



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA
DE ARROZ NO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS
COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO EM
RELAÇÃO A PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE
DURABILIDADE, COM ÊNFASE NO TRANSPORTE DE
ÍONS CLORETO**

MARIANA BATTISTI FEDUMENTI

São Leopoldo, Março de 2013.

MARIANA BATTISTI FEDUMENTI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE
ARROZ NO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM
AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO EM RELAÇÃO A
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE, COM
ÊNFASE NO TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Co-Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza
Kazmierczak

Banca examinadora: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
Prof^a. Dra. Ângela Borges Masuero
Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo, Março de 2013.

Ficha catalográfica

F294a Fedumenti, Mariana Battisti

Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto / por Mariana Fedumenti Battisti. – 2013.

134 p. : il., 30cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

Orientação: Prof^a Dr^a Marlova Piva Kulakowski ;

Coorientação: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.

1. Agregado reciclado de concreto. 2. Cinza de casa de arroz.
3. Penetração de íon cloreto. I. Título.

CDU 666.972.12

MARIANA BATTISTI FEDUMENTI

**“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DA CASCA DE
ARROZ NO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM
AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO EM RELAÇÃO A
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE, COM
ÊNFASE NO TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 27 de março de 2013.



Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Orientadora - UNISINOS

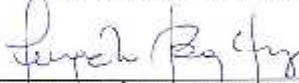


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGEC – UNISINOS

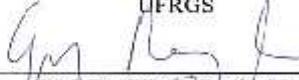


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coorientador - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Ângela Borges Masuero
UFRRGS



Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba



Prof. Dr. Mauricio Mancio
UNISINOS

“... Se quiser alguém em quem confiar, confie em si mesmo. Quem acredita sempre alcança...” (Renato Russo).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça da vida, por minha saúde física e mental e por me conceder alegrias nessa caminhada difícil, porém recompensadora.

Dedico estas páginas às pessoas que de alguma forma contribuíram para tornar o meu sonho realidade e acreditaram que eu conseguiria. Pessoas que, com simples palavras me motivaram a continuar, mesmo nas dificuldades, em especial, minha mãe Rosane.

Obrigada aos meus familiares, amigos e colegas de trabalho pelo apoio, motivação e compreensão. Vocês que ouviram tantas reclamações e me viram mal humorada, cansada e esgotada muitas vezes, mas ao mesmo tempo tão determinada. Desculpem a minha ausência em muitos momentos, fiquei triste por não poder comparecer em encontros, reuniões e eventos festivos, mas a renúncia faz parte das conquistas. Amo vocês!!! Elisa, Viviam e Dani, obrigada por oferecer a casa de vocês como “hotel”.

Agradeço também a todos aqueles envolvidos com a Unisinos, que trabalharam com carinho e dedicação para que tudo fosse resolvido da melhor maneira possível. Obrigada ao pessoal do LMC – Daiana, Felipe, Ingrid, Maurício e Rodrigo, que tive o prazer de conviver quase que diariamente durante meses, e que realizaram seu trabalho com alegria, tornando os meus dias mais divertidos.

Aos professores do curso de mestrado, que transmitiram toda sua sabedoria com entusiasmo, em especial aos professores: Maurício, Carlos, Andrea, Luis, Marcos, Luciana e Feliciane. Ao professor Cláudio de Souza Kazmierczak, pela sua co-orientação neste trabalho e pela dedicação ao PPGEC da Unisinos.

À minha querida orientadora Marlova Piva Kulakowski, que me “adotou” e apostou na minha capacidade de desenvolvimento. Ela que é uma das grandes responsáveis pelo meu aprendizado, amadurecimento e crescimento durante esses dois anos; e pela qual eu tenho muita admiração.

Aos meus queridos colegas do GMAT – Rafa, Vini, Bruno, Marquette e Mateus. Vocês que compartilharam todos os momentos dessa conquista, os bons e os ruins. Vocês que passaram de colegas, para amigos. Obrigada de coração pelas risadas, abraços, churrascos e brindes que fizemos! Rafa, obrigada pela companhia nas madrugadas sem fim e pela amizade! Vini, obrigada pelas caronas e pelas trocas de ideias.

Também agradeço aos demais colegas do mestrado com quem tive mais contato e que me apoiaram, entre eles: Ângelo, Fran, Marieli, Leandro, Suzi, Cláudia, Elisa, Vanessa, Eduardo, Josi, Rosana, Maura, Carina, Neuri, Guilherme, Micheli e Marina. Parabéns a todos pelo término dessa conquista!

Aos bolsistas de iniciação científica, pelo interesse em aprender e pela dedicação. Muitas coisas que estão aqui escritas nesta pesquisa é fruto do esforço de vocês também! Obrigada Tati, querida, pelo auxílio nos ensaios de penetração de íons cloretos. Jéssica e Jean, pelos ensaios de absorção de água por capilaridade. Vágner, pelos ensaios de resistência à compressão. Lucimar, pela preparação das amostras para o MEV. E obrigada à todos pela participação nos dias de moldagens.

À Jalir do Laboratório de Análise Ambiental da Unisinos, pela ajuda na preparação das soluções. Ao Samuel do Laboratório de Engenharia Elétrica da Unisinos pela ajuda nas montagens dos ensaios de penetração de íons cloreto.

Ao professor Fernando Duro, que foi meu incentivador, desde a época do meu TCC até o meu início no mestrado. Obrigada pelas dicas e por acreditar em mim!

À minha sócia e amiga Li, por ter trabalhado em dobro na UmArquitetura para que eu pudesse finalizar esta pesquisa. Obrigada pelo apoio e incentivo!

Ao Fábio Vieceli e Logustec representante da Pilecco Nobre pelo fornecimento da cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa.

À Coneresart pela doação do cimento e da areia utilizada na pesquisa.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e FAPERGS e FINEP, pelo financiamento da pesquisa.

E por fim, obrigada ao meu amor, Joca, pela infinita paciência durante todos esses anos, mas em especial por esse período, que parecia não terminar nunca. Obrigada pela tua compreensão, pelo teu amor, pelas palavras de motivação e por torcer sempre pelo meu melhor. Te amo!

Sem essas pessoas que citei acima, mesmo aquelas que eu não mencionei o nome (familiares e amigos), nada disto seria possível. Foi um trabalho árduo, que demandou esforço físico e mental de um grupo de pessoas, com um mesmo objetivo: fazer da pesquisa científica uma ferramenta para qualificar o meio em que vivemos.

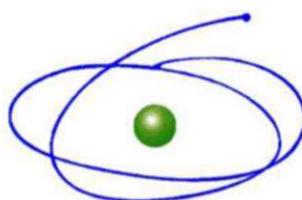
FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
CAPES/PROSUP.

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
1.4	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DO CONCRETO	31
2.2	CORROSÃO DESENCADEADA POR CLORETOS	34
2.2.1	Presença de íons cloreto no concreto	37
2.2.2	Teor crítico de íons cloreto no concreto	40
2.2.3	Fatores que influenciam a penetração de íons cloreto	41
2.3	MÉTODOS ACELERADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	44
2.3.1	Método AASHTO T259	46
2.3.2	Método AASHTO T277	47
2.3.3	Método ASTM C1202	47
2.3.4	Método NT Build 492	49
2.3.5	Discussão dos métodos apresentados	52
2.4	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	55
2.5	CINZA DE CASCA DE ARROZ	58
2.6	ASSOCIAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E POZOLANAS	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	65
3.1.1	Fatores de controle	65
3.1.2	Variáveis de resposta	66
3.2	MATERIAIS	66
3.2.1	Cimento	66
3.2.2	Cinza de casca de arroz (CCA)	67
3.2.3	Agregado Miúdo Natural (AMN)	70
3.2.4	Agregado Graúdo Natural (AGN)	71
3.2.5	Agregado Reciclado de Concreto (ARC)	72
3.2.6	Aditivo	73
3.2.7	Água	74
3.3	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	74
3.3.1	Produção dos concretos	74
3.3.2	Moldagem e cura dos corpos de prova	76
3.3.3	Preparação dos corpos de prova para ensaios de durabilidade	76
3.4	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	77
3.5	ENSAIO ACELERADO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202	79
3.6	ENSAIO ACELERADO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – NT BUILD 492	81
3.7	MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	83
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	86
4.3	DURABILIDADE	96
4.3.1	Absorção de água por capilaridade	96
4.3.2	Penetração de Íons Cloreto – ASTM C1202	100
4.3.3	Penetração de Íons Cloreto – NT Build 492	104
4.3.4	Relação entre resistência à compressão e os ensaios de penetração de íons cloreto	108
4.3.5	Avaliação dos métodos de ensaio de resistência à penetração de íons cloreto	111

5 CONCLUSÃO	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
APÊNDICES.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto.....	40
Tabela 2– Relação de pesquisas realizadas com os métodos de ensaios mais utilizados para avaliar a penetração de íons cloreto.....	45
Tabela 3 – Penetração dos íons cloreto baseado na carga passante.....	49
Tabela 4 – Voltagem e duração do teste dos espécimes de concreto.	51
Tabela 5 – Resistência à penetração dos íons cloreto para vários tipos de cimentos.....	52
Tabela 6 - Programa fatorial de experimentos - fatores de controle e níveis de estudo.....	65
Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do cimento.	66
Tabela 8 – Caracterização química da cinza de casca de arroz.....	67
Tabela 9 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.....	68
Tabela 10 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa	71
Tabela 11 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa	71
Tabela 12 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.	72
Tabela 13 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.	72
Tabela 14 – Granulometria do ARC.....	73
Tabela 15 – Dados Técnicos e características do MC-PowerFlow 1180	73
Tabela 16 – Consumo de materiais para os traços estudados.....	76
Tabela 17- Média dos resultados de compressão axial em todas as idades.....	86
Tabela 18- ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão em todas as idades.....	87
Tabela 19 – Equações de ajuste da curva de Abrams, 28 dias.	94
Tabela 20- ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade.....	96
Tabela 21 - Anova do modelo para penetração de íons cloreto através do método ASTM C1202.	100
Tabela 22 - Parâmetros das variáveis analisadas para carga total passante através do método ASTM C1202.	100
Tabela 23 - Anova do modelo para penetração de íons cloreto através do método NT Build 492.	105
Tabela 24 - Parâmetro das variáveis analisadas para penetração de íons cloreto através do método NT Build 492.	105
Tabela 25 - Classificação dos concretos quanto à resistência à compressão e à penetração de íons cloreto.	110
Tabela 26 – Avaliação dos métodos acelerados de penetração de íons cloretos.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem, do PPGEUC Unisinos.....	26
Figura 2 – Representação de uma pilha de corrosão em um mesmo metal.....	35
Figura 3 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti.	35
Figura 4 – Modelo de corrosão das armaduras de Tutti (1982), adaptado por Figueiredo e Meira (2011).	37
Figura 5 – Formas como os cloretos podem ser encontrados no concreto.	38
Figura 6 – Formas de penetração dos íons cloreto no concreto.....	38
Figura 7 – Imagens MEV, ampliado 5000x, do <i>Sal de Friedel</i> . (a) Formação lenta do <i>Sal de Friedel</i> a partir do C ₃ A. (b) Formação rápida do <i>Sal de Friedel</i> a partir da pozolana.	42
Figura 8 – Esquema do teste AASHTO 7259.....	46
Figura 9 – Esquema de teste ASTM C1202.	48
Figura 10 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos.....	50
Figura 11 – Disposição da instalação de migração.	50
Figura 12 – Difratograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.....	68
Figura 13 – Distribuição granulométrica da Cinza de casca de Arroz.	69
Figura 14 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).....	69
Figura 15 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).....	70
Figura 16 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).	70
Figura 17 – Granulometria do agregado miúdo natural, conforme NBR NM 248:2003.	71
Figura 18 – Curva de Absorção de água do ARC.	72
Figura 19 - Granulometria do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (ARC) utilizado na pesquisa.	73
Figura 20 – Detalhe do modo como foram cortadas as fatias do corpo de prova e sua aleatoriedade.	77
Figura 21 – Esquema experimental do método RILEM TC 116 PCD (1999).....	78
Figura 22 – (a) Bandeja com estrado de plástico metálico para passagem da água. (b) Detalhe do suporte com os reservatórios para o abastecimento constante de água.	78
Figura 23 – Esquema das ligações elétricas e dos aparelhos envolvidos no ensaio da ASTM C1202.	80
Figura 24 – Ensaio da ASTM C1202, com oito fatias sendo executado.....	80
Figura 25 – Esquema da inserção do suporte dentro da caixa plástica.....	81
Figura 26 – (a) Montagem completa dos componentes envolvidos no ensaio e (b) vista geral do sistema de ensaio.	81
Figura 27 – Medição da penetração de íons cloreto após o ensaio e pulverização do AgNO ₃ .82	
Figura 28 – Micrografia da interface ARC e pasta CCA, em microscópio ótico (50x).	83
Figura 29 – Micrografia da interface entre a pasta nova de cimento e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 1000x).	84
Figura 30 – Micrografia da interface entre a pasta nova de cimento e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 3000x).	84
Figura 31 – Micrografia da interface entre a pasta contendo CCA e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 3000x).	85
Figura 32 – Interface entre ARC e pasta de cimento com CCA aos 7 dias (aumento de 1000x).....	86
Figura 33 – Efeito isolado da variável “CCA” no comportamento de resistência à compressão axial.	88

Figura 34 – Efeito isolado da variável “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.....	88
Figura 35 – Efeito isolado da variável “A/AGL” no comportamento de resistência à compressão axial.....	89
Figura 36 – Efeito isolado da variável “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.....	89
Figura 37 – Interação da variável “CCA” e “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.....	90
Figura 38 – Interação da variável “CCA” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.....	90
Figura 39 – Interação da variável “A/AGL” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.....	91
Figura 40 – Interação da variável “CCA”, “ARC” e “A/AGL” em relação à resistência à compressão.....	91
Figura 41 – Interação da variável “ARC”, “A/AGL” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.....	93
Figura 42 – Diagrama de dosagem 28 dias de concretos sem ARC.....	94
Figura 43 – Diagrama de dosagem para 28 dias de concretos com ARC 25%.....	95
Figura 44 - Diagrama de dosagem para 28 dias de concretos com ARC 50%.	95
Figura 45 – Efeito isolado da variável “CCA” no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	97
Figura 46 – Efeito isolado da variável “ARC” no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	98
Figura 47 – Efeito isolado da variável “A/AGL” no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	98
Figura 48 – Interação da variável “CCA” e “A/AGL” no comportamento de absorção de água.....	99
Figura 49 –Relação entre os valores calculados e os valores observados para carga total passante.....	101
Figura 50 –Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 0.....	102
Figura 51 – Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 25%.	102
Figura 52 –Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 50%.	103
Figura 53 – Relação entre os valores calculados e os valores observados para o ensaio da NT Build 492.....	105
Figura 54 –Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 0%.	106
Figura 55 - Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 25%.	106
Figura 56 – Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 50%.	107
Figura 57 – Comparativo entre as médias dos resultados de resistência à compressão x ensaios acelerados de migração de cloretos (ASTM C1202 e NT Build 492) em concretos com 0%, 25% e 50% de ARC.....	109

RESUMO

FEDUMENTI, M.B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto.** São Leopoldo, 2013. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2013.

O concreto é o material de construção mais empregado no mundo, consumindo grandes volumes de recursos naturais não renováveis, além da obtenção de matérias primas para sua produção causar grandes impactos ambientais. Deficiências do concreto relativas às propriedades de durabilidade podem diminuir a vida útil das estruturas, gerando resíduos precocemente, ou então necessitando de intervenções não previstas. A incorporação de agregados reciclados de concreto na produção de concreto vem sendo proposto como substituição parcial do agregado natural. No entanto, seu emprego pode aumentar a porosidade do concreto e diminuir sua durabilidade. A utilização de cinza de casca de arroz pode trazer melhorias nas propriedades dos concretos, principalmente quando se refere à penetração de íons cloreto e às propriedades mecânicas. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da cinza de casca de arroz na penetração de íons cloreto em concretos com agregado reciclado de concreto. Foram produzidos concretos com 0; 25 e 50% de agregado reciclado em substituição ao agregado natural; 0; 10 e 20% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz; e relações água/aglomerante iguais a 0,42, 0,53 e 0,64. A resistência à compressão foi analisada aos 7, 28, 63 e 91 dias. Os ensaios de durabilidade englobaram os ensaios de absorção de água por capilaridade e dois métodos acelerados de penetração de íons cloretos: ASTM C1202 e NT Build 492, comumente empregados em pesquisas científicas. Os resultados mostram, em média, que a cinza de casca de arroz trouxe benefícios ao concreto com agregado reciclado de concreto em todas as propriedades estudadas. O comportamento observado pode ser atribuído a uma possível interação entre o agregado reciclado e o emprego da cinza de casca de arroz, em decorrência de uma reação pozolânica da cinza com produtos de hidratação da pasta do agregado reciclado e a um efeito microfíler da mesma nos poros deste agregado. O melhor desempenho foi obtido com concreto produzido com 50% de agregado reciclado de concreto e 20% de cinza de casca de arroz, com um aumento médio da resistência à penetração de íons cloreto de 91% pela ASTM C1202 e 64% pelo NT Build 492, em relação aos concretos de mesmo teor de agregado reciclado e sem cinza de casca de arroz.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto; cinza de casca de arroz; penetração de íon cloreto.

