânica com cal. Foram moldados 6 corpos de prova que após o período de cura, foram rompidos à compressão. A NBR 12653/92 – Materiais pozolânicos: especificações, estabelece que para um material ser considerado pozolânico, sua resistência aos 7 dias seja, de no mínimo, 6,0 MPa. Os resultados de rompimento dos CP's deram resultados de 2,85 MPa. Novamente pôde-se constatar a não pozolanicidade do resíduo em estudo.



## 4.2 Análises Termogravimétrica

Nas figuras 4.2 a 4.6 foram plotados os gráficos das curvas de TG/DTA. O primeiro pico de temperatura entre 16°C e 362°C, refere-se à decomposição do C-S-H, gipsita, etringita e da singenita e água; o segundo pico entre 362°C e 426°C, a decomposição do hidróxido de cálcio e, o terceiro, entre 426°C e 988°C, a do carbonato de cálcio (TAYLOR, 1997).

Figura 4.2: TG/DTA da pasta de referência (sem adição de RPP)



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.3: TG/DTA da pasta com 10% de adição de RPP

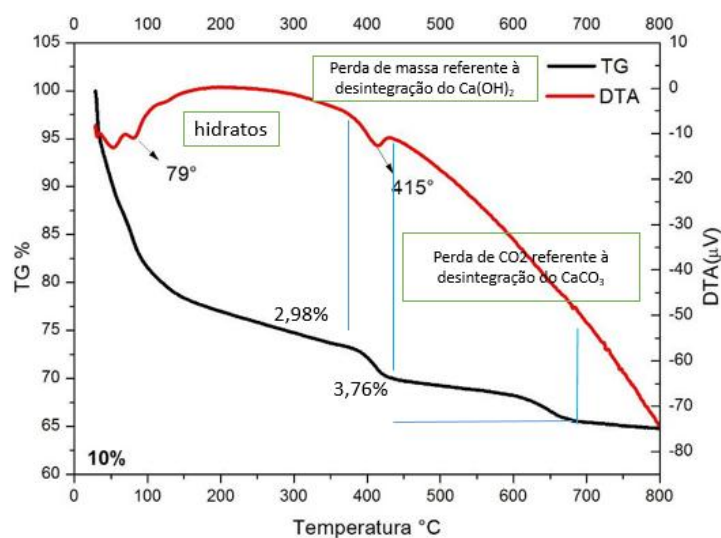
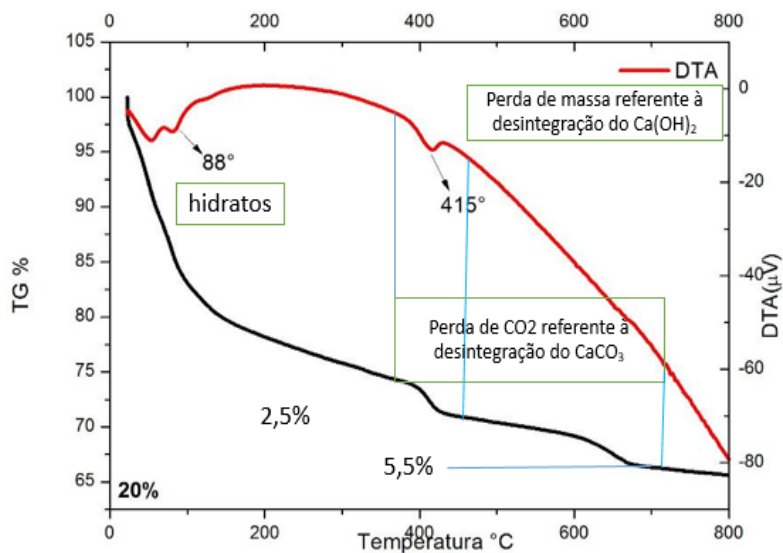
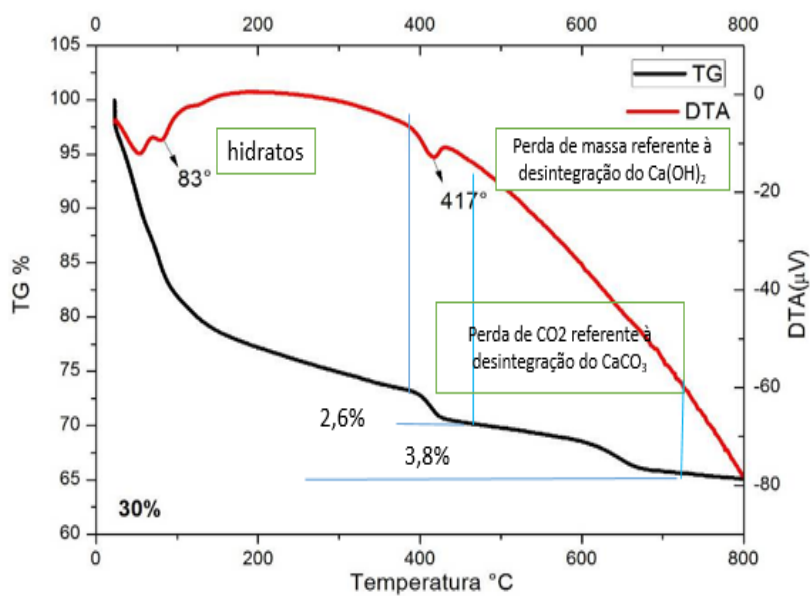


Figura 4.4: TG/DTA da pasta com 20% de adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

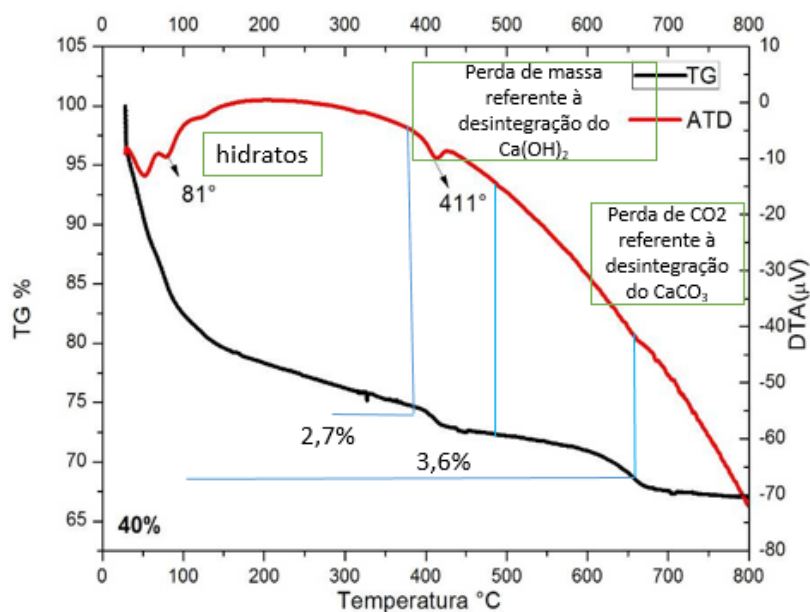
Figura 4.5: TG/DTA da pasta com 30% de adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015



Figura 4.6: TG/DTA da pasta com 40% de adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Tabela 4.2: Teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$  nas pastas de cimento

CONCRETO	TEOR DE $\text{Ca(OH)}_2$	TEOR DE $\text{CaCO}_3$
Referência	12,33%	8,62%
10%	12,24%	8,53%
20%	10,27%	12,48%
30%	10,68%	8,62%
40%	11,10%	8,17%

Fonte: dados da pesquisa, 2015

As figuras mostram as curvas obtidas com as análises térmicas gravimétricas (TG) e diferenciais (DTA). Analisando-se as duas curvas das figuras foi possível identificar o intervalo em que ocorreu a desintegração do  $\text{Ca(OH)}_2$  e do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Na Tabela 4.2 estão os valores do teor do  $\text{Ca(OH)}_2$  e do  $\text{CaCO}_3$  das amostras analisadas, segundo metodologia apresentada na seção 3.2.3. Após análise dos gráficos de TG/DTA, podemos verificar um comportamento semelhante de todas as composições cimento/resíduo, ou seja, não houve um maior consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  nas pastas com adição de RPP.

### 4.3 Alcalinidade da matriz cimentícia

A alcalinidade da matriz cimentícia está diretamente ligada à formação e a estabilidade da película de passivação da armadura no interior do concreto. Na fase líquida contida nos poros do material, essa alcalinidade, nas primeiras idades, é composta basicamente por uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ , oriunda das reações de hidratação do cimento. Já em idades avançadas, a manutenção da alcalinidade do meio é oriunda do hidróxido de cálcio ( $\text{NaOH}$ ) e ao hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$ ) (ANDRADE & PAGE, 1986). Baseado nessa importância foi realizado ensaio de pH da água de equilíbrio, como descrito no item 3.2.4.

A tabela 4.2 mostra a evolução do pH da água de equilíbrio com o tempo e o teor de adição do RPP. As pastas foram moldadas com as dosagens de referência, 0, 10, 20, 30 e 40% de adição do RPP e, após um período de 28 dias foram realizadas as medidas de pH, em intervalos de 7 dias.

Tabela 4.3: pH da água de equilíbrio

	Medida Inicial	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida
AMOSTRA	pH	pH	pH	pH	pH
REF	6,65	12,39	12,46	12,49	12,52
10%	6,65	12,39	12,43	12,46	12,56
20%	6,65	12,4	12,43	12,46	12,52
30%	6,65	12,39	12,46	12,49	12,56
40%	6,65	12,37	12,46	12,49	12,56

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Após análises dos resultados em várias idades, verificamos não haver influência da adição do RPP no pH das amostras.

### 4.4 Ensaios para definição do esqueleto granular

Nesta etapa foi realizado o empacotamento dos agregados miúdos e graúdos para obtenção da maior massa unitária do conjunto, menor índice de vazios e, conseqüentemente, a obtenção de menor quantidade de argamassa.

Tabela 4.4: Massa unitária, massa específica e índice de vazios das misturas dos agregados miúdo e graúdo

	PROPORÇÃO	M. UNIT.	MASSA ESPECÍFICA AB	ÍNDICE DE VAZIOS (%)
<b>A</b>	100%AREIA + 0% BRITA	1,41	2,4	41,25
<b>B</b>	90%AREIA + 10% BRITA	1,77	2,42	26,85
<b>C</b>	80%AREIA + 20% BRITA	1,71	2,44	29,91
<b>D</b>	70%AREIA + 30% BRITA	1,76	2,46	28,45
<b>E</b>	60%AREIA + 40% BRITA	1,77	2,48	28,62
<b>F</b>	50%AREIA + 50% BRITA	1,86	2,5	25,6
<b>G</b>	40%AREIA + 60% BRITA	1,92	2,53	24,11
<b>H</b>	30%AREIA + 70% BRITA	1,86	2,54	26,77
<b>I</b>	20%AREIA + 80% BRITA	1,84	2,56	28,12
<b>J</b>	10%AREIA + 90% BRITA	1,83	2,59	29,34
<b>L</b>	0% AREIA+ 100%BRITA	1,57	2,61	39,84

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Após os cálculos de massas unitárias de todas as pesagens, verificou-se que a proporção de maior massa unitária do conjunto foi a de 40% de areia e 60% de brita.

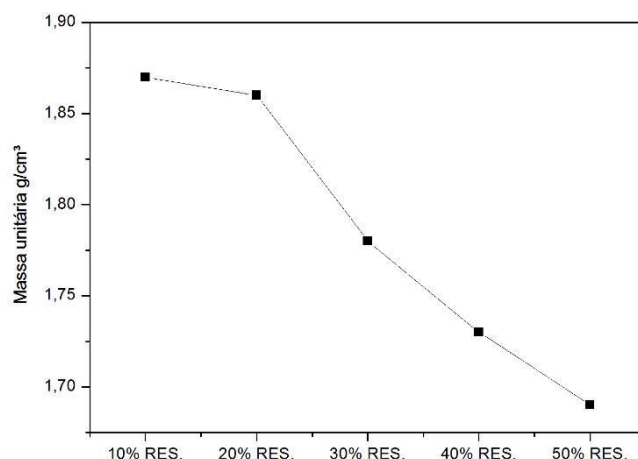
A partir da obtenção desses dados (40% ag. miúdo + 60% ag. graúdo), foram realizadas substituições do agregado miúdo pelo RPP em 10, 20, 30, 40 e 50%, já que o RPP é mais fino. Com isso, esperava-se haver um incremento da massa unitária do conjunto, cujos resultados são mostrados na tabela 4.4 e na Figura 4.8. No entanto, verificou-se que a substituição do agregado miúdo pelo RPP não causou incremento na massa unitária do conjunto.

Tabela 4.5: Massa Unitária com substituição do agregado miúdo pelo RPP

PORCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO	MASSA UNITÁRIA (g/cm <sup>3</sup> )
10% RESIDUO	1,87
20% RESIDUO	1,86
30% RESIDUO	1,78
40% RESIDUO	1,73
50% RESIDUO	1,69

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.9: Empacotamento com substituição do agregado miúdo pelo RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Como os resultados dos ensaios comprovaram não haver incremento da massa unitária com a substituição do agregado miúdo pelo RPP, optou-se por adicionar o RPP em massa do agregado miúdo (Tabela 4.4 e figura 4.10), com intervalos de adição de 2,5% até o total de 70% de adição de RPP.

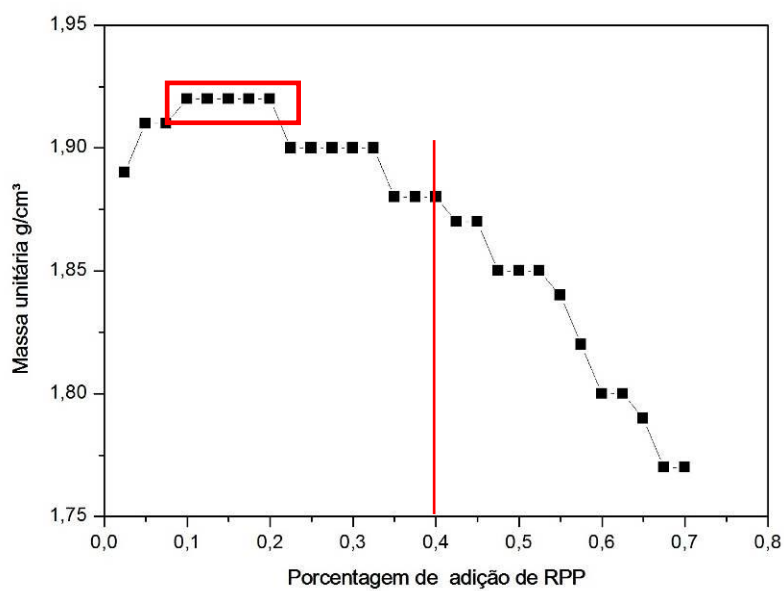
Tabela 4.6: Massa Unitária da adição do RPP à mistura dos agregados

PORCENTAGEM	MASSA UNITÁRIA (g/cm³)
2,50%	1,89
5,00%	1,91
7,50%	1,91
10,00%	1,92
12,50%	1,92
15%	1,92
17,50%	1,92
20%	1,92
22,50%	1,9
25,00%	1,9
27,50%	1,9
30%	1,9
32,50%	1,9
35,00%	1,88

37,50%	1,88
40,00%	1,88
42,50%	1,87
45%	1,87
47,50%	1,85
50,00%	1,85
52,50%	1,85
55,00%	1,84
57,50%	1,82
60,00%	1,8
62,50%	1,8
65%	1,79
67,50%	1,77
70%	1,77

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.10: Massa Unitária dos agregados naturais com adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Os resultados mostram que na faixa de adição de até 20% de RPP conseguimos manter uma massa unitária em torno de 1,92 g/cm<sup>3</sup>e, até a faixa de 40% a massa unitária não tem um decréscimo muito elevado. Com isso, optou-se por desenvolver o trabalho com teores de adição de até 40% em massa.

#### **4.5 Definição das dosagens e dos teores de adição do RPP**

Após análise dos resultados dos ensaios para definição do esqueleto granular foram definidas as dosagens a serem trabalhadas, bem como os teores de adição de RPP nos traços. Com isso, como dito anteriormente, decidimos usar o RPP na forma de adição em relação à massa do agregado miúdo. As proporções definidas foram: referência (0% de adição) e 10, 20 e 40% de adição.

Para os concretos moldados com 40% de adição de RPP optou-se por Concreto Auto Adensáveis, devido ao grande volume de finos.

Inicialmente foram definidos os seguintes traços:

##### **TRAÇO 1 - 1:4**

1 : 1,6 : 2,4: 0,50

##### **TRAÇO 2 – 1: 5,5**

1 : 2,2 : 3,3: 0,60

Como o RPP é um resíduo muito fino, a sua adição em massa requereu o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes. Para chegar à quantidade necessária foram realizados vários testes de dosagem dos traços já definidos com adição do RPP nas variadas proporções.