ABSTRACT

FEDUMENTI, M.B. **Evaluation of the influence of rice husk ash on the behavior of concrete with recycled concrete aggregate in relation to mechanical properties and durability, with emphasis on the transport of chloride ions** São Leopoldo, 2013. 134p. Thesis (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The durability of building materials is emphasized when it searches to maintain the useful life of the construction design or extend it. Corrosion reinforcement in concrete is among one major problem that affects the constructions throughout the world. Chloride ion is one of the agents that can induce the corrosion reinforcement in concrete. For this reason, research about the durability of construction materials in severe environments gained space in the scientific community. The use of recycled concrete aggregate as replacement of natural aggregate has been studied to solve the question about non-renewable raw materials. But, these recycled waste as aggregate can increase the concrete porosity and reduce its durability. The rice husk ash has been employed as supplementary material in Portland cement concrete to get a more sustainable concrete and improve its durability, mainly related to chloride ingress. The aim of this research was to study the influence of rice husk ash on the chloride penetration in concrete made with recycled concrete aggregate. The natural coarse aggregates were replaced by recycled concrete aggregates in amounts of 0; 25 and 50%. The rice husk ash was employed as replacement of Portland cement in 0; 10 and 20%. Three water/binder ratios were used in concrete production: 0.42, 0.53 and 0.64. The compressive strength tests were conducted at 7, 28, 63 and 91 days age. The concrete resistance to chloride ingress was tested by the ASTM C1202 test method and by the NT Build 492 test method. The results of all studied properties showed that the use of rice husk ash can improve the concrete resistance against chloride ingress in concrete made with recycled concrete aggregate. This behavior can be attributed to the reduction of the porosity of recycled concrete aggregate due to interaction of rice husk ash with the calcium hydroxide of this aggregate as well as due to micro filler effect. The best performance was obtained in concrete with 50% of recycled concrete aggregate and 20% of rice husk ash. The resistance against chloride ingress in relation to the same concrete without rice husk ash was increased 91% in average when tested by ASTM C1202, and 64% when tested by NT Build 492.

Key words: recycled concrete aggregate; rice husk ash; chloride ions; compressive strength; water absorption.

1 INTRODUÇÃO

A percepção de que o meio ambiente vem se alterando com as intervenções do homem é evidente. Os recursos naturais são matérias-primas para a sobrevivência humana, por isso urge a necessidade de gerenciar e diminuir os impactos ambientais ocasionados pela própria ação humana. No caso da construção civil, a grande preocupação é com o desperdício de materiais, associado ao grande consumo de recursos naturais não renováveis. Desperdício consiste em um consumo de materiais além do mínimo necessário para a produção (ou manutenção) de um bem (ANDRADE, 1999; SOUZA et al., 1999). Por outro lado, existem as perdas, que são inevitáveis, porém, elas podem ser controladas através de planejamentos estratégicos tanto na fase de concepção de projeto como nas escolhas de materiais e estrutura a ser utilizada. Na verdade, a eliminação de desperdícios é o foco principal para o processo de melhoria da produção enxuta (FORMOSO et al., 2002).

Além do consumo excessivo de bens naturais, tem-se um gasto considerável de energia. Esse fator é avaliado durante o processo de construção, como, por exemplo, a produção e o transporte dos materiais. Outro aspecto importante que deve ser ressaltado são as emissões ocasionadas pela fabricação dos materiais na construção, gerando um nível alto de liberação de CO₂ na atmosfera. Desde 1751 cerca de 347 milhões de toneladas de gás carbônico foram liberadas na atmosfera e, por exemplo, as emissões devidas à queima de combustíveis fósseis para a produção de cimento (386 milhões de toneladas métricas de carbono em 2008) duplicaram desde meados dos anos 1970, representando atualmente 4,4% de liberação mundial de CO₂ (CDIAC, 2013).

Na Ásia, o consumo de cimento dobrou no período de 11 anos (em 1994 eram 0,68 bilhões de toneladas enquanto em 2005, em torno de 1 bilhão de toneladas). Outro dado relativo às emissões de CO₂ é apresentado por Bjegovic, Stirmer e Serdar, (2010), que apontam a indústria de cimento responsável por 7% das emissões mundiais de CO₂, o grande problema do aquecimento global. Os mesmos autores afirmam que, anualmente, são produzidos mais de um bilhão de toneladas de resíduos de construção e demolição que são descartados em aterros sanitários pelo mundo inteiro.

O relatório apresentado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011) apresenta um consumo de cimento no ano de 2011 de 65 milhões de toneladas, obtendo um crescimento de 8,3% sobre o ano anterior e elevando o consumo per capita brasileiro para 333 Kg/hab/ano, a maior marca de toda a história. Com esses números o Brasil se enquadra

em quarto lugar na lista dos maiores consumidores de cimento, perdendo somente para China, Índia e Estados Unidos, nesta ordem (SNIC, 2011).

Conforme o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCT, 2013) o Brasil tem como obrigação a elaboração e atualização periódica do Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Um inventário preliminar, apresentado pelo MCT (2009), relata as emissões antrópicas de gases de efeito estufa que ocorreram em decorrência de atividades de diversos setores no Brasil, nos períodos de 1995 a 2005. As emissões de CO₂ com origem na produção de cimento para o ano de 2005 foram de 6% em relação às emissões de CO₂ relativas ao setor de energia. Mais recentemente esta taxa, calculada com base nos dados do relatório anual de produção nacional de cimento (SNIC, 2011), está na ordem de 10% considerando o índice de 659 kg de CO₂ por tonelada de cimento (LIMA, 2010) e os dados de emissão de CO₂ devida à queima de combustíveis fósseis em 2011 (US-EIA, 2013). Este aumento nas emissões, em função da produção e consumo de cimento, está associado ao crescimento do setor da indústria da construção civil observado nos últimos anos e exemplifica um dos fatores que tornam este setor de elevado impacto ambiental.

No entanto, ao compararem-se as emissões de CO₂ devidas à produção dos cimentos nacionais com as emissões de mesma origem em nível mundial, tem-se 659 kg de CO₂ por tonelada de cimento para os primeiros e entre 800 kg e 880 kg de CO₂ por tonelada de cimento para os últimos (LIMA, 2010). A menor quantidade de emissões de gás carbônico dos cimentos nacionais se deve, em parte, ao emprego de resíduos e pozolanas para compor o produto final. Neste sentido, o estudo e emprego de resíduos, com características pozolânicas para compor cimentos e concretos, contribui para diminuir o impacto ambiental da indústria da construção.

Na tentativa de diminuir os desperdícios de materiais da construção civil, reduzir gastos de energia, e amenizar a problemática da emissão de CO₂ na atmosfera, é imprescindível que a construção civil incorpore cada vez mais princípios de sustentabilidade e ecoeficiência. A abordagem sustentável para as construções vem sendo enfocada há pelo menos duas décadas, sendo este o caminho para contribuir na minimização desses problemas. O uso de resíduos na produção de componentes reduz emissões de gás carbônico, diminui a extração de recursos naturais não renováveis e dá destino para rejeitos de diversas origens. As aplicações de materiais com durabilidade adequada ao meio de exposição auxiliam na redução dos impactos ambientais da construção civil.

De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério das Cidades (2013) os resíduos de construção e demolição, no Brasil, representam de 51 a 70% dos resíduos sólidos urbanos. Conforme Pinto (1999), a taxa de resíduo de construção chega à ordem de 150 quilos por metro quadrado construído.

O resíduo de concreto se destaca entre os resíduos de construção e demolição (RCD), pois possui o maior potencial de uso, visto que é mais homogêneo e apresenta menor grau de contaminação se comparado aos RCD mistos. A geração desses resíduos pode ser proveniente de demolições de edificações, da produção de elementos de concreto pré-moldados, bem como em usinas de concreto.

Um enfoque especial vem sendo dado para os resíduos de concreto na produção de agregados reciclados. Algumas pesquisas já foram desenvolvidas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos (WERLE, 2010; TROIAN, 2010; BENETTI, 2012) indicando a viabilidade do emprego do agregado reciclado de concreto (ARC) em teores de substituição do agregado natural de até 50%.

A reciclagem de um resíduo de construção civil é uma escolha interessante e com bons resultados, pois se resolve diversos problemas: permite a preservação dos recursos naturais, substituídos por resíduos, e tem-se um destino final desse resíduo, que não seja o meio ambiente; reduzindo o volume de aterros e também o consumo de energia.

Outro resíduo, que atualmente está sendo chamado de coproduto ou subproduto, por ter um valor comercial considerável, é a cinza de casca de arroz (CCA). Givi et al. (2010) afirmam que a CCA é um subproduto obtido a partir da queima de casca de arroz que possui elevada reatividade pozolânica. Esta cinza é utilizada como substituição ou adição ao cimento na produção de concretos e argamassas, pois possui, na sua composição, uma grande quantidade de sílica amorfa (maior que 90%), que, ao ser combinada com o cimento aprimora suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade. Kieling (2009) contribuiu, em seu estudo, para viabilizar a cinza de casca de arroz residual como um coproduto, através do processo de segregação. Este estudo teve continuidade nos trabalhos de Krug (2011) e Calheiro (2011).

As pesquisas científicas são fundamentais para a transformação de resíduos em coprodutos, visto que avaliam desde a fonte geradora, a caracterização deste resíduo até a melhor maneira de transformá-lo em um coproduto. Do ponto de vista empresarial, essa

solução é excelente, pois além de se obter uma destinação correta para seus resíduos, ainda pode-se ter outra fonte de renda.

Dentro dessas linhas de pesquisa, o uso da CCA é crescente na incorporação em concretos, em função dos benefícios citados anteriormente. Vários estudos foram realizados para avaliar a melhor forma de beneficiamento da cinza para incorporação no concreto, citando-se como os mais recentes Meira (2009); Muthadhi e Kothandaraman (2010); Krug (2011); Calheiro (2011); Siddique e Khan (2011).

Estudos aprofundados sobre a associação do uso de agregados reciclados e pozolanas ainda não são expressivos, portanto é necessário um maior conhecimento das propriedades desses materiais, pois quando adicionados ou substituídos ao concreto e/ou argamassa, modificam suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Visto que a relação de durabilidade e vida útil desses novos materiais está diretamente ligada às suas propriedades, torna-se imprescindível uma avaliação mais profunda sobre o comportamento do concreto frente aos agentes agressivos que induzem e provocam a deterioração do concreto.

Entre esses agentes, destaca-se a ação dos íons cloreto, pois é um dos principais desencadeadores do processo corrosivo das armaduras. A presença dos íons cloreto pode ter origem na mistura do concreto, os chamados cloretos incorporados no concreto, ou pode ter origem externa, penetrando no concreto endurecido ao longo do tempo.

É importante entender a maneira como os íons cloreto atuam e como pode-se evitar sua penetração para que sua durabilidade e vida útil aumentem. As pesquisas são realizadas simulando a penetração dos íons cloreto através de métodos de aceleração em laboratório. Porém, deve-se elencar criteriosamente o método a ser adotado nos estudos, pois alguns são mais agressivos que outros (ANDRADE, 1993; FELDMAN et al., 1994, DÍAZ, NÓVOA e PÉREZ, 2006).

Como parte de um projeto mais abrangente, este trabalho visa a avaliação de propriedades relacionadas à durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto e cinza de casca de arroz, enfocando a penetração de íons cloreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil é responsável por grandes impactos ambientais devido às emissões e geração de resíduos, desde a extração da matéria-prima, da produção de insumos,

do transporte, até o processo construtivo, manutenção ao longo da vida útil e final do ciclo de vida das construções.

Em relação ao consumo de recursos naturais, Souza (2005) relata que, para a construção de um metro quadrado de uma edificação, estima-se que são gastos em volta de uma tonelada de materiais, que demandam grandes quantidades de areia, brita, cimento, etc.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o concreto de cimento Portland é o material manufaturado mais utilizado no mundo. Sendo assim, é importante que se incorpore cada vez mais materiais alternativos no concreto com o objetivo de preservar o meio ambiente. A durabilidade desses novos materiais é de extrema importância, pois define a sua vida útil. Além disso, a conservação dos recursos naturais através da produção de materiais mais duráveis é um avanço ambiental.

O ambiente no qual o concreto está inserido tem relação com sua velocidade de deterioração. No tocante a deterioração devido à agentes químicos, os agentes agressivos, contidos ou absorvidos pelo concreto, como os íons sulfetos (S⁻), íons cloreto (Cl⁻), nitratos, gás sulfídrico (H₂S), cátion amônio (NH₄), óxidos de enxofre (SO₂, SO₃), gás carbônico (CO₂), entre outros, são responsáveis por essa deterioração. Os íons cloreto, por exemplo, quebram a película existente de passivação do aço, acelerando o processo de corrosão.

Considerando as manifestações patológicas existentes, o período de transporte dos agentes agressivos, que penetram no revestimento da armadura ocasionando a despassivação da mesma (iniciação), é parte importante do processo de corrosão em si. O Brasil possui uma extensa costa marítima, o que favorece o processo de deterioração física e química do concreto armado. Conforme relatado por Mehta e Monteiro (2008) os oceanos cobrem 80% da superfície da terra, portanto um grande número de estruturas é exposto à água do mar direta ou indiretamente, já que os ventos podem carregar névoa salina a alguns quilômetros para o interior a partir da costa.

A corrosão das armaduras deteriora as estruturas de concreto sob dois pontos de vista de ação simultânea: a primeira diz respeito à perda de seção das barras e seus efeitos estruturais e a segunda se relaciona ao comportamento mecânico de fissuração do concreto e suas consequências. Acontecendo ambos os processos sem uma intervenção na estrutura, implicarão na redução do seu tempo de vida útil (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

Os testes acelerados de penetração de íons cloreto foram desenvolvidos a partir da necessidade de se medir a penetrabilidade dos cloretos nos concretos de uma maneira rápida, a fim de avaliar a durabilidade e vida útil de concretos. Porém, alguns métodos largamente utilizados, como por exemplo, o método proposto pela AASHTO T259, AASHTO T-277 e ASTM C 1202 são criticados pelo fato de não representarem as condições reais de exposição, ou seja, são muito agressivos ou demandam muito tempo de ensaio (FELDMAN et al., 1994; FELDMAN, JR. e CHAN, 1999; SHI, 2004; CASTELLOTE, ANDRADE e ALONSO, 2004). Essa agressividade pode ser ocasionada pela alta tensão aplicada, resultando em aumento significativo da temperatura do corpo de prova, por exemplo.

Sendo assim, é imprescindível avaliar um método diferente para determinar a penetração de íons cloreto, sendo este menos agressivo e que seja adequado ao estudo de concretos com RCD. Dentro dos métodos disponíveis menos agressivos, podem ser citados o proposto por Andrade (1993) e pela NT Build 492.

Desta forma, o tema da presente proposta refere-se à reciclagem de resíduos, à durabilidade de materiais e ao estudo de método de penetração de íons cloreto, inserindo-se nas linhas de pesquisa do PPGEC, conforme Figura 1.



Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem, do PPGEC Unisinos.

Fonte: Adaptado de Kulakowski (2011).

Esta proposta insere-se dentro de dois projetos em desenvolvimento no PPGEC – Unisinos coordenados pelo GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem. O primeiro deles foi contemplado na Chamada Pública MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal, Saneamento Ambiental e Habitação - 7/2009,

no Tema 2.3 (Avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras), cujo objetivo geral é “Definição de critérios e métodos para avaliação de desempenho de produtos e sistemas construtivos inovadores”. Neste tema insere-se o Subprojeto 2 - Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores – componentes que incorporam resíduos de concreto, com o objetivo geral “Definir uma metodologia para a avaliação da durabilidade de sistemas inovadores que incorporem agregados reciclados em matrizes de concreto e argamassas”.

O segundo projeto do qual a proposta de dissertação faz parte, foi contemplado no Edital PRONEM/FAPERGS/CNPQ n. 003/2011, Programa de Apoio a Núcleos Emergentes, sob o título “Associação de agregado reciclado de concreto com cinza de casca de arroz na produção de concretos”, onde são previstos o estudo do desempenho mecânico e de durabilidade destes concretos.

Outras duas dissertações com o enfoque na durabilidade dos materiais com a incorporação de resíduos estão sendo finalizadas; um dos trabalhos estuda a retração do concreto (CECCONELLO; 2013) e o outro a carbonatação (SARTORI, 2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral verificar a influência da substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz (CCA) em concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (ARC) nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos, com ênfase no transporte de íons cloreto.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Verificar a influência dos teores de substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto na penetração acelerada dos íons de cloreto, na absorção de água e na resistência à compressão de concretos;
- Verificar a influência dos teores de substituição de cimento por cinza de casca de arroz na penetração acelerada dos íons de cloreto, na absorção de água e na resistência à compressão de concretos;

- Verificar o efeito da interação entre agregados reciclados de concreto com a cinza de casca de arroz na penetração acelerada dos íons de cloreto, na absorção de água e na resistência à compressão de concretos;
- Avaliar a relação entre resistência à compressão e penetração de íons cloreto dos concretos estudados;
- Avaliar dois métodos de transporte de íons cloreto para fins de análise da durabilidade de concretos com agregado reciclado de concreto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa é desenvolvida em cinco capítulos. O primeiro capítulo abrange a introdução e justificativa, demonstrando a problemática do estudo e sua relevância, seguido dos objetivos a serem alcançados no estudo.

O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema de pesquisa, com enfoque em resíduos de concreto, cinza de casca de arroz, concretos produzidos com agregado reciclado e pozolanas, ação dos íons cloreto e métodos acelerados de penetração dos íons cloreto, com enfoque especial nos métodos de penetração acelerada desenvolvidos pela ASTM C1202 e NT Build 492.

O capítulo três contempla o programa experimental do estudo em questão, assim como os materiais e métodos utilizados na pesquisa, ou seja, a maneira como o programa experimental foi executado.

Os resultados, as análises e discussões desses resultados são apresentados no capítulo quatro.

Por fim, o quinto capítulo demonstra as conclusões da pesquisa, respondendo aos objetivos específicos do estudo.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Vários são os fatores que interferem no desempenho do concreto; como o tipo de cimento, a relação água aglomerante (a/agl), os agregados, as condições de ensaio, os métodos utilizados, entre outros. Por isso, é necessário estabelecer os limites desenvolvidos durante o programa experimental. Destacando-se:

Tipo de cimento: como o objetivo geral da pesquisa é verificar a influência da utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) e a substituição de parte do cimento por

cinza de casca de arroz (CCA) na durabilidade de concretos, frente à penetração de íons cloreto; decidiu-se trabalhar com apenas um tipo de cimento, o CII-F-32, pois não há adição pozolânica na sua composição.