Após a realização destes ensaios concluiu-se que os traços ficariam com as seguintes proporções:

##### **TRAÇO 1 - 1:4**

Referência - 1 : 1,6 : 2,4: 0,50 – Sem uso de aditivos

10% - 1 : 1,6 : 2,4: 0,50 – 0,3% de aditivo plastificante e 0,4% de aditivo super plastificante – 16% de RPP em relação à massa de cimento

20% - 1 : 1,6 : 2,4: 0,50 – 0,4% de aditivo plastificante e 0,4% de aditivo super plastificante – 32% de RPP em relação à massa de cimento

40% - 1 : 1,6 : 2,4: 0,50 – 1% de aditivo plastificante e 0,6% de aditivo super plastificante–64% de RPP em relação à massa de cimento

### **TRAÇO 2 – 1: 5,5**

Referência - 1 : 2,2 : 3,3: 0,60 – Sem uso de aditivos

10% - 1 : 2,2 : 3,3: 0,60 – 0,70% de aditivo plastificante e 0,5% de aditivo superplastificante– 22% de RPP em relação à massa de cimento

20% - 1 : 2,2 : 3,3: 0,60 – 0,93% de aditivo plastificante e 0,61% de aditivo superplastificante– 44% de RPP em relação à massa de cimento

40% - 1 : 2,2 : 3,3: 0,60 – 1,1% de aditivo plastificante e 0,8% de aditivo superplastificante.– 88% de RPP em relação à massa de cimento

Para as dosagens dos concretos convencionais foi adotado *slump*  $10 \pm 2$ .

## **4.6 Compatibilidade do superplastificante com o cimento**

Foram testados dois superplastificantes para avaliar a sua compatibilidade com o cimento. Os resultados estão expostos nas Figuras 4.11 e 4.12. O segundo plastificante, o ADVA 585 do fabricante Grace, mostrou-se mais adequado para o cimento utilizado e foi escolhido para moldagem dos concretos autoadensáveis.

Figura 4.11: Teste de compatibilidade do plastificante 1

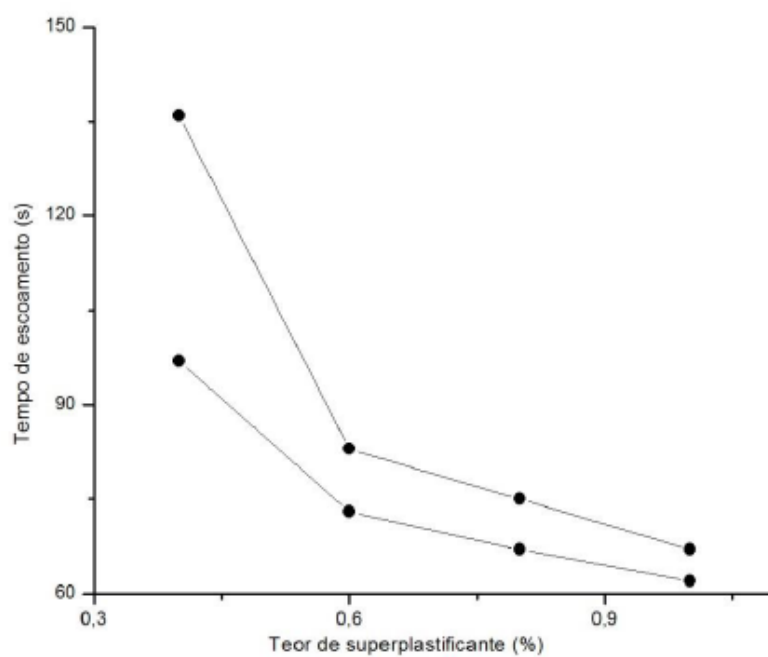
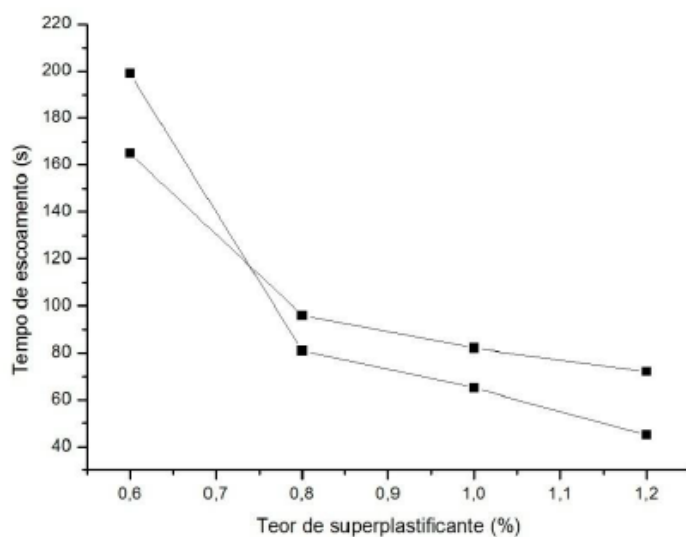


Figura 4.12: Teste de compatibilidade do plastificante 2





#### 4.7 Concreto autoadensável: Classificação, controle e aceitação no estado fresco

Na Tabela 4.7 estão expostas as características de dosagens e propriedades no estado fresco dos traços de CAA estudados neste trabalho.

Tabela 4.7: Características de dosagens e propriedades no estado fresco do CAA com adição de RPP

ENSAIOS	TRAÇO 1 1 : 1,6 : 2,4	TRAÇO 2 1 : 2,2 : 3,3
ABATIMENTO (mm)	210	230
ESPALHAMENTO (mm)	710	780
CONSUMO DE CIMENTO CAA (Kg/m <sup>3</sup> )	401,60	304,87
RELAÇÃO A/C	0,50	0,60
PLASTIFICANTE (%)	1,0	1,1
SUPERPLASTIFICANTE (%)	0,6	0,8
T <sub>500</sub> (s)	1''	1,06''
ESPALHAMENTO COM ANEL J (mm)	700	760

Fonte: Dados da pesquisa, 2015

Segundo a NBR15823-2 (ABNT, 2010), o espalhamento deve ficar entre 550 mm e 850 mm e não há recomendação quanto ao tempo necessário para que o concreto atinja esta circunferência. A segunda recomendação da norma é que a diferença do diâmetro do espalhamento sem o anel J para o diâmetro do espalhamento com o anel não seja superior a 50 mm. Os concretos produzidos, neste trabalho, atenderam a essas recomendações. Na Figura 4.13 mostram-se as fotos do ensaio de espalhamento, habilidade passante e um detalhe onde se pode observar a coesão do concreto.

Figura 4.13: (a)Ensaio de espalhamento com anel J, (b)Determinação da habilidade passante e (c) coesão do concreto



Fonte: arquivos do autor, 2015

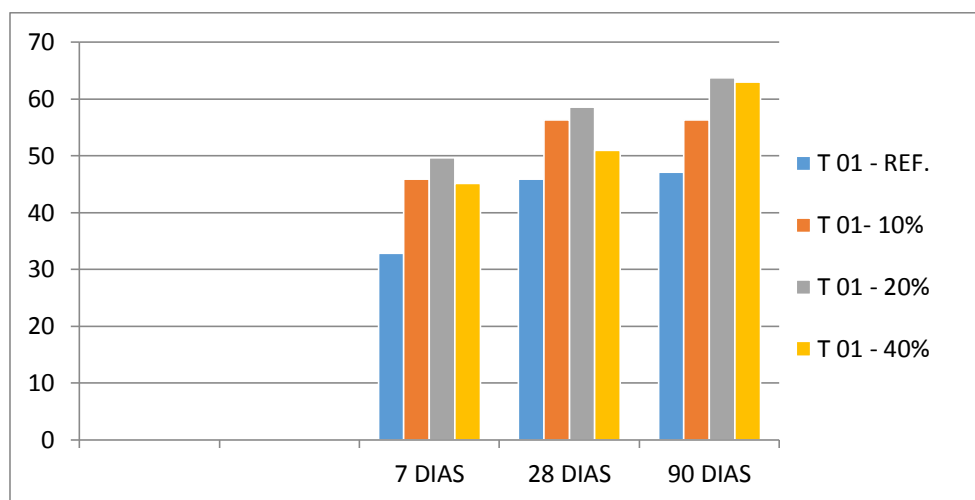
O RPP mostrou-se um material satisfatório para produção de concreto autoadensável, garantindo fluidez e coesão.

#### 4.8 Resistência à Compressão

A seguir são apresentados os resultados de resistência à compressão dos concretos convencionais com e sem adição de RPP e do concreto auto adensável com adição do RPP.

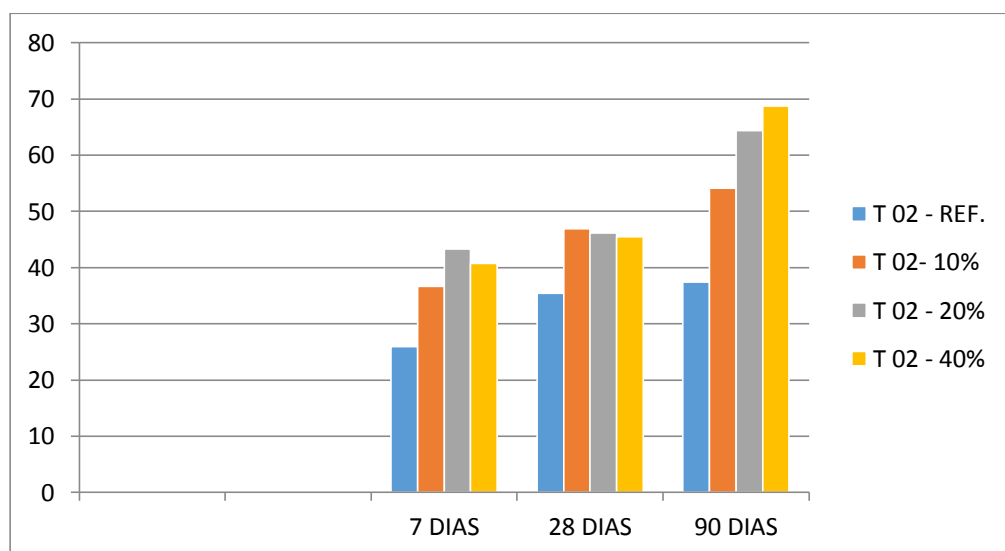
Os corpos de prova foram ensaiados aos 7, 28 e 90 dias e os resultados estão demonstrados na figura 4.14 para o traço 1 e na figura 4.15 para o traço 2.

Figura 4.14: Resistencia à compressão – Traço 01



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.15: Resistencia à compressão – traço 02



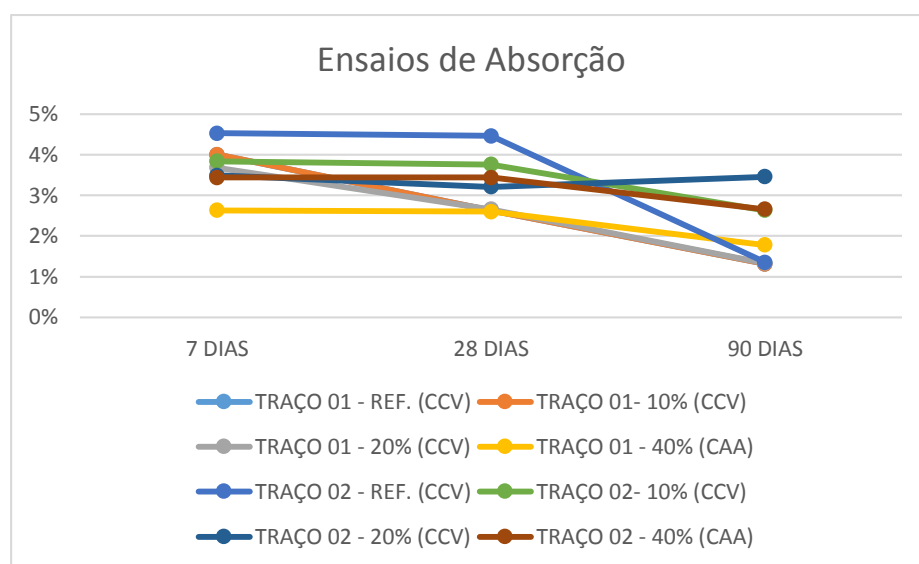
Fonte: dados da pesquisa, 2015

Os resultados demonstram um aumento da resistência à compressão dos concretos com adição de RPP aos 90 dias nos dois traços estudados. O incremento da resistência teve uma variação de 19,45% a 35,15% no traço 1 aos 90 dias de cura e uma variação de 44,56% a 83,65% no traço 2 com adição do RPP. Este incremento na resistência também foi verificado no trabalho de Souza (2007) com a adição de RPP em traços de concreto. O aumento da resistência a partir dos traços de adição de 10% de RPP, pode ser explicado pelo método de empacotamento de agregados

utilizado nas dosagens com adições. Os traços com 40% de adição apresentaram uma queda na resistência à compressão, fato que pode ser explicado pela grande quantidade de finos existente. Com isso, concluímos que a tendência geral de uso do RPP como adição se encontra na faixa de 10 a 20% no que diz respeito à resistência à compressão.

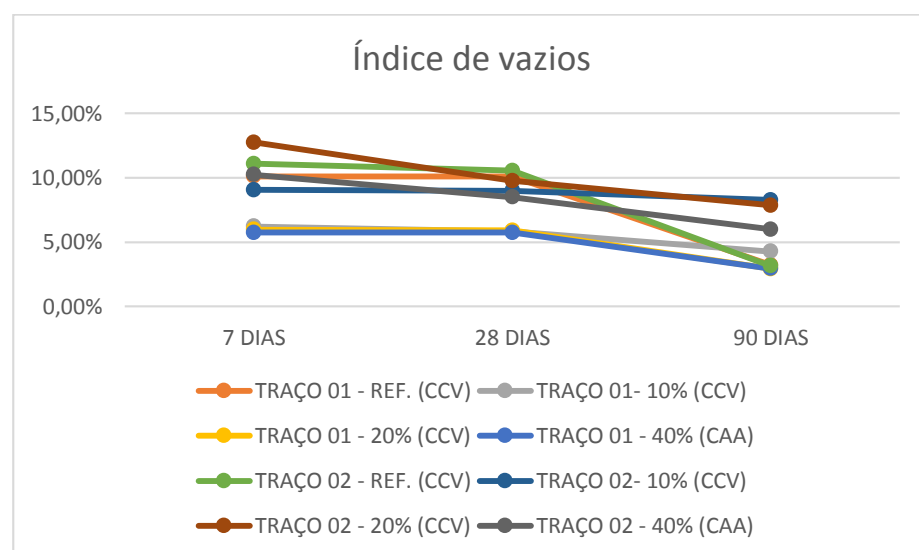
#### 4.9 Absorção e Índice de vazios

Figura 4.16: Resultado do ensaio de Absorção em Corpos de prova cilíndricos



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.17: Resultado do ensaio de índice de vazios



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Como pode ser observado, a absorção e o índice de vazios diminuíram à medida que se aumentou o teor de RPP. Esse fato é explicado pelo empacotamento dos grãos realizados na etapa de dosagem e é compatível com o ensaio de resistência à compressão.

#### **4.10 Durabilidade**

Nesta seção estão os ensaios realizados para avaliar a durabilidade do concreto com adição do resíduo do polimento do porcelanato no tocante à corrosão de armaduras.

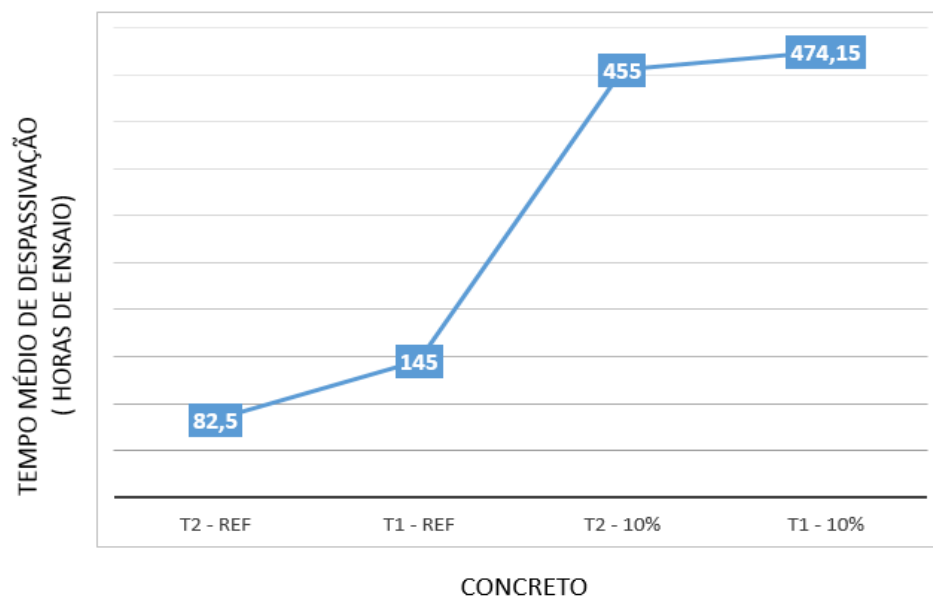
##### **4.10.1 Monitoramento eletroquímico**

Nesta seção são apresentados os resultados de monitoramento eletroquímico dos espécimes submetidos a ensaio acelerado de corrosão (concreto de referência e com 10% de adição). A variável dependente estudada foi o Potencial de corrosão – ESC (mV) -  $E_{corr}$ . As medidas foram feitas a cada período de ensaio, até que os resultados assumissem valores mais negativos que -350mV (ESC), seguindo recomendação da normativa americana ASTM C-876 (1999).