Percentuais de substituição de cimento por CCA: foram empregados apenas dois percentuais de substituição do cimento pela cinza de casca de arroz, 10% e 20%, e se embasam em outros estudos sobre esse assunto, como por exemplo, o estudo realizado por Krug (2011).

Percentual de substituição do agregado graúdo: também foram empregados dois percentuais de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, 25% e 50%, e foram definidos conforme pesquisas já realizada sobre o assunto, como os estudos de Troian (2010) e Werle (2010).

Tipo de agregado reciclado: o agregado graúdo reciclado utilizado para o estudo é proveniente de resíduo da produção de laje pré-fabricada tipo Rott, submetida a cura convencional, com fck 35 MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20 mm.

Tipo de cinza de casca de arroz: cinza comercial gerada pela empresa Pilecco Nobre Alimentos Ltda., que é parceira da Unisinos. A cinza é oriunda de um mesmo lote de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são apresentados assuntos pertinentes ao estudo como a durabilidade e vida útil do concreto, fatores que influenciam a penetração de íons cloreto, corrosão das armaduras, resíduo de concreto, cinza de casca de arroz, associação de agregados reciclados de concretos e pozolanas e métodos acelerados de penetração de íons cloreto, com enfoque nos dois métodos utilizados nesta pesquisa: ASTM C1202 e NT Build 492.

2.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DO CONCRETO

Uma vez que o concreto é muito utilizado na construção civil, há preocupações em torno de sua durabilidade e vida útil. Se este for concebido sem o devido cuidado, implicações futuras como manifestações patológicas prematuras não permitirão que a estrutura atinja o tempo de vida útil inicialmente estimado, causando sérios problemas de segurança.

A capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto, é contemplada na abordagem da durabilidade das estruturas da ABNT NBR 6118:2003: “Conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período de vida útil, sob as condições ambientais previstas na época do projeto”.

Mehta e Monteiro (2008) definem durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente.

Segundo a ABNT NBR 15575-1:2013 a durabilidade do edifício e de seus sistemas é uma exigência do usuário, pois está diretamente associada ao custo global do bem imóvel. A norma relata que a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional.

Jinping e Xuesong (2010) acreditam que a durabilidade do concreto deve ser considerada tendo em vista quatro fatores principais: ambiente, que pode ser classificado como comum, marinho e industrial; materiais; componentes; e estrutura. Para estes autores, a durabilidade da estrutura de concreto é definida em função da sua resistência e em função do

uso sem custos adicionais para manter sua segurança, funções e aparência do concreto durante a sua vida útil.

Helene (1997) menciona a durabilidade das estruturas de concreto como sendo de responsabilidade de seis partes, requerendo cooperação e esforços coordenados. A primeira parte é o proprietário, que deve definir as suas expectativas presentes e futuras em relação ao uso da estrutura; o segundo responsável é o autor do projeto arquitetônico, definindo assim detalhes e especificando materiais; a terceira parte é o idealizador do projeto estrutural, definindo geometrias, detalhes, especificando materiais e verificando as manutenções preventivas. O quarto é responsável pela tecnologia do concreto, definindo as características dos materiais, traços e metodologias de execução, em conjunto com os autores do projeto arquitetônico e estrutural. A quinta responsabilidade é de critério do executor da construção, definindo metodologias complementares da construção e respeitando os projetos. Por fim, o usuário também deve ter sua responsabilidade na durabilidade, obedecendo às condições de uso, operação e manutenção preventiva especificada.

O período de tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário pré-estabelecidas é denominado de vida útil (ABNT NBR 15575-1:2013).

Medeiros, Andrade e Helene (2011) resumem a definição de vida útil como uma análise ampla, envolvendo diversas partes como: projeto, execução, materiais, uso, operação e sua manutenção; sempre focalizando o desempenho, a qualidade e a sustentabilidade.

Conforme a opinião de Jinping e Xuesong (2010) a vida útil média prevista para uma estrutura de concreto deve ser de 40 a 50 anos, sendo que algumas exigem centenas de anos. No entanto, segundo os autores, um concreto tem sua vida útil mais curta, quando inserido em ambiente corrosivo, durando de 15 a 20 anos e, dependendo da situação, com menos de cinco anos já ocorrem intervenções. Isso gera um custo surpreendente, sendo um problema econômico visível.

A rede de poros presente no concreto é diretamente relacionada com a durabilidade e vida útil das estruturas, pois é através desses poros que ocorre o ingresso dos agentes agressivos. Segundo Silva (2011), este transporte dependerá de uma série de fatores físico-químicos, tais como: as condições ambientais onde o concreto está inserido, da velocidade de ação dos agentes agressivos, da temperatura e umidade do meio, da dimensão e estrutura dos poros, entre outros.

Quando o cimento se combina com a água, seus distintos componentes se hidratam constituindo um conglomerado sólido, composto pelas fases hidratadas do cimento e uma fase aquosa que resulta de parte do excesso de água de amassamento necessária para a mistura adequada de todos os seus componentes. O concreto resulta de um sólido compacto e denso, porém poroso. A rede de poros é uma trama de canais e capilares, nem sempre comunicados entre si, mas que deixam que o concreto apresente certa permeabilidade aos líquidos e gases. Assim, ainda que o cobrimento das armaduras seja um empecilho físico, este é permeável em certa medida e permite o acesso de elementos agressivos até o aço (ANDRADE, 1992).

Conforme Campiteli (1987), a porosidade do concreto é causada principalmente pela água da mistura, porosidade dos agregados, alteração na zona de contato entre a pasta e os agregados, fissuração e falhas na produção de concretos.

Entre os transportes de massa no concreto, a absorção de água por capilaridade é um dos mecanismos mais comuns, já que é um fenômeno espontâneo (ISAIA, 2011). A penetração de água através da absorção capilar tem um papel muito importante na entrada de agentes contaminantes quando as estruturas são construídas em ambientes agressivos.

Zhuo, Feng e Dawang (2010) descreveram o ambiente marinho como o mais grave para a estrutura de concreto, pois os íons prejudiciais ao concreto levam ao dano inicial da estrutura. A penetração de íons cloreto leva à corrosão das armaduras, que é a principal causa da redução do desempenho do concreto, diminuindo sua vida útil.

De modo geral, a substituição parcial de agregados naturais por agregado reciclado de concreto torna o concreto mais poroso, diminuindo assim suas propriedades mecânicas. Outro aspecto importante nestes concretos é o aumento do volume total de poros, que dependerá da idade deste concreto e da quantidade de argamassa presente nos agregados. Além disso, quanto maior for a relação a/agl e a quantidade de agregado reciclado, maior a permeabilidade de água no concreto (SOBERÓN, 2002; LI, XIAO e ZHOU, 2009; THOMAS et al. 2013).

No estudo realizado por Medina, Frías e Rojas (2012), a inclusão de agregado graúdo cerâmico na matriz de cimento, provocou um refinamento do sistema de poros, aumentando o volume de poros capilares e diminuindo o volume de macroporos.

Andrade (1993) relata que a penetração de cloretos através do concreto é um dos fatores que leva a despassivação das barras de reforço, e, portanto, pode encurtar a vida útil da

estrutura. Porém, o tempo necessário para que esses íons alcancem a armadura depende, em primeiro lugar, do mecanismo de intrusão; e em segundo lugar, da concentração externa de cloretos e da microestrutura do concreto. Segundo a mesma autora, quando o concreto é completamente saturado de água, os cloretos penetram no concreto por um mecanismo de difusão pura, sendo a diferença de concentração a força motriz. No entanto, quando o concreto estiver parcialmente saturado, os cloretos podem penetrar por absorção e força capilar.

Sendo assim, em concretos de mesmos materiais e proporcionamentos, aquele que contiver a substituição parcial ou total de agregado natural por ARC será mais suscetível ao ingresso de agentes agressivos do que naqueles com 100% com agregado natural. Porém, a incorporação de materiais com propriedades pozolânicas, como o caso da cinza de casca de arroz, pode auxiliar para a diminuição da permeabilidade desses concretos e por consequência para a sua maior resistência à penetração de íons cloreto.

2.2 CORROSÃO DESENCADEADA POR CLORETOS

Algumas das variáveis que interferem na corrosão das armaduras, antes do término de sua vida útil, são: a qualidade do concreto, o meio onde ele está inserido e o cobrimento inadequado desta armadura, que pode tanto ser proveniente de um erro de projeto e especificação, como de uma má execução. Porém, para que a corrosão exista de fato, é necessário que exista umidade, pois mesmo após a despassivação, a velocidade de corrosão diminui expressivamente se o concreto permanecer seco; o mesmo acontece se o concreto ficar saturado, pois o oxigênio não conseguirá penetrar. Sendo assim, ambientes marinhos, com condições de ciclos de molhagem e secagem são perfeitos para um processo corrosivo.

Segundo Farias e Tezuka (1992), a maioria dos casos de corrosão das armaduras de concreto é do tipo eletroquímica. Da mesma forma, Figueiredo e Meira (2011) afirmam que a formação de uma célula eletroquímica ou célula de corrosão depende da existência de quatro componentes. Um ânodo, onde ocorre a reação de oxidação e dissolução; um cátodo onde ocorre a reação de redução; um condutor metálico, onde a corrente elétrica é um fluxo de elétrons e um eletrólito, onde a corrente é um fluxo de íons através de um meio aquoso.

O eletrólito é de essencial importância, pois quanto maior for sua condutividade, maior será a corrente iônica e o processo de corrosão acontecerá mais rápido. Fatores como umidade e oxigenação também influenciam no processo: onde há ambientes com baixa umidade, há carência de eletrólito, dificultando o processo corrosivo; onde existe pouco

oxigênio, as reações de redução são atenuadas, controlando a velocidade de corrosão. A Figura 2 ilustra de forma simplificada o processo eletroquímico de corrosão.

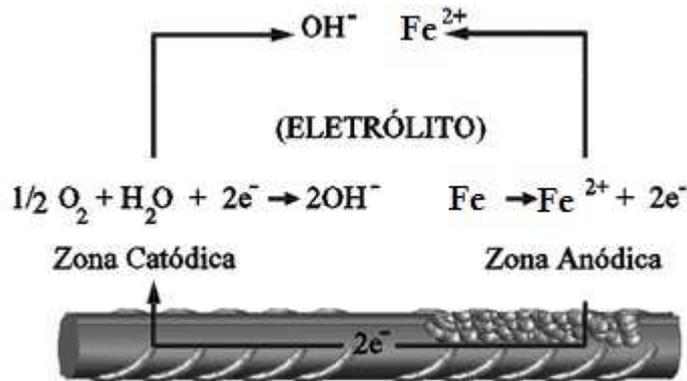


Figura 2 – Representação de uma pilha de corrosão em um mesmo metal.

Fonte: Adaptado de Figueiredo e Meira (2011).

O processo de corrosão pode ser dividido em duas fases, conforme mostra a Figura 3. A primeira, a iniciação, é o intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem através do cobrimento do concreto até atingir as armaduras, em certa quantidade necessária para provocar a despassivação das barras de aço. A segunda fase, chamada de propagação, se inicia após a despassivação das barras de aço, é o momento em que o processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se e os produtos de corrosão são gerados pela dissolução do ferro (oxidação) (TUUTTI, 1982; CASCUDO, 1997; LIMA, 2009).

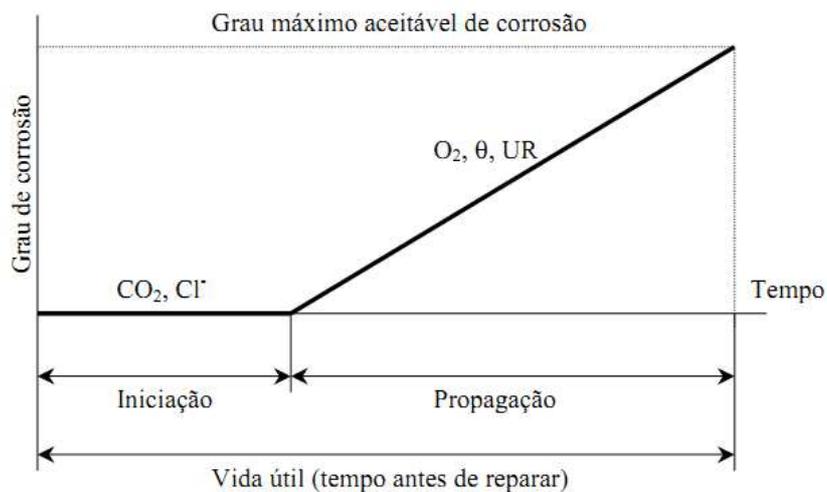


Figura 3 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti.

Fonte: Tuutti (1982).

Para Tuutti (1982), a taxa de corrosão no início do processo não é zero, mas é um valor bem baixo, podendo ser interpretado como um processo lento e que demandará tempo,

dependendo de uma série de outros fatores como o ambiente em que ele está inserido, o tipo de cimento, a qualidade do cobrimento da armadura, entre outros.

Figueiredo e Meira (2011) concordam que esta fase irá depender de uma série de fatores, como a relação a/agl utilizada, a presença ou não de adições pozolânicas, a agressividade do meio em que a estrutura está inserida; além das características dos materiais, como a porosidade superficial, o tipo de cimento, tipo de aço, entre outros.

A fase de iniciação começa desde a construção até o momento onde são criadas condições para ocorrer a despassivação do aço, geralmente determinadas pela carbonatação da camada de recobrimento ou pela penetração de íons cloreto. Em ambientes marinhos, a perda da passivação é ocasionada pela ação dos íons cloreto (SALTA, 1996).

Segundo Helene (1992) e González et al. (1996), a presença de íons cloreto pode ocasionar a perda da passividade (natural) da armadura do concreto, destruindo assim a camada passivadora, sendo estes fatores desencadeantes que atuam durante o período de iniciação.

Para Cascudo (1997), o período de iniciação acontece quando a película passiva deixa de defender a armadura, sendo descaracterizada, em função de duas condições básicas:

- presença de íons cloreto em uma quantidade suficiente: podem atingir a armadura por um meio externo, através da difusão; podem já estar no interior do concreto através da água de amassamento ou em agregados contaminados; e também podem estar presente na composição de aditivos aceleradores de pega e endurecimento à base de cloreto de cálcio;

- diminuição da alcalinidade do concreto: a redução da alcalinidade do concreto pode acontecer especialmente devido às reações de carbonatação, ou mesmo devido à penetração de substâncias ácidas no concreto. Em casos específicos, a queda na alcalinidade pode ser originária da lixiviação do concreto, onde a solução alcalina intersticial é lavada pelo ataque das águas.

Embora o concreto normalmente não tenha cloretos iniciais, eles podem chegar até a armadura de aço através da rede de poros, se provenientes de ambientes marinhos. Sendo assim, a quantidade de cloretos vai aumentando, conforme o passar do tempo, podendo chegar na superfície da armadura e gerar velocidades de corrosão intensa e crítica (ANDRADE, 1992).

Pode-se dizer então que, os poros são responsáveis por deixar que a umidade adentre no concreto, assim como os cloretos, influenciando na velocidade do seu transporte no interior do concreto. Ainda, para Cascudo (1997) outro fator do aumento da velocidade de íons cloreto no concreto é o aumento do gradiente térmico. Segundo ele, um aumento em 10°C na temperatura, pode acelerar em duas vezes a velocidade das reações.

Figueiredo e Meira (2011) sugerem um ajuste ao modelo feito por Tuutti (1982), introduzindo uma fase intermediária entre a fase de iniciação e de propagação, chamada de fase de despassivação, apresentada na Figura 4. Esta nova fase que os autores propõem ocorre a partir do momento em que o aço é despassivado, quando ocorrem reações eletroquímicas na superfície do aço, demandando certo tempo para iniciar de fato o processo de corrosão.

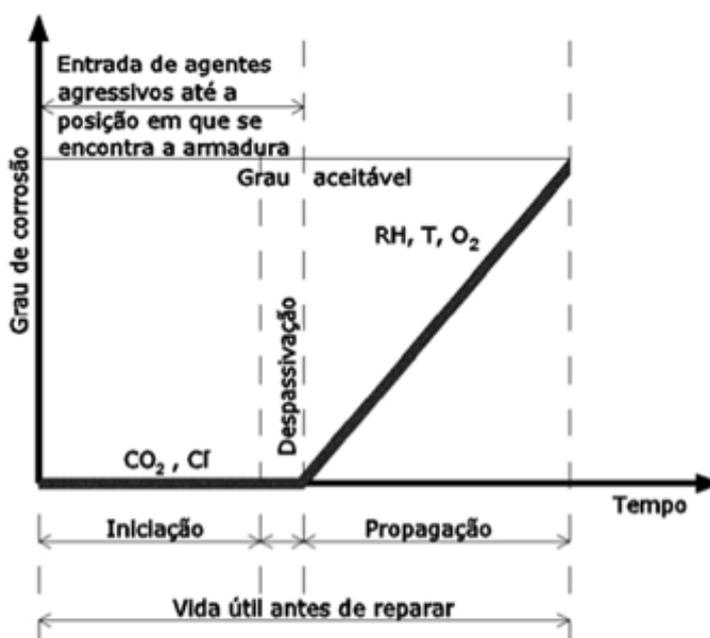


Figura 4 – Modelo de corrosão das armaduras de Tuutti (1982), adaptado por Figueiredo e Meira (2011).

Fonte: Figueiredo e Meira (2011).

O enfoque no presente trabalho é a fase de iniciação, ou seja, até que ponto o uso de ARC e CCA influenciam o concreto frente à penetração de íons cloretos antes de ocorrer a despassivação do aço.