Após cinco horas de ensaio acelerado por eletromigração, os corpos de prova ficavam no mesmo ambiente de ensaio, sem aplicação de campo elétrico por período de 19 horas e uma vez detectado o início do processo corrosivo, os espécimes eram retirados de ensaio e, após o período de despolarização da barra (48 horas), eram realizadas duas novas leituras de modo a confirmar a despassivação, conforme critério descrito no item 3.3.1.2.

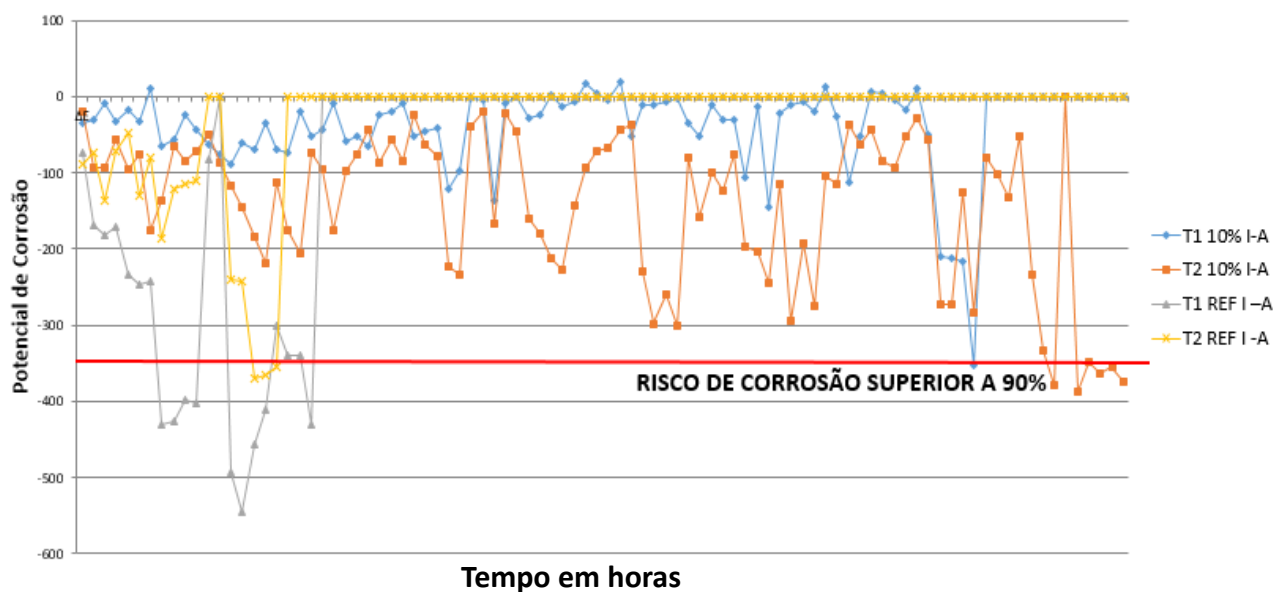
Nos traços de referência (sem adição de RPP) o tempo médio de ensaio foi de 145 horas para o traço 1 e de, 82,5 horas para o traço 2. Nos traços com adição de RPP em 10% as barras de aço incorporadas ao concreto despassivaram com tempo médio de 474,15 horas para o traço 1 e de, 455 horas para o traço 2 (Figuras 4.18 e 4.19).

Figura 4.18: Tempo médio de ensaio para despassivação dos corpos de prova



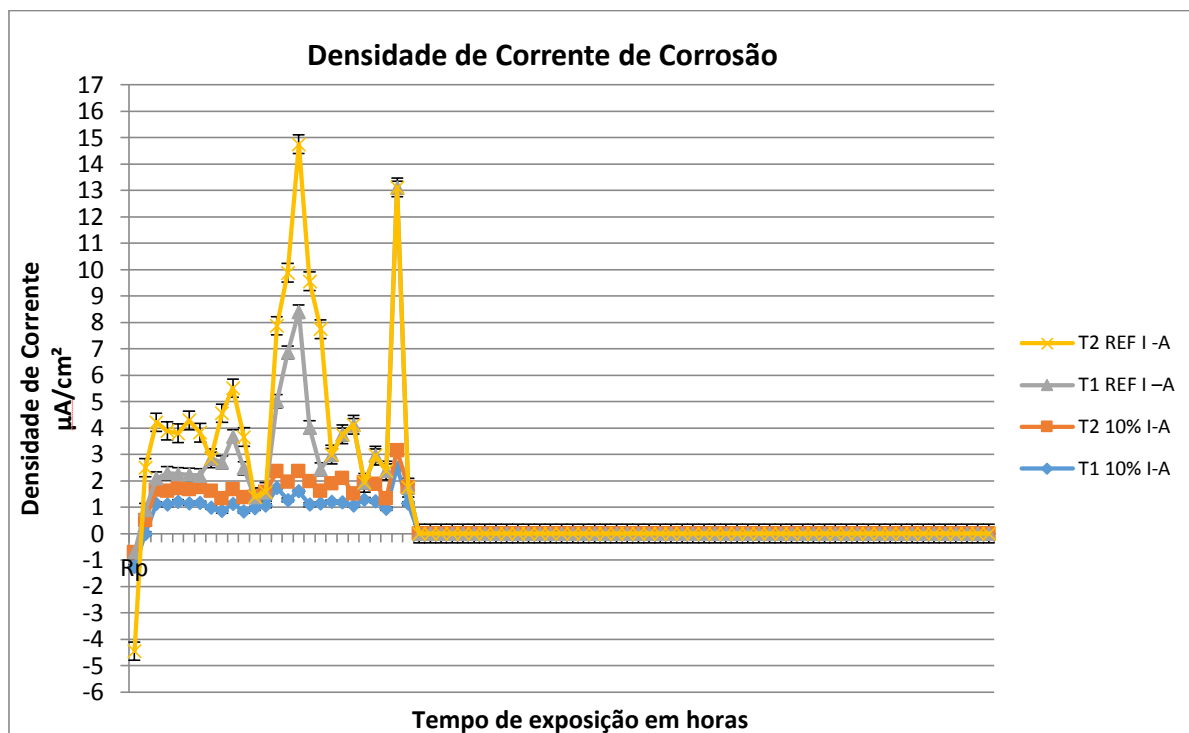
Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.19: Evolução, ao longo do tempo, do potencial de corrosão



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.20: Evolução, ao longo do tempo, da densidade de corrente



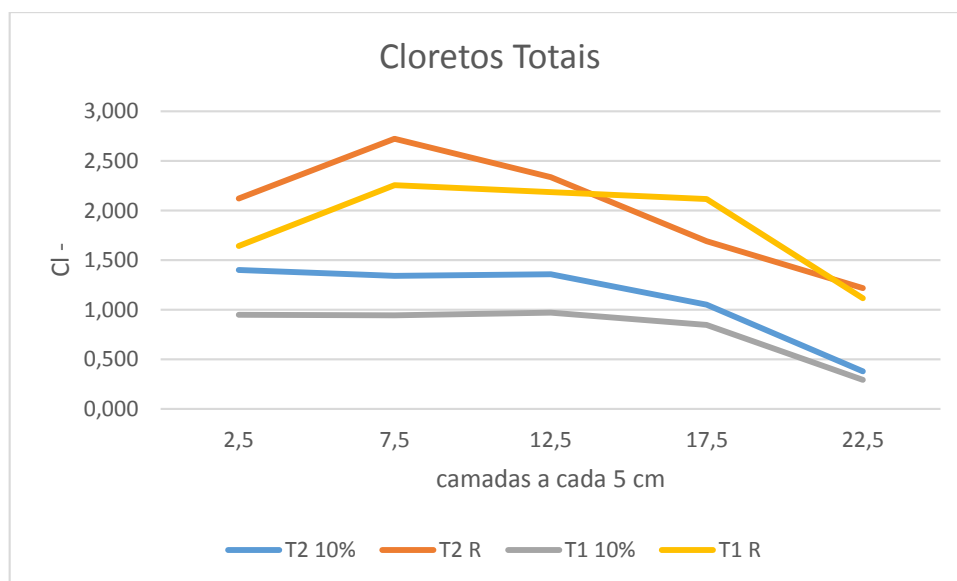
Fonte: dados da pesquisa, 2015

Percebemos, a partir desses resultados, um aumento de 327,0% no tempo que os cloretos levaram para despassivar a armadura dos concretos confeccionados com 10% de adição de RPP no traço 1 e um aumento de 551,5% para despassivar as armaduras incorporadas nos espécimes do traço 2. Isso ocorreu por causa da diminuição do índice de vazios, resultado do empacotamento de agregados com a adição de RPP.