2.2.1 Presença de íons cloreto no concreto

Os cloretos podem ser encontrados no concreto de três formas, como pode ser visualizado na Figura 5: cloretos livres (na forma de íons na água dos poros), cloretos combinados (quimicamente com as fases alumino-férricas, formando cloro-aluminatos), ou

fisicamente adsorvidos nas paredes dos poros (através do C-S-H) (TUUTI, 1982; ANDRADE, 1992; FIGUEIREDO, HELENE e ANDRADE, 1993).

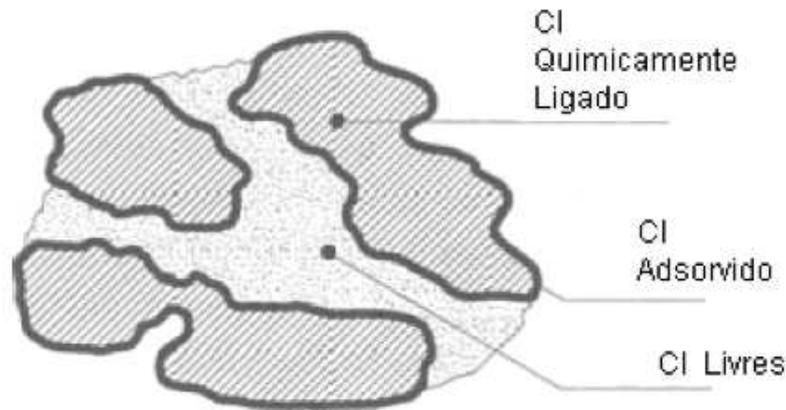


Figura 5 – Formas como os cloretos podem ser encontrados no concreto.

Fonte: Cascudo (1997).

De acordo com Cascudo (1997) existem quatro maneiras dos agentes serem transportados pra dentro do concreto: através de mecanismos de absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica, como pode ser observada na Figura 6.

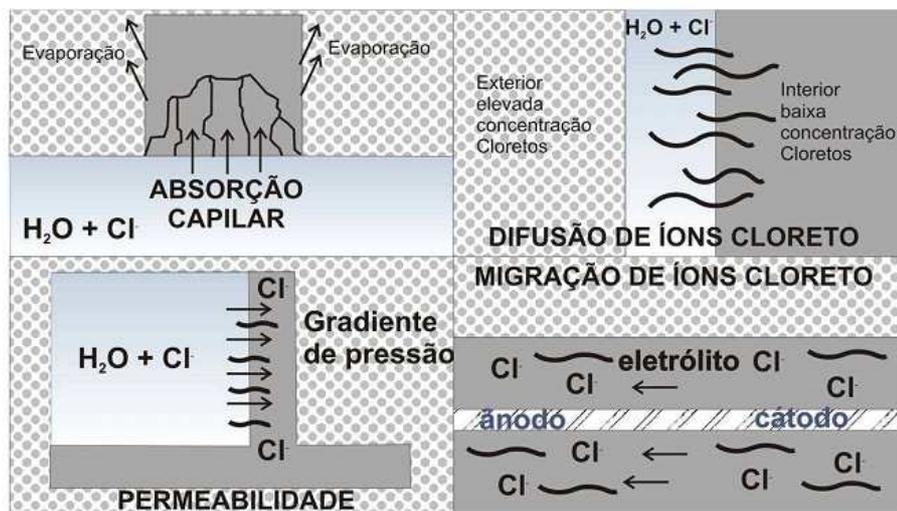


Figura 6 – Formas de penetração dos íons cloreto no concreto.

Fonte: Helene (1993).

Os mecanismos são conceituados por Helene (1993):

- Absorção ou sucção capilar - a água contendo os íons cloreto penetra no concreto através dos poros em função das forças capilares, principalmente em ciclos de umedecimento e secagem;

- Difusão de íons - a difusão iônica acontece no interior do concreto devido à diferença de concentração, tanto no meio externo e o interior do concreto, quanto dentro do próprio concreto.
- Permeabilidade - movimentação de um fluido submetido à ação de um gradiente de pressão, dependendo do diâmetro e da intercomunicação dos poros.
- Migração de íons - como os cloretos possuem cargas negativas, quando ocorre uma ação de campos elétricos há a migração iônica; ou seja, quando existir a presença de cargas elétricas (outros íons) na solução dos poros (eletrólito) ou pela atuação de campos elétricos externos, haverá um aumento da velocidade de transporte de íons.

Se o concreto for denso e não tiver fissuras, o elemento que irá influenciar a sua penetração será a difusão; e se ele for de uma qualidade inferior, poroso ou com fissuras, a forma que será predominante será a absorção. No entanto, deve-se salientar que estas condições também serão influenciadas pela forma de contato da solução que contém íons cloreto com o concreto e da condição de saturação do mesmo.

Os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto, segundo Figueiredo, Andrade e Helene (1993), de fontes distintas, tais como:

- Emprego de aceleradores de pega que contém CaCl_2 (cloreto de cálcio);
- Contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados);
- Contaminação através da névoa salina, comumente chamada de maresia;
- Contato direto com a água do mar, como no caso de estruturas marinhas; e
- Através de determinados processos industriais.

Lindvall (2007), afirma que existem algumas outras condições que também devem ser levadas em consideração para se conseguir um processo contínuo de corrosão, como por exemplo, a quantidade suficiente de oxigênio para permitir a oxidação. Ele ainda alega que é difícil de comparar a penetração de cloretos medidos em diferentes concretos e locais, uma vez que o ingresso dos íons cloreto será influenciado por uma interação das propriedades do concreto com as condições de exposição.

2.2.2 Teor crítico de íons cloreto no concreto

Ann e Song (2007) avaliaram o teor limite de íons cloreto no concreto, os fatores que influenciam e os métodos para aumentar o teor limite. Como resultados, descobriram que o teor limite de íons cloreto depende de como ele é expresso, como a razão molar de $Cl^-:OH^-$, cloretos livres ou cloretos totais.

Os teores limites de cloretos expresso como cloreto livre ou de $Cl^-:OH^-$, utilizados em muitos estudos apresentou grande variação; além de ter a desvantagem de ter pouca precisão e repetitividade. A representação mais amplamente utilizada para determinar o teor crítico de cloretos é o teor de cloretos totais em relação à massa de cimento, uma vez que leva em conta o efeito da inibição do cimento e da natureza agressiva do concreto.

Existem algumas normas, tanto no Brasil, como no exterior, que estabelecem um valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto em relação à massa de cimento, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto.

Norma	Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) no concreto % sobre a massa de cimento
ACI 318 - 05 – Concreto protendido	0,06
ACI 318 – 05 – Concreto reforçado que em serviço estará exposto aos cloretos	0,15
ACI 318 – 05 – Concreto reforçado que em serviço estará seco ou protegido contra a umidade	1,00
ACI 318 – 05- Outras construções de concreto reforçado	0,30
NP EN 206-1: 2007 - Concreto simples	0,10
NP EN 206-1: 2007 - Concreto com armadura de aço ou outros metais	0,20 – 0,40
NP EN 206-1: 2007 - Concreto com aço de pré-esforço	0,10 – 0,20
BS 8110-1: 1985	0,40
ABNT NRB 12655:2006 - Concreto protendido	0,05
ABNT NRB 12655:2006 - Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
ABNT NRB 12655:2006 - Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protendido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
ABNT NRB 12655:2006 - Outros tipos de construção com concreto armado	0,30

Os limites de cloretos mencionados na Tabela 1 estão a favor da segurança, de maneira que, atendidos os valores apresentados, não ocorra a corrosão induzida por cloretos.

Apesar de existirem normas específicas para o teor máximo de íons cloretos no concreto, em diferentes países, ainda não se chegou a um consenso sobre o teor de cloretos que pode provocar a despassivação da armadura, iniciando o processo corrosivo; isso porque são muitos fatores que influenciam os fenômenos de transporte e absorção de cloretos no concreto.

Meira et al. (2010), ao estudarem diversas regiões, confirmaram em seu estudo que o ambiente em que o concreto está inserido, conforme as regiões estudadas, diminuíram a vida útil entre 30% e 60%, observando a mudança de deposição de cloreto de 120 mg/m² dia para 500 mg/m² dia, mostrando que a deposição de cloreto desempenha um papel importante como indicador de vida útil para estruturas de concretos em ambientes com atmosfera marinha.

Conforme este estudo pode-se considerar que a distância das estruturas de concreto armado em relação ao mar, sugere diferentes níveis de agressividade de íons cloreto; ou seja, o teor crítico de íons cloreto no concreto, deve levar em consideração a zona em que o concreto está inserido.

2.2.3 Fatores que influenciam a penetração de íons cloreto

Existem diversos fatores que podem influenciar o concreto quanto à resistência à penetração de cloretos, a movimentação no interior do concreto e a capacidade de combinação de cloretos. Os principais fatores são: relação a/agl, temperatura, cobrimento da armadura, composição e tipo do cimento, entre outros.

Page, Short e Tarras (1981) colocam que há uma forte influência da composição do cimento utilizado, bem como das condições de cura estabelecidas, no coeficiente de difusão de íons cloreto. O estudo de Pereira (2001) avaliou a influência do tipo de cimento, da relação a/agl, da temperatura e do tipo de cura nos coeficientes de difusão de cloretos em concretos. Os resultados obtidos pelo autor demonstram que quanto menor a relação a/agl, menores os valores obtidos do coeficiente de difusão. Em relação à temperatura, o coeficiente de difusão aumenta com a diminuição da temperatura de cura dos concretos. O cimento CP-IV obteve coeficientes de difusão de cloretos inferiores se comparados com o CP-II-F.

Figueiredo, Helene e Andrade (1993), relatam que a quantidade de C₃A do cimento determina a capacidade de combinação com íons cloreto. Os cimentos com uma quantidade baixa de aluminato tricálcico têm pouca capacidade de imobilizar os íons cloreto, através da formação de um sal complexo insolúvel, o cloro-aluminato de cálcio hidratado,

conhecido como *Sal de Friedel*, reduzindo assim a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros de concreto. O *Sal de Friedel* também pode ser formado a partir da desestabilização dos compostos hidratados que contenham aluminatos, como, por exemplo, etringita (BIRNIN-YAURIA e GLASSER, 1998).

Segundo Talero (2012), quase todas as adições pozolânicas podem induzir a formação rápida de *Sal de Friedel*, dependendo da quantidade de alumina reativa que a pozolana contém. O *Sal de Friedel* combinado com a pozolona tem uma taxa de formação bem mais elevada se comparada com a formação do composto desenvolvido pelo C₃A. Por esses motivos os cristais gerados têm formas hexagonais menores e são menos perfeitos do que o *Sal de Friedel* formado pelo processo lento da combinação com C₃A. Na Figura 7 encontra-se a micrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV), ampliado 5000x, indicando a formação do *Sal de Friedel* durante o processo lento (a), e o processo rápido (b), com adição de pozolana.

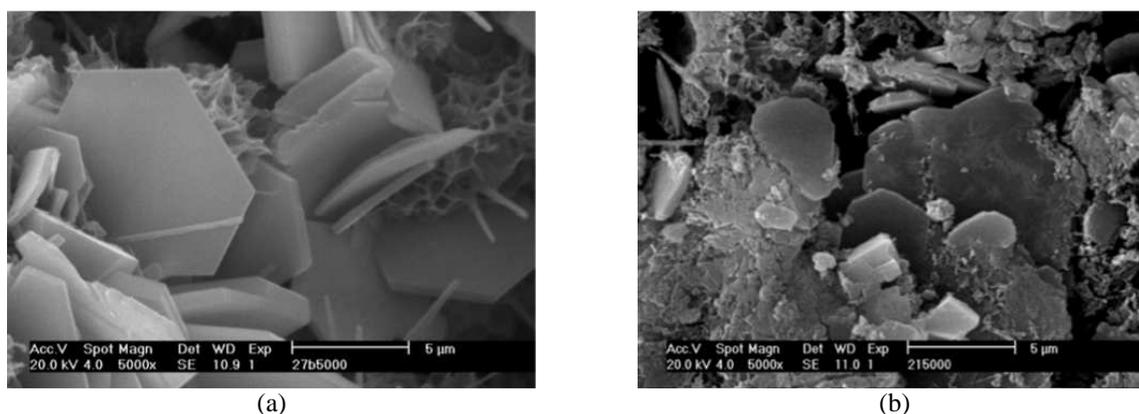


Figura 7 – Imagens MEV, ampliado 5000x, do *Sal de Friedel*. (a) Formação lenta do *Sal de Friedel* a partir do C₃A. (b) Formação rápida do *Sal de Friedel* a partir da pozolana.

Fonte: Talero (2012).

A pesquisa realizada por Lindvall (2007) demonstra que as diferentes condições de exposição influenciam diretamente na durabilidade do concreto, determinada em função da penetração de íons cloreto, assim como a temperatura. O mesmo autor afirma que a durabilidade é influenciada principalmente por fatores como a qualidade dos materiais selecionados, a mão de obra que executa, e as condições de exposição que estes materiais serão submetidos.

Andrade (2001) constatou que a vida útil de projeto de estruturas é maximizada com o aumento da temperatura de cura do concreto (14 dias em ambientes de exposição de 5 ± 2 até $40 \pm 2^\circ\text{C}$) e minimizada com o aumento da relação a/agl. Além disso, ao estudar a vida

útil das estruturas de concreto frente à penetração de íons cloreto, confirmou que a adição de sílica ativa ao cimento CP-V-ARI em teores de 10% de adição aumentou em 40% a vida útil do projeto de estrutura; quando se adiciona 20% a vida útil aumenta para 60%.

O objetivo do trabalho de Hoffmann (2001) foi avaliar o comportamento do coeficiente de difusão de cloretos com a variação da relação água/aglomerante (0,28 a 0,75), do teor de adição de sílica ativa de 0 a 20%, da temperatura de cura de 5 a 40° C e do tempo de cura de 7 a 91 dias. Os resultados apresentaram uma maior penetração e difusão de cloretos com uma relação água/aglomerante maior e uma menor resistência à compressão. A utilização de sílica ativa trouxe benefícios ao concreto em relação à durabilidade, pois diminui o coeficiente de difusão de íons cloreto dos concretos, assim como a evolução da idade para todas as relações água/aglomerante. Em relação à temperatura de cura, o seu aumento diminui a penetração e a difusão de cloretos no concreto de forma equivalente e aumenta a resistência à compressão dos concretos nas primeiras idades.

Cascudo (1997) relata que concretos com adições de materiais pozzolânicos tais como a cinza volante ou sílica ativa, apresentam estruturas de pasta mais compactas, conseqüentemente, o desempenho desses concretos em relação à penetração de líquidos, gases e íons é consideravelmente melhor se comparado aos concretos de cimento Portland comum, significando benefícios quanto à ação danosa dos cloretos.

Para auxiliar na melhoria de algumas propriedades e do concreto e de argamassas, a CCA é utilizada como material pozzolânico, e tem demonstrado uma influência significativa na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade. Além disso, a cinza de casca de arroz misturada com o concreto pode diminuir a porosidade total do concreto e modificar a estrutura dos poros do cimento e reduzir significativamente a porosidade que influencia na penetração dos agentes agressivos e que levam à deterioração da matriz do concreto (GIVI et al., 2010).

Saraswathy e Song (2007) concluíram em seu estudo que a incorporação de CCA até o nível de substituição de 30% reduz a penetração de cloreto, diminui a permeabilidade, melhora as propriedades de resistência à corrosão; sendo que os autores recomendam uma substituição em até 25% de CCA.

Quando se incorpora agregado reciclado de concreto em concretos, um fator muito importante é a fração de argamassa presente nesse agregado, ocasionando maior porosidade e, conseqüentemente, possibilitando a maior penetração de íons cloreto. A

influência do ARC e do CCA na penetração de íons cloreto em concreto é abordada com maiores detalhes nos itens 2.4, 2.5 e 2.6.

2.3 MÉTODOS ACELERADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

O coeficiente de difusão de cloretos no concreto é um dos parâmetros que caracteriza a resistência do concreto frente à penetração de cloretos. Vai depender da concentração de cloretos na superfície do concreto. No entanto, a comparação de coeficiente de difusão só pode ser realizada se a concentração de cloretos na superfície do concreto for mantida constante.

O melhor método para encontrar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto se baseia na determinação do perfil de penetração dos cloretos, quando o concreto é exposto em ambiente natural. Porém, este método é pouco prático, visto que é um método excessivamente lento para ser aplicado em estudos científicos que exigem respostas mais rápidas. Devido à necessidade do acompanhamento de concretos em obras no que diz respeito à caracterização da sua resistência à penetração de cloretos, têm sido desenvolvidos diferentes métodos acelerados. Como ainda não existe um método de referência, são possíveis que diferentes autores apresentem, para uma mesma mistura de concreto, valores distintos de coeficiente de difusão; por esse motivo, os valores devem ser sempre reportados ao método de ensaio (SALTA, 1996).

Os métodos mais utilizados para ensaios de penetração de íons cloreto, segundo Salta e Gonçalves (1997), são:

- Métodos de difusão: que se baseiam na difusão pura dos cloretos no concreto, com ou sem aceleração da velocidade de difusão, aumentando a concentração em cloretos da solução de exposição.

- Métodos de migração: onde a velocidade de penetração de cloretos no concreto é acelerada por imposição de uma corrente elétrica.

Nos métodos de difusão apenas se procura aumentar a velocidade de difusão, mas o mecanismo físico de transporte é o mesmo de quando ocorre em condições naturais. Nos métodos de migração o mecanismo de transporte deixa de ser a difusão e passa a ser resultante da condução induzida pelo campo elétrico (SALTA e GONÇALVES, 1997).

No Brasil ainda não existe uma norma que padronize métodos acelerados de penetração de íons cloreto, por isso tem-se adotado métodos prescritos em normas internacionais e descritos em diversas bibliografias. A escolha dos métodos utilizados para esta pesquisa foi realizada com base em trabalhos que utilizam métodos acelerados (Tabela 2).

Tabela 2– Relação de pesquisas realizadas com os métodos de ensaios mais utilizados para avaliar a penetração de íons cloreto.

Título da pesquisa	Classificação	Autor (s)	Ano	Norma utilizada
Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno ativada quimicamente	Dissertação Mestrado	SIQUEIRA	2008	ASTM C1202
Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto	Dissertação Mestrado	TROIAN	2010	ASTM C1202
Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates	Artigo	EVANGELISTA e BRITO	2010	NT Build 492
The Effect of Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient on the Chloride Ingress in Concrete	Conferência	CHENG, KARMIADJU e HUANG	2011	AASHTO T259
Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete	Artigo	LIU, CHIA e ZHANG	2011	AASHTO T259 ASTM C1202, NT Build 492
Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage	Artigo	HORSAKULTHAI, PHIUVANNA e KAENBUD	2011	AASHTO T259
Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate	Artigo	SIM e PARK	2011	ASTM C1202
Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test	Artigo	SPIESZ e BROUWERS	2012	NT Build 492
RCM: A new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free- and bound-chloride concentrations	Artigo	SPIESZ, BALLARI e BROUWERS	2012	NT Build 492
Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash	Artigo	KOU e POON	2013	ASTM C1202
Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultrafine Ground Granulated Blast-furnace Slag.	Artigo	TENG, LIM e DIVSHOLI	2013	NT Build 492

A seguir são apresentados os métodos, AASHTO T259, AASHTO T277, ASTM C1202 e NT Build 492. É importante ressaltar que a norma ASTM C1202 foi baseada na norma da AASHTO T277, portanto, elas descrevem o mesmo método.

2.3.1 Método AASHTO T259

Standard Method of Test for Resistance of Concrete Chloride Ion Penetration – Salt Ponding Test. É um teste de difusão a longo prazo para medir a penetração de cloretos no concreto (STANISH, HOOTON e THOMAS, 1997).

Este teste tem sido tradicionalmente o método mais largamente utilizado para a determinação da resistência à penetração de íons cloretos (VIVAS, BOYD e HAMILTON, 2007). Porém, esse teste tem inúmeras limitações, que serão expressas no item 2.3.5.

O teste requer três amostras de pelo menos 75 mm de espessura e com uma superfície de 300 mm. Após cura úmida por 14 dias (ou conforme programa experimental), os corpos de prova são condicionados em uma sala com 50% de umidade relativa e 23°C durante 28 dias. As faces laterais são seladas, deixando livres as faces superior e inferior. Após o período de condicionamento a face superior é exposta à uma lâmina de 13 mm de solução de 3% de NaCl por 90 dias, enquanto a face inferior é deixada exposta ao ambiente de secagem. No final do tempo, se mede a concentração de cloretos em cada fatia de 0,5 polegadas (1,27 cm), conforme se verifica na Figura 8.

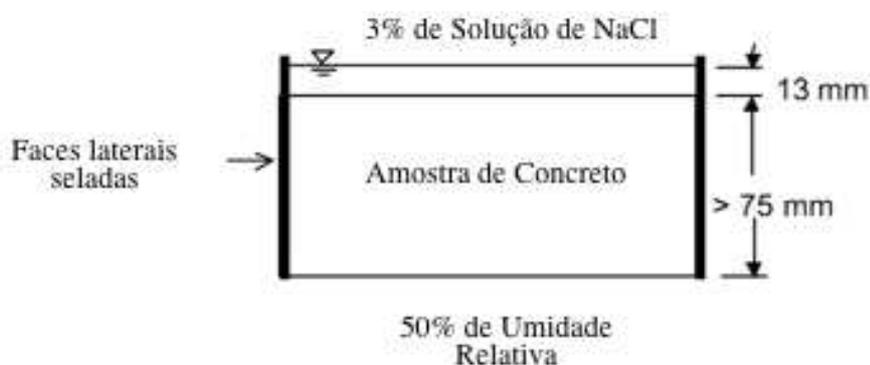


Figura 8 – Esquema do teste AASHTO 7259.

Fonte: Adaptado de Stanish, Hooton e Thomas (1997).

A medida da concentração de íons cloreto em cada fatia de cada corpo de prova testado requer a cominuição da mesma e um processo de digestão para extrair os íons, a fim de medir a sua concentração, o que requer um tempo razoável e um investimento financeiro quase sempre oneroso. Também é possível fazer esta análise por espectrômetro, mas, de qualquer forma, é preciso uma preparação da amostra que também demanda tempo e recursos financeiros.

2.3.2 Método AASHTO T277

A penetração de cloretos através do concreto, mesmo em um concreto com uma elevada relação água/aglomerante, é um processo muito lento. Sendo assim, para se realizar ensaios laboratoriais, é comum usar ensaios acelerados, onde esta aceleração é feita através da aplicação de uma corrente elétrica na amostra de concreto, pois o campo elétrico gerado aumenta a velocidade de transporte dos íons cloreto na massa de concreto.

O Método AASHTO T277 foi originalmente desenvolvido na década de 70 pela *Portland Cement Association*, através de um programa de pesquisa financiada pela *Federal Highway Administration (FHWA)*. O teste original pode ser encontrado em FHWA/RD-81/119, “*Rapid Determination of Chloride Permeability of Concrete*”. Desde que o método foi desenvolvido ele foi modificado e adaptado por agências e organizações de normas técnicas. A *American Association of State Highway and Transportation Officials* especifica o método na AASHTO T277 e a *American Society for Testing and Materials* na ASTM C1202. A indústria da construção aceita esse procedimento de teste como uma medida para determinar a maior ou menor resistência de penetração de íons cloreto no concreto (ANDRADE e WHITING, 1996).

2.3.3 Método ASTM C1202

A norma ASTM C1202 – *Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete`s Ability to Resist Chloride Ion Penetration* foi uma adaptação da AASHTOO T277 e ainda é muito utilizada em pesquisas científicas (ver Tabela 2). Segundo Stanish, Hooton e Thomas (1997) o nome não é correto, pois o teste não mede a penetrabilidade de íons cloreto, mas sim o movimento iônico. Sendo assim, o que se mede é o movimento de todos os íons e não somente os íons cloreto, afetando o resultado do teste. Essa é uma das críticas feitas ao método, às demais serão abordadas no item 2.3.5.

De acordo com a norma, o condicionamento da amostra deve ser feito da seguinte forma:

- Ferver um litro de água da torneira em um recipiente grande que possa ser fechado. Após fervura, remover a tampa para que a água esfrie até alcançar a temperatura ambiente;
- Deixar a amostra (já cortada) seca durante pelo menos uma hora;
- Selar a lateral do corpo de prova;

- Com as duas faces da amostra expostas (superior e inferior), colocar o corpo de prova em um dessecador com bomba á vácuo. Manter o vácuo durante 3 horas com uma pressão de 50 mm Hg (6650 Pa).
- Com o vácuo ainda ligado, abrir a torneira e drenar a água (fervida e resfriada) até que esta cubra as amostras;
- Após a submersão das amostras, fechar a torneira e ligar a bomba de vácuo por mais uma hora.
- Desligar a bomba e deixar o espécime submerso na água por 18 ± 2 horas.

Após o condicionamento, a amostra deve ser removida da água, retirando seu excesso de água. Manter o espécime com uma umidade relativa de 95% e iniciar o procedimento de ensaio.

O teste consiste na colocação das amostras de 100 mm de diâmetro x 51 mm de espessura entre as meia-células, onde elas ficam com a face superior em contato com a solução de NaCl (3%) e a outra face em solução de NaOH (0,3N). O corpo de prova é submetido a uma diferença de potencial de 60V ($\pm 1V$) durante um período de 6 horas (Figura 9). Durante este tempo é feito um monitoramento de corrente passante a cada 30 minutos.

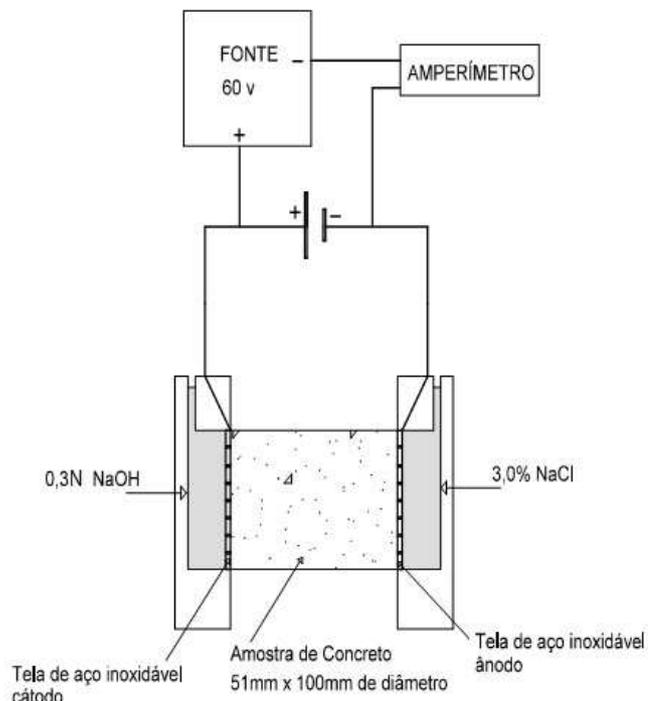


Figura 9 – Esquema de teste ASTM C1202.

Fonte: Troian (2010).

Após as 6 horas de teste, calcula-se a carga total passante nas amostras pela Equação 1, em Coulombs (Q). O resultado permite classificar a resistência à penetração de íons cloreto do concreto conforme a Tabela 3.

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

Equação 1

Onde:

Q = carga total passante;

I_0 = corrente medida imediatamente após a tensão aplicada (em Ampères);

I_t = corrente medida nos tempos t (t em minutos, Ampères).

Tabela 3 – Penetração dos íons cloreto baseado na carga passante.

Carga Total Passante (Coulombs)	Penetrabilidade dos íons cloreto
>4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito Baixa
<100	Desprezível

Fonte: ASTM C1202 (2007).

2.3.4 Método NT Build 492

O *Nordtest Method – Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments* – NT Build 492 tem como objetivo determinar o coeficiente de migração de cloretos em materiais a base de cimento, argamassas e concretos, a partir de experimento no estado de migração não-estacionário. O coeficiente de migração de cloreto determinado pelo método é uma medida da resistência do material testado em relação à penetração de cloretos (NT Build 492 - NORDTEST METHOD, 1999).

O princípio do método é a aplicação de um potencial elétrico externo, axialmente, através da amostra, que força os íons cloreto a migrarem de fora para dentro do espécime. Depois de certo período de ensaio, a amostra é dividida axialmente e uma solução de nitrato de prata é pulverizada sobre uma das divisões. A profundidade de penetração de cloreto pode ser medida a partir da precipitação de AgCl – cloreto de prata, que forma uma região incolor em contraponto a uma região marrom decorrente da ausência de íons cloreto. Na Figura 10 a região incolor é representada pela porção clara da amostra. A partir da informação dessa

profundidade de penetração e de outras informações obtidas no ensaio, é possível calcular o coeficiente de migração de cloretos.

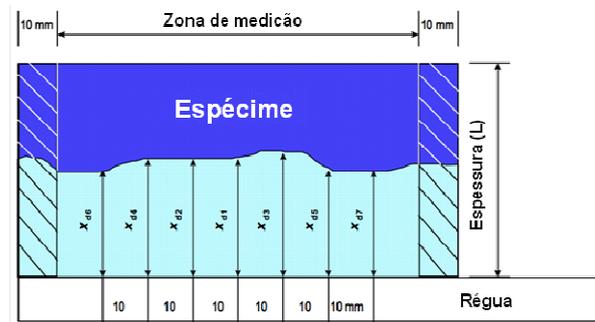


Figura 10 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos.

Fonte: Adaptado de NT Build 492 - NORDTEST METHOD (1999).

O condicionamento das amostras é similar ao método da ASTM C1202, a única diferença é que, ao invés de utilizar água fervida para submergir as amostras, a NT Build 492 especifica o uso de água destilada (ou deionizada) saturada em cal – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O restante do procedimento é igual ao método da ASTM C1202.

As soluções utilizadas no cátodo e no ânodo são 10% em massa de NaCl em água potável e 0,3N de NaOH, em água destilada ou deionizada; respectivamente.

O teste consiste na separação de três amostras de 100 mm de diâmetro e uma espessura de 50 ± 2 mm, cortados a partir da parte central do corpo de prova. Para a instalação do procedimento é necessário a aquisição de alguns itens que podem ser visualizados na Figura 11. Conforme a norma, o ânodo utilizado é uma chapa de aço inoxidável de aproximadamente 0,5 mm de espessura e furos na extremidade. O cátodo, é uma chapa aço inoxidável, sem furos e com espessura de aproximadamente 0,5 mm.

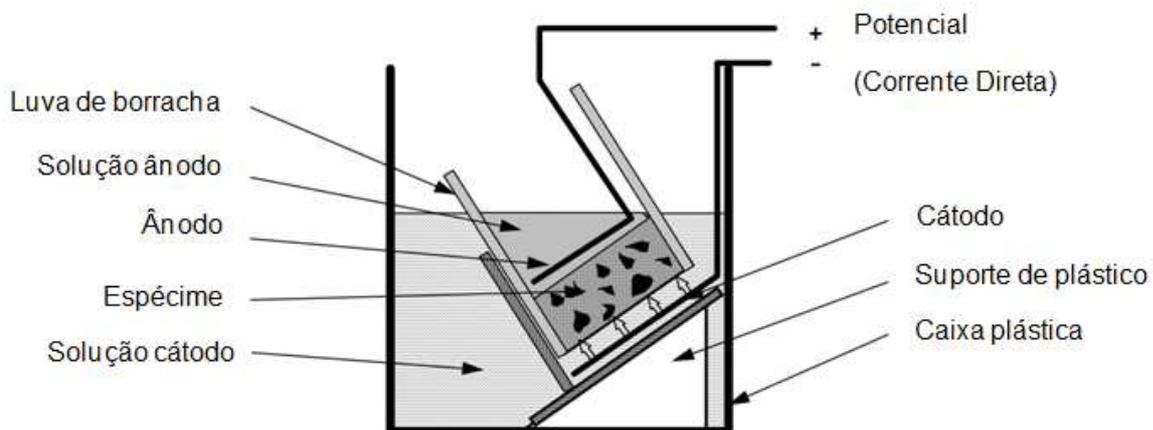


Figura 11 – Disposição da instalação de migração.

Fonte: Adaptado de NT Build 492 - NORDTEST METHOD (1999).

A caixa plástica deve ter as seguintes dimensões: 370 x 270 x 280 mm (comprimento x largura x altura). A norma ressalta que outros desenhos podem ser aceitos, desde que as temperaturas dos espécimes e soluções durante o ensaio seja mantida na gama de 20 a 25°C.

O teste inicia com a aplicação de uma pré-tensão de 30V, sendo registrada a corrente inicial de cada espécime. Após este registro, deve-se então, ajustar a corrente, se necessário, conforme a Tabela 4. Depois deste ajuste, deve-se observar o valor da nova corrente inicial. O período de teste será definido a partir do valor desta nova corrente, conforme pode ser visualizado na Tabela 4. Após a definição da duração do teste, é feito o registro da temperatura inicial em cada solução do ânodo; este pode ser feito com um termômetro ou termopar. Por fim, deve-se registrar a corrente final e a temperatura final, antes de finalizar o teste. Mais detalhes do procedimento pode ser visualidade no item 3.6 do programa experimental.

Tabela 4 – Voltagem e duração do teste dos espécimes de concreto.

Corrente inicial I_{30v} Com 30V (mA)	Voltagem aplicada U (após ajuste) (V)	Nova corrente inicial Possível I_o (mA)	Duração do teste t (horas)
$lo < 5$	60	$lo < 10$	96
$5 \leq lo < 10$	60	$10 \leq lo < 20$	48
$10 \leq lo < 15$	60	$20 \leq lo < 30$	24
$15 \leq lo < 20$	50	$25 \leq lo < 35$	24
$20 \leq lo < 30$	40	$25 \leq lo < 40$	24
$30 \leq lo < 40$	35	$35 \leq lo < 50$	24
$40 \leq lo < 60$	30	$40 \leq lo < 60$	24
$60 \leq lo < 90$	25	$50 \leq lo < 75$	24
$90 \leq lo < 120$	20	$60 \leq lo < 80$	24
$120 \leq lo < 180$	15	$60 \leq lo < 90$	24
$180 \leq lo < 360$	10	$60 \leq lo < 120$	24
$lo \geq 360$	10	$lo \geq 120$	6

Fonte: Adaptado de NT Build 492 - NORDTEST METHOD (1999).

A expressão dos resultados é calculada através de um coeficiente de migração ($D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) no estado não estacionário, a partir da Equação 2.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

D_{nssm} = coeficiente de migração no estado não estacionário x $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U = valor absoluto da voltagem aplicada, V;

T = valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

L = espessura da amostra, mm;

x_d = valor médio das profundidades de penetração, mm;

t = duração do teste, horas.

A norma da NT Build 492 não especifica nenhuma classificação quanto à maior ou menor resistência à penetração de íons cloretos, porém encontrou-se na literatura valores de referência para os coeficientes de migração de cloretos para concretos com diversos tipos de cimentos com idade de 28 dias. A classificação proposta é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Resistência à penetração dos íons cloreto para vários tipos de cimentos.

Difusão de cloretos ($D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Penetrabilidade dos íons cloreto
>15	Alta
10-15	Moderada
5-10	Baixa
2,5-5	Muito Baixa
<2,5	Desprezível

Fonte: Nilsson, Ngo e Gjrv (1998).