#### 4.10.2 Perfis de Cloretos

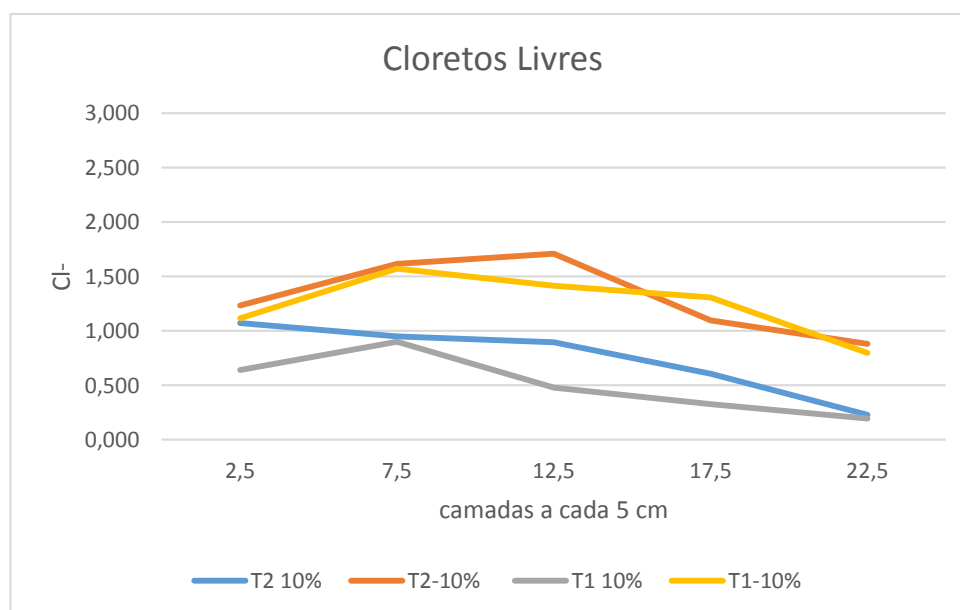
Após extração e titulação das amostras submetidas aos ensaios de eletromigração, foram obtidas as concentrações de cloretos (porcentagem em relação à massa de aglomerante) em função da profundidade média de cada camada.

Figura 4.21: Perfis de cloretos totais para os traços de referência e 10% de adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.22: Perfis de cloretos livres para os traços de referência e 10% de adição de RPP



Fonte: dados da pesquisa, 2015

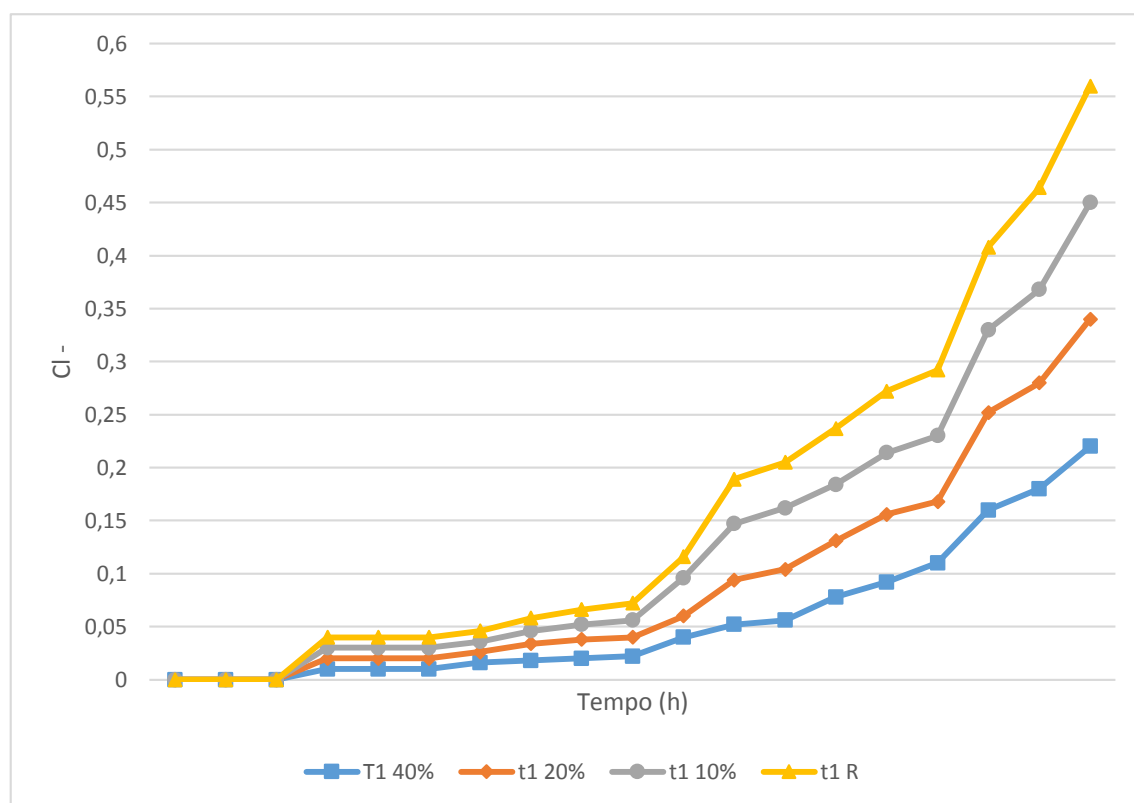


As variáveis analisadas nesta seção são as concentrações de cloretos totais e livres (%) em cada camada. Como esperado, percebe-se uma redução das concentrações de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade em todos os perfis analisados e um decréscimo das concentrações com a adição do resíduo e com a diminuição da relação a/c dos dois traços estudados (figuras 4.20 e 4.21). Além dos cloretos totais serem sempre maiores que os cloretos livres, motivado pelo poder de fixação da matriz cimentícia.

#### 4.10.3 Migração de cloretos

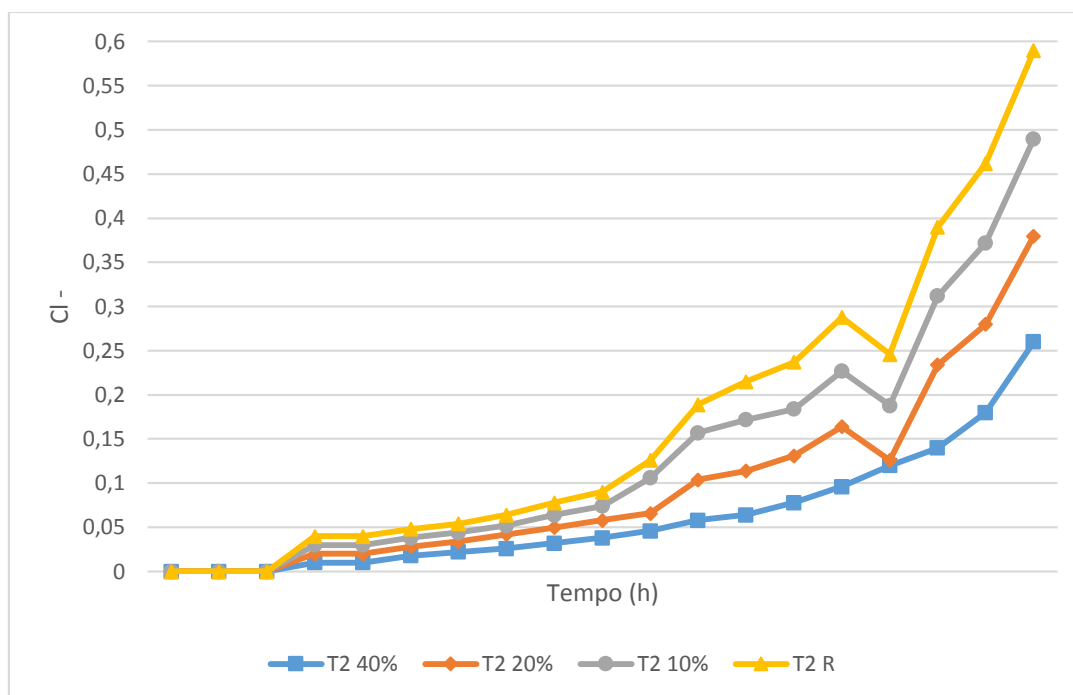
Os ensaios de migração de cloretos foram realizados em cada amostra de concreto. A concentração de íons cloretos aumentaram com o passar do tempo, porque a tensão aplicada força os íons a migrarem para o polo positivo.