2.3.5 Discussão dos métodos apresentados

Especificamente sobre o teste AASHTO T259, a crítica maior se refere ao tempo muito longo de teste, 118 dias (secos por 28 dias e expostos  solução de cloreto de sódio por 90 dias) após período de cura, significando pelo menos quatro meses de estudos. Entretanto, 90 dias de ensaio é muito pouco tempo para permitir a penetração de cloretos em concretos de alta resistência. Esse teste pode retornar dados distorcidos quando se utiliza amostras contendo pozolanas ou inibidores de corrosão, em função da menor duração do ensaio. Para esses concretos são mais recomendados os testes acelerados de migração de cloretos, sendo os resultados obtidos iguais ou melhores se comparados ao outro método (VIVAS, BOYD e HAMILTON, 2007).

Além disso, esse tipo de teste força a intrusão de cloretos através de uma absorção imediata. Durante o processo, uma das faces  submergida na solução e a outra é exposta ao ar com uma umidade relativa de 50%, isso cria uma condição de vapor, através da parte úmida da face em relação à face seca, aumentando o transporte dos íons cloreto.

A taxa de penetração de íons cloreto não é facilmente quantificada, pois depende de muitos fatores como, geometria dos poros, reações químicas, condições ambientais como temperatura e umidade, além das imperfeições e fissurações. Sendo assim,  improvável que

este teste com 90 dias poderia quantificar e simular a penetração de íons cloretos e a corrosão da armadura na natureza por um período longo de tempo (McGRATH e HOOTON, 1999). Segundo os mesmos autores, a relação entre condutividade iônica e difusão aparente seria linear se várias condições fossem verdadeiras:

- O efeito da concentração de solução nos poros deve ser mínimo, ou seja, a solução deveria ser diluída;
- O processo de difusão só deve ocorrer sem produtos químicos, reações, mudança de concentrações na superfície;
- Independentemente do tempo na estrutura dos poros, esta não deve sofrer alterações.

Porém, nenhum desses critérios pode ser atendido, sendo uma relação linear, na melhor das hipóteses, uma aproximação de um resultado.

Catellote et al. (2001) verificaram que quando os íons cloreto se difundem no concreto, eles interagem com a carga da superfície desenvolvida na interface da matriz com os poros. Como consequência dessa interação, a difusão de íons cloreto é retardada em comparação com as moléculas de oxigênio dissolvidas. Entende-se assim que esses fatores limitam a capacidade dos íons cloreto se difundirem através dos poros. Os mesmos autores concordam que em aplicações com altas tensões as interações eletrostáticas que influenciam a difusão iônica são anuladas para que os íons cloreto possam atravessar os poros de tamanho semelhante aos que são acessíveis ao oxigênio dissolvido; aumentando o coeficiente de difusão de cloretos.

Sendo assim, o resultado do estudo de Catellote et al. (2001) propõe uma diferença de potencial de 12V para determinar coeficientes de difusão efetiva, ou seja, aqueles semelhantes às condições naturais de difusão.

Mesmo que o método da ASTM C1202 seja muito difundido, a principal crítica deste tipo de metodologia é em relação à diferença de potencial ser muito grande (60V). Castellote, Andrade e Alonso (2004) sugerem uma ação de campo elétrico de até 10.5V, sem ser capaz de vencer as interações eletrostáticas dos mesmos com as paredes dos poros.

Andrade (1993) critica o método da ASTM C1202 sob os seguintes aspectos:

- Este método de ensaio não reproduz as condições reais que o concreto teria em experiências em campo;

- Não há nenhuma condição onde o concreto é exposto a um potencial de 60 Volts;
- Este método de ensaio não mede a maior ou menor resistência do concreto à penetração de íons cloreto, mas sim sua resistividade elétrica.

Portanto, conforme Andrade (1993), a norma não pode dizer informações concretas sobre a permeabilidade de cloretos em concretos. O registro da passagem de corrente total em uma célula é em função da quantidade e tipo de íons, não do fluxo ou mobilidade de cloretos.

Para Feldman et al. (1994), a principal crítica é a severidade da medição do ensaio (60V), podendo causar tanto danos físicos, como danos químicos na amostra, resultando em resultados irreais.

Díaz, Nóvoa e Pérez (2006) relatam que apesar dos testes da ASTM 1202 e AASHTO T277 serem ainda muito utilizados são altamente criticados porque: a carga medida corresponde ao movimento de todos os íons presente na solução dos poros, não apenas os íons cloreto; a alta tensão provoca um aumento de temperatura e os resultados dão somente a informação qualitativa, não valores dos coeficientes de difusão obtidos.

Apesar de todas as críticas sobre a ASTM C1202, no momento, este método de teste é amplamente aceito pela indústria do concreto, porém novos procedimentos podem ser desenvolvidos para que a medida de penetrabilidade de íons cloreto no concreto seja mais precisa.

Tendo em vista todas as críticas explanadas neste item, é necessário que se tenha outra opção de método, amplamente utilizado pela literatura, porém com um sistema mais condizente com a realidade, sendo menos agressivo e obtendo resultados ponderados. Para isso foi eleito o método nórdico – NT Build 492, que já foi previamente explicado e será enfocado no programa experimental.

Marriaga, Gonzalez e Claisse (2012) afirmam que o método NT Build 492 é amplamente utilizado no mundo todo para determinar o coeficiente de migração de cloretos. As vantagens mais importantes dos testes acelerados de migração de cloretos, como a NT Build 492, são a simplicidade do seu procedimento, a curta duração do teste, além de uma boa repetitividade dos resultados (SPIESZ, BALLARI e BROUWERS, 2012; SPIESZ e BROUWERS, 2012).

Teng, Lim e Divsholi (2013) afirmam que utilizando o coeficiente de migração de cloretos este pode ser classificado de acordo com a sua resistência à penetração de cloretos.

É importante estudar os métodos de ensaios acelerados de penetração de íons cloreto que possam avaliar adequadamente a durabilidade de materiais inovadores, como por exemplo, concretos que incorporem resíduos, tais como ARC e CCA.

2.4 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Os resíduos de concretos podem ser originados de concreteiras, podem ser provenientes de empresas de pré-fabricados e pré-moldados ou ser encontrados na construção e demolição de edificações. Qualquer que seja sua proveniência, é necessário um conhecimento maior sobre as características desses resíduos de concreto para uma futura aplicação na construção civil.

De acordo com Buttler e Corrêa (2006), os resíduos de concreto gerados em fábricas de pré-moldados apresentam um excelente potencial para serem reciclados, pois há uma homogeneidade e uma presença insignificante de contaminantes se comparados aos demais resíduos da construção e demolição.

A ABNT NBR 15116:2004 define agregado reciclado como sendo um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura. Também é definido como sendo obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, sendo composto na sua fração gráuda por no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. A norma ainda restringe a utilização de agregados reciclados às obras de pavimentação viária, em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas e do preparo de concreto sem função estrutural.

Em contrapartida, a ABCP (2009), afirma que os sistemas à base de cimento, após exercerem sua função dentro do seu ciclo de vida útil, podem ser reciclados, transformando-se em agregados para novas aplicações, como para a produção de argamassas, concretos ou novos artefatos e produtos pré-moldados.

Um enfoque vem sendo dado para os resíduos de concreto na produção de agregados reciclados, pois para o emprego em novos concretos este resíduo parece ser o mais adequado. Algumas pesquisas (WERLE 2010; TROIAN, 2010; BENETTI, 2012) indicam a viabilidade do emprego do ARC em teores de substituição do agregado natural de até 50%.

Soutsos et al. (2010) afirmaram que o uso de substituição de agregados de concreto para a fabricação de produtos pré-moldados em concreto pode chegar a 60% para a fração de agregado graúdo de 6 mm e 30% para a fração de agregado miúdo, 4 mm.

O objetivo do estudo de Juan e Gutiérrez (2009) foi obter relações experimentais entre o conteúdo de argamassa presente no agregado reciclado e as outras propriedades deste agregado. Os resultados mostram que as principais propriedades afetadas desfavoravelmente pelo teor de argamassa presente nos agregados são a absorção, a elasticidade, a retração, a densidade e a abrasão. Os autores confirmam que o ARC se difere do agregado natural principalmente pela quantidade de argamassa incorporada no agregado, e é isso que influencia negativamente as propriedades do concreto com ARC, diminuindo a sua durabilidade, sua resistência e as outras propriedades citadas acima.

O uso do agregado reciclado com qualidade elevada é raramente reportado em função da sua resistência à compressão ser menor e da sua variabilidade no comportamento mecânico (TAM, GAO e TAM, 2005).

Butler, West e Tighe (2011) enfocaram o uso de ARC para aplicação em concretos estruturais, pois queriam saber o efeito do ARC na ligação com o reforço de aço. Dentre os resultados obtidos destacam-se: as misturas com ARC precisaram de 3,1 e 9,4% a mais de água para conseguir chegar próximo à resistência à compressão e a trabalhabilidade necessária se comparadas com os agregados naturais. Além disso, para alcançar resistência à compressão e trabalhabilidade semelhantes, os concretos com ARC necessitaram de uma redução de 9,0 e 14,8% em teor de cimento em comparação com as misturas de concreto com agregados naturais. A tensão de aderência média não se correlacionou muito bem com a resistência à compressão, isso deve ocorrer pela influência que a carga de ruptura faz sobre o agregado graúdo no concreto.

Conforme Aragão (2007) os concretos reciclados tendem a ter valores de resistência à compressão inferiores aos dos concretos produzidos com agregados naturais, pois a ruptura se faz nos agregados. Sendo assim, o agregado reciclado utilizado na produção de novos concretos é um elemento determinante para esta propriedade.

Contradizendo este autor, Tabsh e Abdelfatah (2009), acreditam que o desempenho dos novos concretos é um aspecto positivo, pois eles estão vinculados à interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento. Segundo eles, o concreto produzido com ARC tem grande resistência entre o agregado e a pasta de cimento, devido à

angularidade do agregado graúdo e também o cimento residual que se encontra na superfície desse agregado reciclado.

Da mesma forma Medina, Frías e Rojas (2012), afirmam que a zona de transição (ZT) entre o agregado reciclado e a nova pasta é muito mais compacta e menos porosa do que a ZT da pasta com o agregado natural, fazendo com que os concretos com ARC obtenham melhorias em suas propriedades. Concordando com estes autores, Thomas et al. (2013) acrescentam que quando a pasta de cimento nova é mais compacta do que a pasta do ARC, observa-se um efeito selagem dos poros do agregado reciclado.

Thomas et al. (2013), comentam que a maioria dos resultados encontrados na literatura não são comparáveis em função da grande heterogeneidade dos agregados reciclados, da relação a/agl e do tipo de cimento utilizado. Os resultados obtidos pelos autores em sua pesquisa demonstram que, para a mesma a relação a/agl, a utilização de ARC influencia no concreto, diminuindo sua durabilidade, devido à porosidade encontrada na zona intersticial. Quanto mais baixas forem as relações a/agl, melhor será a sua durabilidade e resistência à compressão. O fator que mais influencia é a baixa porosidade obtida na pasta nova do cimento, isso porque ela é mais compacta e fechada que a pasta do agregado reciclado. Entretanto pode-se contestar os autores, pois existem exceções, uma vez que a colocação do autor só pode ser tomada como verdadeira para os casos em que se o agregado reciclado possuir resistência inferior a do novo concreto.

Em relação à absorção de água, diversos autores confirmam que quanto maior o percentual de substituição do ARC por agregado natural, maior será a absorção de água, assim como, quanto maior a relação a/agl mais alta será a absorção (SOBERÓN, 2002; WERLE 2010; TROIAN, 2010; EVANGELISTA e BRITO, 2010; KOU e POON, 2012; SOMNA, 2012; THOMAS et al, 2013).

Quanto maior o teor de argamassa no ARC, menor a densidade, maior a absorção e maior a abrasão. Os ARC também possuem um maior teor de sulfato do que as naturais, devido aos sulfatos de cimento de argamassa incorporado. Porém, a intensificação do processo de moagem pode diminuir o teor de argamassa incorporado no agregado e melhorar a qualidade do agregado (JUAN e GUTIÉRREZ, 2009). Os mesmos autores relatam que, um ARC de boa qualidade para a produção de concreto estrutural, poderia ter um conteúdo argamassa de 44%, uma massa específica superior a 2160 kg/m^3 , uma absorção de água menor do que 8%, e uma perda de abrasão com 40%.

Outras propriedades do concreto com a utilização de ARC são afetadas, como por exemplo, o aumento de água na relação a/agl ou a utilização de aditivos para que este obtenha o mesmo abatimento dos concretos convencionais, resultando em resistências menores (TABSH e ABDELFAH, 2009). O aumento na quantidade de ARC incluídos na mistura demonstra a diminuição da durabilidade de concretos, porém a qualidade aumenta conforme o avanço das idades (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002).

A penetração de íons cloretos em concretos produzidos com ARC segue a mesma linha da absorção de água, ou seja, o coeficiente de migração de cloretos aumenta com o acréscimo de substituição do agregado natural por ARC; da mesma maneira que o coeficiente de migração de cloretos diminui quando as relações a/agl são menores (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002, EVANGELISTA e BRITO, 2010; TROIAN, 2010).

Para auxiliar na melhora das propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado, é necessário adicionar ou substituir ao cimento materiais finos, ricos em sílica, como é o caso da cinza de casca de arroz. No próximo item, este coproduto, ou subproduto, como é conhecido atualmente, será mais aprofundado para que se compreendam como suas propriedades podem ajudar na confecção de novos concretos.

2.5 CINZA DE CASCA DE ARROZ

O Brasil é o nono produtor mundial de arroz, colhendo 11,26 milhões de toneladas na safra de 2009/2010, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor brasileiro. As projeções demonstram que o Brasil vai colher 14,12 milhões de toneladas de arroz na safra de 2019/2020 (MAPA, 2013).

Para o consumo humano, a produção de arroz tem que sofrer um beneficiamento industrial. A usina de beneficiamento recebe o arroz colhido ainda com casca, com uma umidade que varia de 25 a 30%, conforme as condições do plantio e a época do ano. Esta umidade precisa ser reduzida para 12 a 15%, assim é necessário que se faça uma secagem. A secagem é feita com a queima da casca do arroz e os gases gerados pela combustão são empregados como meio de aquecimento.

Segundo o Biodieselbr (2013), 50% da casca produzida é utilizada na produção de energia, sendo que desses 50%, aproximadamente 15% é destinada à secagem do arroz, e 35% é disponibilizada como biomassa para pequenas indústrias localizadas em diferentes locais.

Grande parte da casca de arroz, que antes era descartada no meio ambiente, agora é fonte de energia. Segundo o IRGA (2013), o arroz contém cerca de 22% de casca e são gerados cerca de 300 mil toneladas de sílica através dessa casca. Após a combustão sobram 22,6% de cinzas com alta concentração em torno de 80 a 95% de sílica.

A cinza obtida da queima da casca do arroz apresenta coloração escura devido à presença de carbono. O potencial de utilização da sílica na construção civil é significativo. Segundo o site RICE HUSK ASH (2011), há uma crescente demanda por sílica amorfa na produção de cimento e produção de concreto para uso em pontes, ambientes marinhos, usinas nucleares, etc. A cinza de casca de arroz pode ser utilizada na produção de concreto de alto desempenho, refratário, telhas, produtos químicos impermeabilizantes, tintas para aplicações específicas, retardadores de chamas, entre outros.

Siddique e Khan (2011) destacaram algumas vantagens do uso de cinza de casca de arroz como pozolana no concreto e no cimento, entre elas: melhora na resistência e durabilidade, diminuição no custo do material devido à economia de cimento e benefícios ambientais relacionados à eliminação de resíduos e a redução das emissões de dióxido de carbono.

A reatividade da sílica da cinza de casca de arroz depende de fatores complexos interligados à temperatura e duração da incineração e do resfriamento. No estudo feito por Muthadhi e Kothandaraman (2010) a condição de incineração ideal encontrada foi de 500°C por 120 minutos, produzindo cinza com máxima densidade e finura, maior teor de sílica amorfa, maior pozolanicidade e menor energia na produção; concluindo que a queima em temperatura além dos 600°C, o tamanho de partícula aumenta. Além disso, os autores aconselham a moagem em um moinho de bolas por 30 minutos para otimizar o processo.

Já o estudo realizado por Krug (2011) foi baseado no desenvolvimento de três traços (0,41; 0,49 e 0,57) e dois teores de substituição de cinza de casca de arroz (10 e 20%) com os dois tipos de cinza em estudo (natural e peneirada). O objetivo do trabalho foi avaliar a influência do beneficiamento da cinza de casca de arroz por peneiramento em concretos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, através da caracterização da cinza, e seu desempenho como pozolana. Os resultados foram avaliados por análise estatística, indicando que tanto o beneficiamento de peneiramento quanto o teor de substituição apresentaram efeitos significativos sobre as propriedades no estado endurecido do concreto. As propriedades no estado fresco também sofreram influência do teor e do tipo de cinza utilizada.

Meira (2009) confirma que há a viabilidade técnica do emprego de cinza de casca de arroz natural, sem moagem para o emprego em concreto estrutural em um teor de substituição de 15%. Os resultados de resistência axial foram superiores à referência e os resultados de retração, módulo de elasticidade e resistência à compressão diametral foram inferiores, porém com valores não significativos.

O princípio da pesquisa de Cezar (2011) foi investigar a viabilidade técnica da substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz residual, sem queima controlada e sem moagem. O autor analisou as propriedades de durabilidade do concreto e obteve como resultado a viabilidade técnica do uso de 15% de cinza de casca de arroz natural sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural. A mesma porcentagem foi encontrada no estudo feito por Zerbino, Giaccio e Isaia (2011), que utilizada cinza de casca de arroz sem e com beneficiamento. Para estes autores, quando o concreto com CCA é comparado com o concreto referência, a substituição de 15% de cimento por cinza sem o beneficiamento, alcança propriedades mecânicas e de durabilidade semelhantes; porém, com o beneficiamento os resultados melhoram ainda mais.

Ganeasan, Rajagopal e Thangavel (2008), confirmam que a substituição de 30% (em massa) de cimento por CCA, melhora consideravelmente as propriedades do concreto; reduzindo cerca de 35% de permeabilidade de água e 28% o coeficiente de difusão de cloretos. Estas observações têm uma relação direta com a durabilidade das estruturas de concreto armado.

A utilização de materiais pozolânicos melhora algumas propriedades, tais como o aumento da resistência mecânica, menor permeabilidade de água e diminuição do coeficiente de penetração de cloretos, em função da diminuição dos poros (HOFFMAN 2001; GASTALDINI et al. 2007; MAHMUD, HAMID e CHIN, 2010; ZERBINO, GIACCIO e ISAIA, 2011; TENG, LIM e DIVSHOLI, 2013).

Chindaprasirt et al. (2007) acreditam que a melhora na resistência dos concretos à penetração de íons cloreto se deve ao fato do tamanho dos grãos e da finura da pozolana utilizada em questão, pois o material melhora a zona de transição da interface entre o agregado reciclado de concreto e a pasta de cimento.

A incorporação de cinza de casca de arroz, nos casos citados acima, melhora as propriedades do concreto. No entanto, o presente estudo utiliza, em alguns traços, o agregado

reciclado de concreto juntamente com a cinza de casca de arroz, por isso é importante conhecer como acontece essa associação no concreto.

2.6 ASSOCIAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E POZOLANAS

A utilização de materiais pozolânicos, além de diminuir o consumo de cimento e o custo, diminui as emissões de CO₂. Apesar das vantagens dos materiais pozolânicos, a combinação desses materiais com agregados reciclado de concreto, tem sido raramente estudada (HWANG et al., 2013). Desta forma, não foram identificados trabalhos específicos sobre ARC e CCA enfocando a durabilidade e, neste segmento da revisão bibliográfica, toma-se como referência trabalhos que estudaram outros tipos de pozolana, como cinza volante, escória de alto-forno, entre outros.

Os efeitos da cinza volante sobre a resistência à compressão, o tamanho dos poros e a penetração de íons cloreto em agregado reciclado de concreto foram estudados por Poon e Kou (2006). A substituição do agregado graúdo foi de 20, 50 e 100% em relação ao agregado graúdo natural e o teor de cinza volante utilizado como substituição do cimento foi de 0, 25 e 35% (em massa). Os resultados mostram que a resistência à compressão do concreto diminui com a incorporação de agregado reciclado e aumenta com a inclusão da cinza. A porosidade total e o tamanho médio dos poros do concreto é maior conforme o aumento do teor de agregado reciclado. Além disso, um aumento no teor de agregado reciclado diminuiu a resistência à penetração de íons cloreto. No entanto, a substituição de 25% de cimento por cinza volante melhora a resistência à penetração de íons cloreto e o diâmetros de poros e há uma redução da porosidade total do concreto agregado reciclado.

Li, Xiao Zhou (2009), demostram que a zona de interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, pode ser melhorada, aumentando sua densidade com a utilização de pó pozolânico no entorno dos agregados reciclados. Além disso, melhora a trabalhabilidade do concreto e aumenta a resistência à compressão e flexão. O mesmo comportamento acontece quando se utiliza resíduos da indústria cerâmica na fabricação de agregado reciclado, em substituição parcial (15, 20 e 25%) do agregado graúdo natural. Há melhora no comportamento mecânico e de durabilidade, além de ser observada uma zona de transição do agregado reciclado com a pasta mais compacta e menos porosa (MEDINA, FRÍAS e ROJAS, 2012).

A abordagem feita por Limbachiya, Meddash e Ouchagour (2012) inclui a substituição de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto (ARC) em

teores de 0, 30, 50 e 100%, obtidos a partir da britagem de concretos, além da substituição parcial de 30% de cimento Portland por cinza volante para a produção de um novo concreto. O artigo dos autores discute o efeito da substituição parcial e integral dos recursos naturais por agregados graúdos em concretos com cinzas volantes. Os resultados obtidos mostraram que, a incorporação de mais de 30% na quantidade de ARC pode diminuir a resistência à penetração de cloretos e a carbonatação do concreto; porém, o uso de cinzas em concretos com ARC pode melhorar significativamente a resistência à penetração de cloretos e resistência à sulfatos. Consequentemente, tem-se um aumento da vida útil de concretos expostos a ambientes agressivos, quando estes forem misturados em proporções adequadas de cinza e uma relação a/agl baixa, a fim de melhorar a sua permeabilidade.

No estudo realizado por Berndt (2009), o autor substituiu, em diferentes teores, o cimento por cinza volante ou escória de alto forno e utiliza agregados reciclados de concreto. O resultado mostra que as misturas contendo 50% de escória de alto forno tiveram o melhor desempenho geral. Nos testes de durabilidade, com o uso de agregado reciclado se obteve um aumento no coeficiente de permeabilidade e difusão de íons cloreto, no entanto esses valores permaneceram aceitáveis. Além disso, o coeficiente de difusão de cloretos melhorou com a incorporação de escória na mistura.

Ann et al. (2008), utilizaram escória de alto forno e cinza volante para compensar a perda de força e durabilidade nos concretos que contenham agregado reciclado. Os resultados demonstram que a resistência à compressão aumentou em 30% com os concretos contendo cinza volante e 65% em concretos com escória de alto forno. Em relação ao teste de penetração rápida de íons cloreto, houve uma diminuição na taxa de corrosão, obtendo a mesma porcentagem citada acima. A permeabilidade do concreto também diminuiu na incorporação das duas pozolanas, já que esse material preenche os poros na matriz do cimento e bloqueia o caminho da água e dos agentes agressivos para o interior do concreto.

Assim como os autores citados acima, Hwang et al. (2013) utilizaram a escória de alto forno e a cinza volante, em seu estudo, com 30 e 60% de substituição ao cimento, respectivamente. Os resultados obtidos foram similares ao estudo de Ann et al. (2008); os concretos contendo as pozolanas aumentaram a resistência à compressão, equivalendo aos resultados obtidos no concreto referência. A penetração de cloretos diminuiu com a substituição das pozolanas.

A publicação recente de Kou e Poon (2013) apresenta os resultados de um estudo de longo prazo sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto preparados

com 0, 50 e 100% de agregado reciclado, sendo estes curados em água ou em condições de exposição ao ar livre por 10 anos. Os concretos com agregados reciclado foram preparados usando 25, 35 e 50% de cinza volante, como substituição do cimento. Após 10 anos, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto com 100% de ARC era ainda menor do que o concreto de referência. Ao longo do período, a maior resistência à compressão foi a mistura feita com 55% de cinza volante. Ela melhorou a resistência à penetração de íons cloreto.

A incorporação de 25 a 35% de cinza em concretos com um percentual alto de ARC é uma alternativa viável para melhorar as propriedades desses concretos. A substituição de cinza volante parcial pelo cimento ou a sua adição diminui a absorção de água no concreto, além de diminuir também com a relação a/agl (KOU e POON, 2012).

O estudo de Tangchirapat et al. (2008), foi o único encontrado na literatura que utiliza cinza de casca de arroz como material pozolânico (20, 35 e 50%) em conjunto com ARC. Foram utilizados 100% de agregado graúdo reciclado e 0, 50 e 100% de agregado miúdo reciclado (areia de rio mais fina). Os resultados revelam que concretos com agregado reciclado apresentaram menor resistência à compressão do que o concreto convencional. Além disso, o uso de CCA com agregados reciclados resultou no aumento da resistência à compressão se comparados com os concretos sem CCA, porém aumentou a perda de abatimento do concreto. O estudo não avalia a questão de durabilidade desses novos concretos.

Resumindo os resultados das pesquisas já realizadas, o agregado reciclado de concreto é um material extremamente poroso, que diminui as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos. Em contrapartida, as pozolanas são responsáveis por melhoras nestas propriedades, por isso a importância da combinação desses dois materiais para viabilizar sua aplicação. Não foi encontrado na literatura um estudo sobre a durabilidade dos concretos com a incorporação de cinza de casca de arroz associado com o uso de agregado reciclado de concreto, o que confere um caráter inovador a esta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em função dos objetivos propostos pelo presente estudo, foi organizado e desenvolvido um programa experimental, sendo estabelecidos os fatores de controle, as variáveis de análise, os materiais e os métodos de experimento. Para a execução deste programa experimental, foram considerados a disponibilidade dos recursos e o cronograma proposto e aprovado na qualificação do projeto. Informações detalhadas são descritas a seguir.

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para alcançar os objetivos propostos, o planejamento de experimentos necessita a definição de algumas variáveis. Considerando um projeto fatorial n^k , onde n são os níveis de estudo, e k é o número de fatores de controle contemplados. São apresentados na sequência, os níveis de estudo, os fatores de controle e as variáveis de resposta.

3.1.1 Fatores de controle

A Tabela 6 apresenta os fatores de controle com os seus níveis.

Tabela 6 - Programa fatorial de experimentos - fatores de controle e níveis de estudo.

Fatores de controle	Níveis de estudo		
Relação a/agl	0,42	0,53	0,64
Teor de CCA (%)	0	10	20
Teor de ARC (%)	0	25	50

Sendo k igual a três e n igual a três, chegou-se ao programa fatorial de experimentos 3^3 , de onde se obtém 27 traços de concreto. Para cada combinação de variáveis foram produzidos três exemplares, totalizando 81 corpos de prova cilíndricos por traço. As fatias para os ensaios de penetração de íons cloreto e para os ensaios de absorção de água foram extraídas de um mesmo corpo de prova. Ainda como fator de controle pode ser considerado a idade para a variável de resposta “resistência à compressão”, com quatro níveis de controle (7, 28, 63 e 91 dias), resultando uma produção de 405 corpos de prova para a realização desta dissertação.

Os fatores fixos, com apenas um nível de estudo foram:

1. Tipo de cimento – CP-II-F-32;
2. Tipo de ARC – resíduo de concreto pré-fabricado de cura convencional;
3. Tipo de adição mineral: cinza de casca de arroz, proveniente de um único lote.

3.1.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta estudadas propostas são:

- Resistência à compressão;
- Absorção de água por capilaridade;
- Penetração de íons cloreto, conforme o método da ASTM C1202;
- Penetração de íons cloreto, conforme o método da NT Build 492.

3.2 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados na pesquisa são provenientes da doação de uma empresa de serviço de concretagem da serra gaúcha.

3.2.1 Cimento

O cimento escolhido, doado pela empresa Concretat,. foi o CP II-F-32, pois não possui adições reativas o que facilita a compreensão da ação da cinza de casca de arroz. Na Tabela 7 é apresentada a caracterização física, química e mecânica do cimento. Em função da disponibilidade de material, foi necessário empregar cimento de dois lotes distintos. No entanto, as caracterizações indicam não haver diferenças significativas entre eles.

Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do cimento.

Parâmetro	Lote Abril 2012	Lote Maio 2012
Al ₂ O ₃ (%)	4,12	4,12
SiO ₂ (%)	19,42	19,39
Fe ₂ O ₃ (%)	2,60	2,59
CaO (%)	60,76	60,78
MgO (%)	4,85	4,93
SO ₃ (%)	3,03	3,08
Perda ao Fogo (%)	6,04	6,08
CaO Livre (%)	2,89	2,24
Resíduo Insolúvel (%)	2	2
Equivalente Alcalino (%)	0,63	0,62
Expansão à Quente (mm)	0,50	1,00
Início de Pega (h:min)	03:20	3:30
Fim de Pega (h:min)	04:30	4:30
Água Cons.Normal (%)	26,20	26,30
Blaine (cm ² /g)	3.850	3.720
#200 (%)	3,4	4,2
#325 (%)	16,3	15,5
fc 1 dia (MPa)	16,3	16,9
fc 3 dias (MPa)	29	29,3
fc 7 dias (MPa)	36,9	36,6
fc 28 dias (MPa)	41,9	41,9
Massa específica (g/cm ³)	3,11	3,11

Fonte: Fabricante

3.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz empregada neste trabalho é uma pozolana resultante da queima de biomassa em forno de leito fluidizado para a geração de energia. A empresa geradora de energia localiza-se na cidade de Alegrete, RS, e comercializa a cinza para a construção civil como “sílica da casca de arroz”.

A caracterização química da pozolana foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, empregando a técnica de Fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) no equipamento EDX-720 SHIMADZU. Empregou-se um padrão secundário e o resultado desta caracterização é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização química da cinza de casca de arroz.

Parâmetro	Teor (%)
SiO ₂	94,99
K ₂ O	1,01
SO ₃	0,57
Cl	0,43
CaO	0,33
MnO	0,20
Al ₂ O ₃	0,18
P ₂ O ₅	0,10
Fe ₂ O ₃	0,06
TiO ₂	0,01
MgO	0,01
ZnO	0,00
P.F.	2,12

A CCA é uma pozolana classe E que apresenta um elevado teor de sílica, e a soma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ perfaz um total de 95,23% bem superior ao mínimo de 50% exigido para estas pozolanas, além de apresentar perda ao fogo igual a 2,12% que é inferior ao limite máximo de 6% exigido para a mesma classe, conforme a ABNT NBR 12653: 2012. A atividade pozolânica da CCA, testada de duas maneiras pela ABNT NBR 5752:1992 e pela mesma norma adaptada ao ajustar a consistência com aditivo. Também calculou-se a atividade pozolânica empregando-se condutividade elétrica (LUXÁN, 1989). Os valores obtidos para índice de atividade pozolânica, apresentados na Tabela 9, demonstram que a utilização de cinza de casca de arroz pode contribuir para o aumento de resistência nos concretos. Pelo método convencional se obteve um índice de atividade pozolânica de aproximadamente 105%, enquanto pelo método adaptado da norma esse aumento foi de

aproximadamente 132%, ou seja, em ambos os casos, o percentual ultrapassou os valores exigidos pela norma (\geq a 75%). Com estes índices a CCA atende plenamente aos requisitos químicos da norma ABNT NBR 12653: 2012

Tabela 9 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.

Material	Cimento (g)	CCA (g)	Água (g)	Aditivo (g)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	fc (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)	Condutividade ($\mu\text{s/cm}$)
Ref.	312	---	155	---	100	223	25,8	-----	
CCAa	202,2	74,4	165	---	106,5	226	27,0	104,7a	
CCAb	202,2	74,4	155	0,43	100	225	34,2	132,5b	1,3

^a Índice de atividade pozolânica pela ABNT NBR 5752:1192;

^b Índice de atividade pozolânica pela ABNT NBR 5752:1192 adaptada, com aditivo.

A caracterização mineralógica da CCA foi realizada no difratômetro Siemens D5000 do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Física da UFRGS. A Figura 12 apresenta o difratograma obtido. A análise mineralógica por DRX retornou picos de sílica cristalina bem definidos de quartzo e cristobalita. Estes minerais podem ter se formado durante o processo de combustão da casca de arroz, rica em sílica. Contudo, os cristais de quartzo também podem ter origem na areia quartzosa presente no processo de fluidificação do forno, que passa a “contaminar” a cinza (ANGEL et al., 2009).

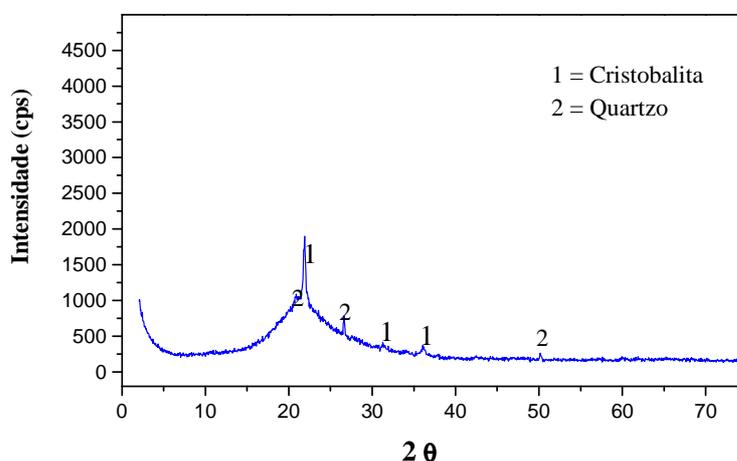


Figura 12 – Difratograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.

O tamanho médio de partícula da CCA foi obtido por granulometria de difração laser, realizada no LCVm da Unisinos, com o equipamento Microtac S3500. A preparação da amostra constou em dispersar o material em água com aditivo superplastificante, submetendo ao ultrassom na potência de 40 W por 60 segundos. Obteve-se a dimensão média de partícula de **6,22 μm** e a distribuição granulométrica é apresentada no gráfico da Figura 13. Ao analisar-se a distribuição granulométrica verificou-se que aproximadamente 99% dos grãos

apresentam dimensão inferior a $44\ \mu\text{m}$, o que também faz com que esta pozolana atenda aos requisitos físicos da ABNT NBR 12653:2012. A massa específica desta cinza é de $2,12\ \text{g}/\text{cm}^3$.

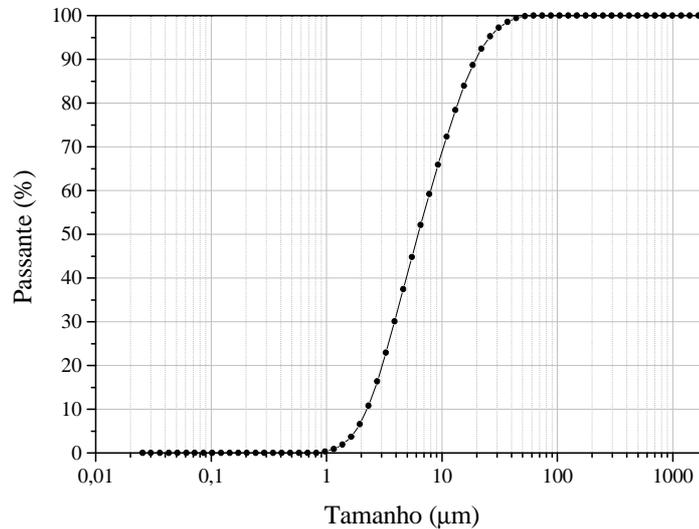


Figura 13 – Distribuição granulométrica da Cinza de casca de Arroz.