Figura 4.23: Gráfico de migração por cloretos - Traço 1



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Figura 4.24: Gráfico de migração por cloretos - Traço II



Fonte: dados da pesquisa, 2015

Tabela 4.8: Coeficiente de difusão no regime estacionário

CONCRETO	T1 - REF	T1 - 10%	T1 - 20%	T1 - 40%	T2 - REF	T2 - 10%	T2 - 20%	T2 - 40%
COEFICIENTE DE DIFUSÃO NO REGIME ESTACIONÁRIO - $D_{SS}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$3,69 \times 10^{-8}$	$2,02 \times 10^{-8}$	$1,84 \times 10^{-8}$	$1,69 \times 10^{-8}$	$4,01 \times 10^{-8}$	$3,38 \times 10^{-8}$	$2,21 \times 10^{-8}$	$1,96 \times 10^{-8}$

Fonte: dados da pesquisa, 2015

Os resultados apresentados nas figuras 4.22 e 4.23 e na tabela 4.8, mostram um decréscimo do coeficiente de migração de cloretos ao adicionar RPP no traço de concreto, justificado pela diminuição da porosidade e diminuição do índice de vazios verificados nos ensaios anteriormente realizados, demonstrando um transporte mais lento de íons em concretos com adição maior de RPP e com menor porosidade.

Inicialmente, há um período em que a quantidade de cloretos que passa para a câmara anódica é desprezível. A sua duração corresponde ao chamado “time lag” (t) e, pode ser definido como o tempo necessário para que os íons cloreto passem através da amostra de concreto. Com isso, também pode-se observar um aumento desse período de tempo com as adições de RPP e com a diminuição da relação a/c

## CAPÍTULO V

---

### 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

#### 5.1 – Conclusões

Partindo dos resultados apresentados e das discussões realizadas, pode-se concluir que:

- O Resíduo do polimento do porcelanato da região do estudo não apresenta pozolanicidade, definindo-se como alternativa a sua utilização como material inerte;
- A adição de RPP na pasta de cimento não provoca alteração significativa na alcalinidade da água de equilíbrio;
- A substituição do agregado miúdo pelo RPP não apresentou ganhos significativos de massa unitária e menor índice de vazios quando utilizamos o método de empacotamento de agregados, mas os traços com adição de até 40% em relação ao agregado miúdo melhorou a massa unitária e diminuiu o índice de vazios;
- Por ser um material muito fino, o RPP se mostrou adequado na confecção de concreto auto adensáveis;
- Observou-se um incremento na resistência mecânica aos 90 dias nos traços com adição de RPP: variação de 19% a 35% no traço 1 aos 90 dias de cura e uma variação de 44% a 83% no traço 2 e uma diminuição da absorção e do índice de vazios com as adições, efeitos que pode estar associados ao método de empacotamento de agregados utilizada na dosagem dos concretos com adições
- A adição de RPP provocou um aumento de 327,00% no tempo que os cloretos levaram para despassivar a armadura dos concretos confeccionados com 10% de adição de RPP no traço 1 e um aumento de 551% no traço 2.
- Houve uma redução das concentrações de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade em todos os perfis analisados e uma diminuição das concentrações com a adição do resíduo e com a diminuição da relação a/c dos dois traços estudados, fato que pode ser explicado pelo fato dos concretos com adição apresentarem menores índices de vazios;

- A adição de RPP provoca um decréscimo do coeficiente de migração de cloretos no concreto, podendo ser justificado pela diminuição do índice de vazios provocada pelo empacotamento de agregados;

## **5.2 – Sugestões para Pesquisas Futuras**

- Estudar o emprego do RPP em novos traços de concreto autoadensável como material fino;
- Estudar a influência da adição de RPP frente à corrosão por carbonatação;
- Estudar a influência da adição de RPP frente à expansão causada por sulfatos, devido ao teor de magnésio presente na sua composição;
- Analisar as reações álcalis-agregado que podem ocorrer no concreto com adição do RPP;
- Avaliar o resultado de pozolanicidade após calcinação do RPP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201 Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Materials Journal, v. 88, n. 5, p. 544-82, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 114: **Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement**. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1992.

ANDRADE, M.C.P. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. 1.ed. São Paulo : PINI, 1992.

ANDRADE, J.J.O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 277p. 2001.

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas do estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 148p. 1997

AITCIN. P.C.; MINDESS. S. **Sustainability of concrete**. Modern concrete technology series. Edit. Spon Press. New York – USA, 2011.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. Produção Brasileira de Indústria Cerâmica. Acesso em 15 de outubro de 2011. Disponível em: <http://www.anfacer.com.br/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal (NBR 5751)**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cimento. (NBR 5752). Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Versão corrigida:1997. (NBR 7215) Rio de Janeiro, ABNT,1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752** Concreto auto adensável, Parte1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. (NBR 15823-1). Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-3.** Concreto auto adensável, Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. (NBR 15823-3). Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-4.** Concreto auto adensável, Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. (NBR 15823-4). Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5.** Concreto auto adensável, Parte 5: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. (NBR 15823-5). Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-6.** Concreto auto adensável, Parte 6: Determinação da viscosidade – Método do funil V. (NBR 15823-6). Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM G15-99b. **Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing.** 1999.

AÏTCIN, PIERRE-CLAUDE. **Concreto de alto desempenho.** [trad.] Geraldo G. Serra. São Paulo :Pini, 2000.

ALENCAR, R.S.A. **Dosagem do concreto auto adensável: produção de pré fabricado.** São Paulo, 2008. 165p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia – Universidade de São Paulo. São Paulo –SP.

ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, N.K.; VENNESLAND, O. Critical Chloride content in reinforced concrete – A review. **Cement and Concrete Research**, v.39, n.12, Dec.2009.

ARAÚJO, J. G. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedreira nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto adensável**. Goiânia, 2007. 152p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás.

AUSTIN.S.A.; LYONS, R.; ING,M. Electrochemical behaviour of steel reinforced concrete during accelerated corrosion testing. **Corrosion**. V. 60 (2), pp 203 – 212, 2004.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5ª ed., V. 01, Rio de Janeiro, 1994, 435 p.

BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J., CARVALHO; E. F. U. C.; RIELLA, H. G., Cerâmicas celulares obtidas a partir de resíduos de polimento; **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 1/2, p. 31-35, 2007.

BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J.; RIELLA, H. G., Characterization of cellular ceramics made by porcelain tile residues. **Materials Science & Engineering A**, v. 437, p. 222-225, 2006.

BITTENCOURT, E.L.; BENINCÁ, E. **Aspectos superficiais do produto grês polido**. *Cerâmica Industrial*, V. 7,n. 4, p 40-42, 2002.

CAVALCANTI, D. J. H.; **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação. Universidade Federal de Alagoas (UFAL). 2006

CALLISTER JUNIOR, W. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 587 p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997.

CASCUDO, O; PERRUCI, S.G. Argamassas estruturais de reparo à base cimento portland modificadas por polímeros e contendo adições minerais e sua atuação frente ao meio ambiente agressivo: carbonatação e cloretos. In: 48º Congresso Brasileiro de Concreto, 2006. Rio de Janeiro/RJ. **Anais...**

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical Changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. **Materials and Structures**. v.42, n. 4 p. 515-525, May 2009.

CAUDURO, F. PELISSER, F. **Estudo da Retração autógena de pastas de cimento Portland com adição de resíduo do polimento do porcelanato**. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2012

CAVALCANTI, D.J.H. **Contribuições ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando a sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia - Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON (CEB) e FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE (FIP). CEB-FIP Model Code 1990. Design Code. Lausanne: CEB, p. 437, 1993.

CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NURNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. **Corrosion and protection of metals in contact with concrete**. COST Action 509 – Final Report. European Community: Luxembourg, 1997.

COHEN, M.D.; SANTHANAM, M.; OLEK, J.; Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results. **Cement and Concrete Research**. V. 32. p. 915 – 921. 2002

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, V.32, p. 354-359, 1999.

D. Bonen, M.D. Cohen, Magnesium sulfate attack on Portland cement paste: I. Microstructural analysis. **Cement and Concrete Research**. V. 22 p. 169–180. 1992.

DAL MOLIN, D.C.C.; MOURA, W. A. Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre. V.4, n.2, p 41-56, abr./jun 2004.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estrutura de concreto armado: Análise das manifestações típicas e levantamentos de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1988. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



DNIZ, F.E.G. **Utilização de resíduos de cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios auto adensáveis**. Tese. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Paraíba, 2005.