A Figura 14 apresenta a micrografia da cinza de casca de arroz obtida em microscópio eletrônico de varredura, onde é possível observar a forma irregular da partícula e o tamanho das mesmas. A Figura 15 apresenta a micrografia de pasta de cimento e a Figura 16 apresenta a micrografia da pasta de cimento com CCA, ambas com idade de 48 horas. Pode-se perceber a diferença dos produtos de hidratação destas pastas. Na Figura 15, visualiza-se a formação de produtos de hidratação: C-S-H e etringita, esta, assumindo formas de pequenas agulhas; enquanto na Figura 16, os cristais de etringita foram encontrados em menor quantidade.

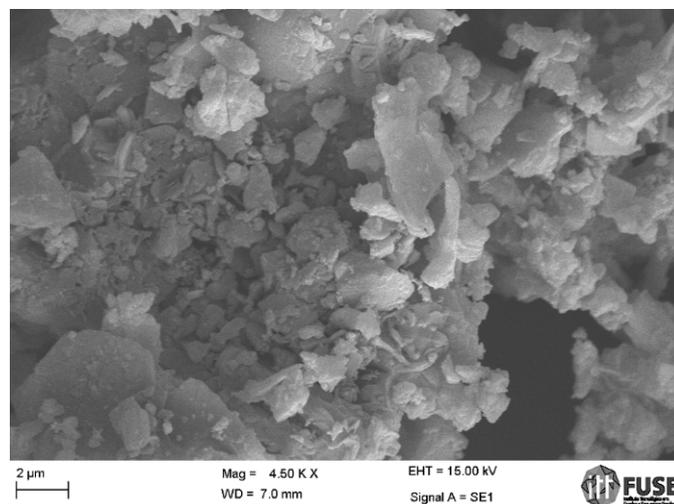


Figura 14 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).

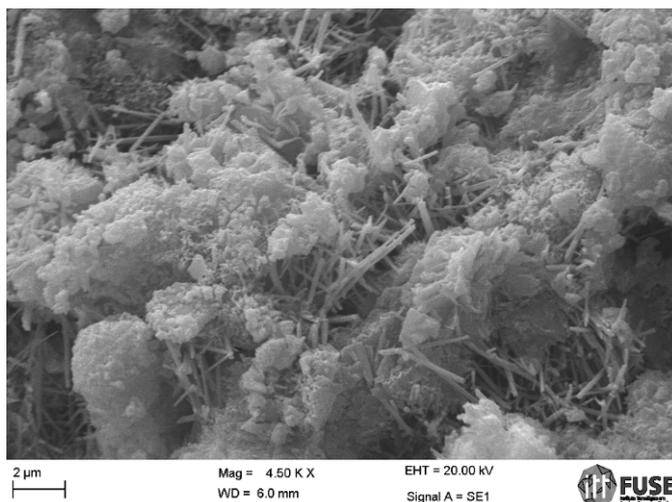


Figura 15 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).

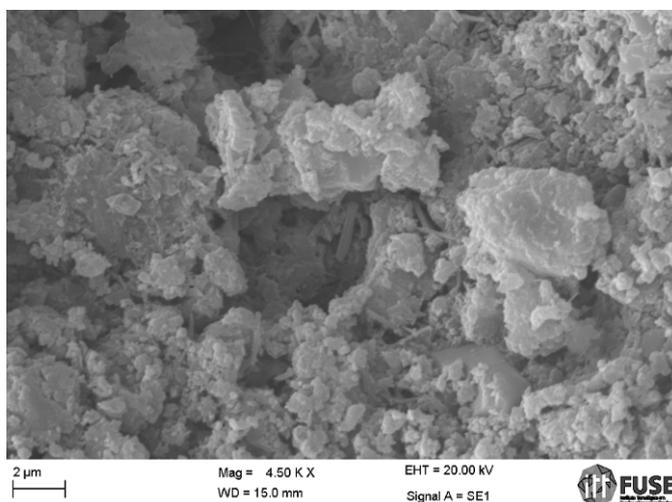


Figura 16 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).

3.2.3 . Agregado Miúdo Natural (AMN)

O agregado miúdo natural empregado na pesquisa foi areia quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul

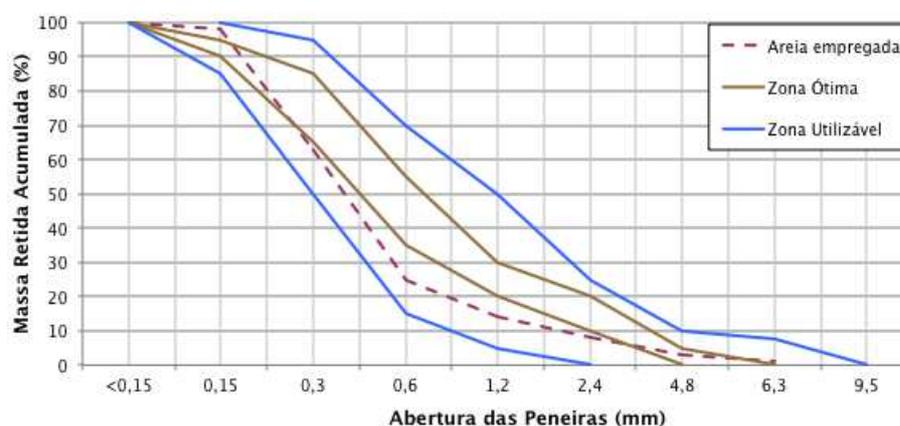
A caracterização da areia quartzosa foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica e massa unitária que seguiram a ABNT NM 248:2003, ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NM 45:2006, respectivamente. A areia foi seca ao ar em local abrigado para a realização da caracterização, bem como para a utilização para esta pesquisa. Após este processo a areia foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. Os dados referentes à caracterização da areia são apresentados a seguir na Tabela 10 e na Tabela 11, bem como na curva granulométrica da Figura 17.

Tabela 10 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa

Ensaio/NBR	Resultado (g/cm ³)
Massa unitária/ NM 45 - 2006	1,52
Massa específica/ NM 52 - 2009	2,55

Tabela 11 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
6,3	1	1
4,8	2	3
2,4	5	8
1,2	6	14
0,6	11	25
0,3	38	63
0,15	35	98
<0,15	2	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8 mm
Módulo de Finura		2,12

**Figura 17 – Granulometria do agregado miúdo natural, conforme NBR NM 248:2003.**

3.2.4 Agregado Graúdo Natural (AGN)

O agregado graúdo natural empregado na pesquisa foi brita basáltica, proveniente da Linha São Jorge, distrito de Garibaldi, Rio Grande do Sul.

A caracterização da brita basáltica foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica e massa unitária que seguiram a ABNT NM 248:2003, ABNT NBR NM 53:2006 e ABNT NBR NM 45:2006, respectivamente. Antes de realizar tais testes e para utilização na pesquisa, a brita teve que ser lavada e deixada secar ao ar à temperatura ambiente em local fechado para reduzir os finos aderidos no grão, após este processo a brita foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. Os dados obtidos são apresentados a seguir na Tabela 12 e na Tabela 13, e na curva granulométrica da Figura 19 (ao final da caracterização do ARC).

Tabela 12 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.

Ensaio/NBR	Brita (g/cm ³)
Massa unitária/ NM 45 - 2006	1,40
Massa específica/ NM 52 - 2009	2,67

Tabela 13 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.

Abertura da Peneira	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulado
19 mm	0	0
12,5 mm	39	39
9,5 mm	39	78
6,3 mm	22	100
4,8 mm	0	100
< 4,8 mm	0	100
Diâmetro máximo (mm)		19
Módulo de Finura		6,78

3.2.5 Agregado Reciclado de Concreto (ARC)

O agregado utilizado na pesquisa é proveniente de resíduo da produção de laje pré-fabricada tipo Rott, submetida a cura convencional, com fck 35MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20 mm. Todo o ARC utilizado na pesquisa foi o passante na peneira de malha de abertura 19 mm e retido na 4,8 mm. O mesmo foi seco em estufa por 24 horas na temperatura de 105°C. Após este processo, o ARC foi armazenado em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado.

A curva de absorção de água é apresentada na Figura 18. Obteve-se aos 10 minutos, uma absorção de 6,29% e às 24 horas 10,34%. Pela regressão do conjunto de dados a absorção aos 10 minutos é de aproximadamente 6% e este foi o valor adotado para taxa de compensação de água. O ponto de saturação deste conjunto de dados ocorre aos 31,6 minutos com uma absorção de 8,96%. A massa unitária do ARC é de **1,13 g/cm³** e a massa específica é de **2,21 g/cm³**.

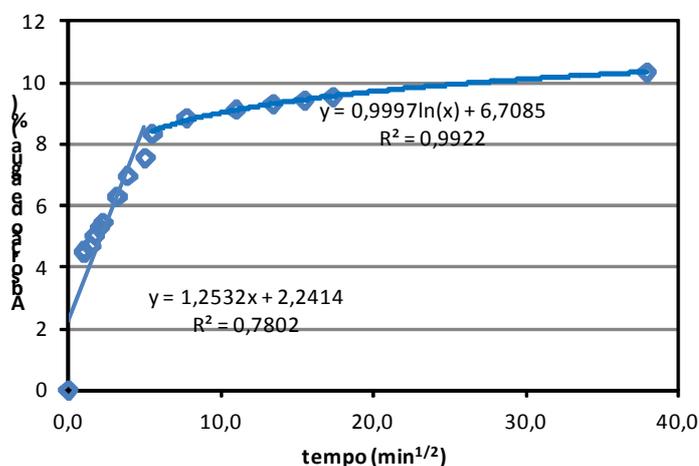


Figura 18 – Curva de Absorção de água do ARC.

A distribuição granulométrica do ARC é apresentada na Tabela 14 e na Figura 19.

Tabela 14 – Granulometria do ARC

Abertura de peneira # (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
38	0	0
25	0	0
19	36	36
12,5	43	79
9,5	10	89
6,3	10	99
<6,3	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		12,5
Módulo de finura		7,25

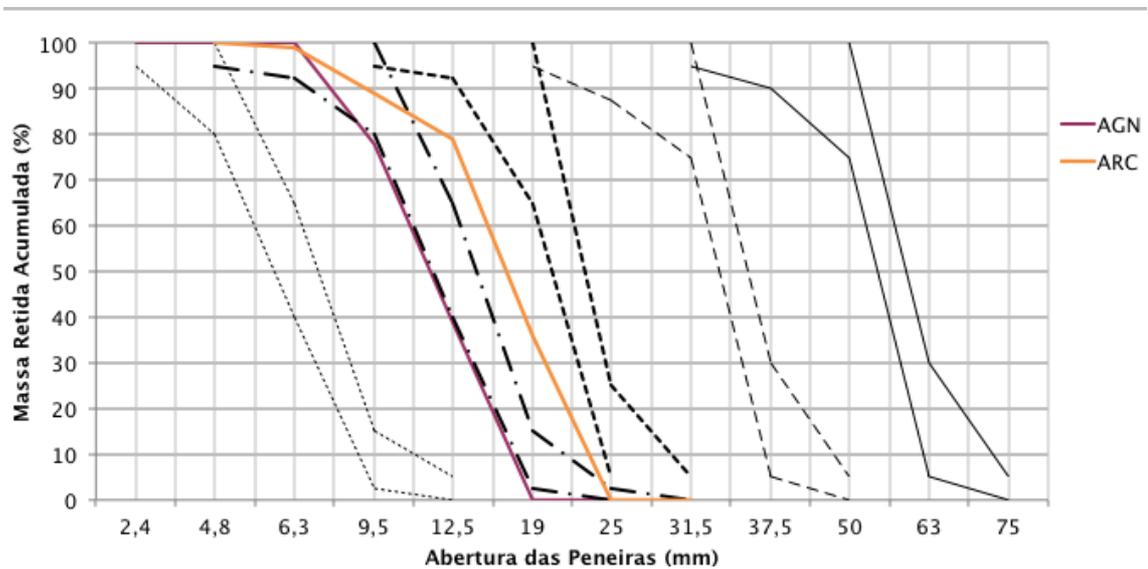


Figura 19 - Granulometria do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (ARC) utilizado na pesquisa.

3.2.6 Aditivo

O aditivo utilizado na pesquisa foi um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos de alto desempenho da marca MC-PowerFlow 1180. O máximo de aditivo aplicado em alguns traços foi de 0,28%, muito próximo ao mínimo recomendado pelo fabricante, que é de 0,2%. Na Tabela 15, encontram-se os dados técnicos do MC-PowerFlow 1180.

Tabela 15 – Dados Técnicos e características do MC-PowerFlow 1180

Característica	Valor
Densidade	1,07(g/cm ³)
Dosagem Recomenda em relação à massa de cimento	0,2 a 5,0 (%)
Teor de Cloretos	< 0,1 (%)
Teor de Álcalis	< 1,0 (%)

Fonte: Dados do fabricante - MC-BAUCHEMIE (2013).

3.2.7 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local de São Leopoldo/RS, onde o órgão responsável pela sua potabilidade é o SEMAE.

3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Produção dos concretos

Para a produção de concreto fixou-se o teor de argamassa em 55% e um concreto com consistência de Classe S100 (ABNT NBR 8953:2009), fixando-se o abatimento de tronco de cone em 100 ± 20 mm. Anteriormente à produção dos concretos do programa experimental foi realizado um estudo de dosagem para ajustar e definir os três níveis de relação a/agl que foram mantidos fixos nos traços com ARC e CCA. A consistência foi ajustada com o auxílio de aditivo superplastificante. As misturas foram realizadas em uma betoneira de eixo vertical, sendo sua capacidade aproximada de 70 litros.

A ordem dos materiais foi estipulada conforme os estudos já realizados por Meira (2009), Werle (2010), Troian (2010) e Krug (2011). Segundo eles a ordem dos materiais é:

1. Colocação do agregado graúdo natural;
2. Colocação de 50% de água;
3. Colocação do cimento, e de CCA, quando fosse o caso;
4. Colocação do agregado miúdo;
5. E por fim, os outros 50% de água.

Quando os traços continham ARC, estes eram adicionados ao agregado graúdo natural, na betoneira e era promovida a pré-molhagem dos agregados, cujo conteúdo de água era composto pela fração calculada conforme a Equação 4, acrescida de aproximadamente 10% da água de amassamento. Após a homogeneização dos agregados naturais e reciclados com a água, a cuba da betoneira era protegida para evitar a evaporação de água e aguardava-se por 10 minutos para proceder ao restante da mistura.

Tanto a substituição do cimento por CCA quanto do agregado graúdo convencional por ARC foram realizadas em massa com compensação de volume (Equação 3), em função da diferença significativa entre as massas específicas dos materiais. Desta forma é

possível manter constante o volume de pasta de aglomerante, bem como a relação entre o volume de argamassa e o volume de agregado graúdo.

$$M_{ARC} = \frac{M_{AN}}{\gamma_{AN}} \times \gamma_{ARC} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

M_{ARC} – massa de agregado reciclado;

M_{AN} – massa de agregado natural;

γ_{AN} – massa específica do agregado natural;

γ_{ARC} – massa específica do agregado reciclado.

A taxa de compensação de água empregada foi de 50% da absorção aos 10 minutos, adotada como 6,0% e o cálculo da quantidade de água para tal fim foi calculada pela Equação 4.

$$M_{H_2O} = 0,50 \times ABS_{10min} \times M_{ARC} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

M_{H_2O} – massa de água de compensação;

ABS – absorção aos 10 minutos;

M_{ARC} – massa de agregado reciclado.

Passados 8 minutos após o acréscimo de cimento, foi verificada a consistência do concreto através do ensaio do abatimento de tronco de cone. Quando era necessário adicionava-se o aditivo superplastificante por mais dois minutos e se repetia a medida de abatimento, conforme ABNT NBR NM 67: 1996.

A Tabela 16 apresenta a relação dos traços estudados e consumos de materiais para cada uma das misturas de 70 kg de material seco. Cada um dos traços foi rodado em duas vezes, logo, as quantidades empregadas foram duplicadas. Empregou-se a água determinada no ajuste da relação água/aglomerante do traço referência. O abatimento de tronco-cone foi acertado com o auxílio de superplastificante a base de policarboxilato.

Tabela 16 – Consumo de materiais para os traços estudados.

Traço unitário (kg)	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Cimento (kg/m ³)	CCA ¹ (kg/m ³)	Agreg. miúdo (kg/m ³)	Agreg ² . graúdo (kg/m ³)	ARC (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (%)	T (°C)	U.R. (%)
1:1,75:2,25	0	0	0,42	437	0	764	982	0,00	183	0	15,8	70
1:2,36:2,74	0	0	0,53	354	0	834	972	0,00	188	0	15,4	66
1:2,96:3,24	0	0	0,64	298	0	882	965	0,00	191	0,12	16,4	68
1:1,75:2,25	10	0	0,42	393	30	764	982	0,00	195	0,2	17,2	84
1:2,36:2,74	10	0	0,53	319	24	834	972	0,00	199	0,04	18,7	69
1:2,96:3,24	10	0	0,64	268	20	882	965	0,00	203	0,14	17,5	83
1:1,75:2,25	20	0	0,42	349	59	764	982	0,00	206	0,18	16,4	69
1:2,36:2,74	20	0	0,53	283	48	834	972	