DPNM. **Anuário do Departamento Nacional de Produção Mineral, 2010**. Disponível em: [http://www.dnpm.gov.br/assuntos/ao-publico/anuario-mineral/arquivos/ANUARIO\\_MINERAL\\_2010.pdf](http://www.dnpm.gov.br/assuntos/ao-publico/anuario-mineral/arquivos/ANUARIO_MINERAL_2010.pdf). Acesso em 14 de julho de 2014.

DYER, THOMAS. **A durabilidade do Concreto**. Editoria Ciência Moderna Ltda. Rio de Janeiro. 2015

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. ISAIA, G.C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap.26, p.903 - 931

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto**. Curitiba, 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná.

GLASS, G. K. **Reinforcement Corrosion: Advanced Concrete Technology 2: Concrete Properties**. 2003.

GOMES, P.C.C.; UCHOA, S.B.B.; BARROS, A. R. **Propriedades de durabilidade do Concreto Auto-adensável**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48º IBRACON. Rio de Janeiro. 2006.

GOMES, PAULO CESAR CORREIA; GETTU, RAVINDRA; AGULLÓ E JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO. **Concreto Auto-Adensável: Um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto**. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, agosto de 2003.

GOMIDES, M. J. **Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo**. Goiânia, 2001. 176 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 135p. 2000.

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2005.

GONÇALVES, J.P. Utilização de resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. REM: **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto. 60(a): 639-644, out - dez.2007.

HELENE, P. R. L.; MATOS, O.C. **Avaliação experimental da corrosão de armaduras em concreto utilizando a técnica de medidas dos potenciais de eletrodo**. São Paulo: EPUSP, 1992. São Paulo.

HELENE, P. MEDEIROS, M. Proteção Superficial para o Concreto Armado: Estudo da sua Capacidade de Redução na Penetração de Íons Cloretos. In: 48º Congresso Brasileiro de Concreto, 2006. Rio de Janeiro/RJ. **Anais...**

HUSSAIN, S.E.; AL-GAHTANI, A.S.; RASHEEDUZZAFAR. Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete. **American Concrete Institute**. V. 93. p. 534-538. November, 1996.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Relatório de pesquisa, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911\\_relatorio\\_construcao\\_civil.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf)> Acesso em 22 de outubro de 2013

International Organization for Standardization –ISO 13823: **General principles on design of structures for durability**.Disponível em: <[http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=39021](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=39021)> Acesso em 13 de julho de 2013.

ISAIA, G. C. **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. V. 01, São Paulo: IBRACON, 2005, 792 p.

JERONIMO, V.L.; **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras**. Rio Grande do Sul, 2014. 207 p. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

JACOBY, P.C.; PELISSER, F. **Utilização do resíduo de polimento do porcelanato na produção de materiais cimentícios**. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2011.

JOHN,V.M.; AGOPYAN, V. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Volume 5. Editora Edgar Blucher. São Paulo- SP

JOHN,V.M.**Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**KUMMER, L.; AZEVEDO, J.C.R.; BASSETTI, F.J.; RIELLA, H.G. Reutilização dos resíduos de polimento do porcelanato e feldspato na fabricação de novos produtos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, V.12. n.3. maio/junho 2007.**

**LIMA, M.G. Inibidores de corrosão – Avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos.** Tese. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1996, 174p.

**LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, 2004.

**LI ZONGJIN. Advanced concrete technology.** Edit. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2011

**LORENZI, V. Reaproveitamento do resíduo sólido proveniente da estação de tratamento de efluentes da indústria cerâmica de gresporcellanato.** Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Programa de pós-graduação em ciências ambientais. Criciúma, 2005

**MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVESG. A.; SANTANA L. N. L.; LIRA, H.L.; FERREIRA H. C. Re-aproveitamento do resíduo do polimento do porcelanato para utilização em massa cerâmica.** Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.2.2 (2007) 34-42

**MEIRA, G. R.; PADARATZ, Ivo J. Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, IX, 2002, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: 2002, p. 1425-1432.

**MEIRA, G.R. Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese. Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – PPGEC. UFSC, 2004.

**MEIRA, G.R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I.J.; ALONSO, C.; BORBA JUNIOR, J.C.** Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cementand Concrete Research**. V. 29.p. 667- 676. 2007.

**MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais Propriedades e Materiais, IBRACON 2008.**

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de conza de casca de arroz**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS, 2000.

MURALIDHARAN, S.; VEDALAKSHMI, R.; SARASWATHI, V.; JOSEPH,J.; PALANISWAMY, N. Studies on the aspects of chloride ion determination in different types of concrete under macro-cell corrosion conditions. **Building and environment**. V. 40. p. 1275-1281. 2005.

NEVILLE, Adam. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**.V. 34. p. 1275- 1296. 2004.

O'FARRELL, M.; WILD, S.; SABIR, B.B. Resistance to chemical attack of ground brick – PC mortar. **Cement and Concrete Research**. V.30. p. 757-765. 2000.

OH, B. H., JANG, S. Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. **Cement and Concrete Research**. pp. 47 – 53, 2007

PAPADAKIS, V. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI MaterialsJournal**, n. 89, p 119-130, Mar./ April,. 1982.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN,D.C.C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v.7,n. 4, p. 7-20, out/dez, 2007.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação. Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Porto Alegre, 2004.

PEREIRA,A.C; ANDRADE, M.A.S; SILVA, M.V.A; CASCUDO, O; FERREIRA,R.B; LIMA, M.B. Estudo da influência da trabalhabilidade do concreto fresco nos mecanismos de transporte de fluidos. In: 48º Congresso Brasileiro de Concreto, 2006. Rio de Janeiro/RJ. **Anais...**

PEREIRA, T.A.C.; **Concreto auto adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. USP – EESC – SET – LMABC. 2010

PETRUCCI, E.G.R.; **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, Ed. Globo, 12º ed. 1993, 299p.

POLIVANOV, et al. **O uso do resíduo do mármore e granito para indústria da cerâmica vermelha**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46º, cerâmica vermelha. São Paulo, 2002.

QUEBAUD, M.R; GOMES, F.C. Reciclagem de resíduos minerais sólidos como agregados de substituição em argamassa e concreto. In: 48º Congresso Brasileiro de Concreto, 2006. Rio de Janeiro/RJ. **Anais...**

RAMOS, A.M. C; MENDONÇA, A.M.G.D.; DIAS, S. L.; COSTA, J. M.; PEREIRA. **Diagnóstico e caracterização do resíduo de granito visando o uso em massas cerâmicas**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. 2008

RIBEIRO, D.V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e métodos de análise**. 1 ed, Rio de Janeiro. Elsevier, 2014. 272p

RIGUEIRA VICTOR, J. W.; SERNA ROS, P.; BARBOSA, M. P.; VARGAS, J. R. M. Utilização de modelos de ensaios reduzidos para a caracterização dos concretos autoadensáveis. . In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2003.

SABIR, B.B, WILD, S, BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Research**. V.23. p. 441 -454. 2001.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete. **Corrosion of Reinforcement in Concrete**. London UK, p. 49–58. 1990.

SILVA. M.O.B. **Produção do Concreto Auto Adensável (CAA) com a utilização de materiais da região de Belém – Pará**. Belém, 2008. 168p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: Estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação ( Mestrado ) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SNIS. Disponível em:  
[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911\\_relatorio\\_construcao\\_civil.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf)> Acesso em 22 de outubro de 2013

SONG, H.; ANN, K, Y. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**. V.49. p. 4113 – 4133. 2007.

SPAINHOUR, L.K.; WOOTON, I.A.; Corrosion process and abatement in reinforced concrete wrapped by fiber reinforced polymer. **Cement& Concrete Composites**, V.30 p. 535 – 543, March, 2008.

SOUZA, P.A.B.F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. Tese. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. 2007.

STEINER, L. R. **Efeito do rejeito de porcelanato na fabricação de blocos de concreto de cimento Portland**. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2011.

TOLEDO FILHO, R.D.; GONÇALVES, J.P.; FAIRBAIRN, E.M.R.; BORGES, A.; ROSA, L.P. Desenvolvimento de concretos de baixo impacto ambiental utilizando materiais cimentícios de baixo consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>. In: IX Congresso Brasileiro de Energia/ IV Seminário Latino Americano de Energia, 2002. Rio de Janeiro/RJ. **Anais....**,p.174-180

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

TUTIKIAN, B.F; MOLIN, D.C.D. **Concreto auto-adensável**. São Paulo. Pini 2008.

VALCUENDE, M; PARRA,C.; Natural Carbonation of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v.24, n.5. p.848-853, May 2010.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação – Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental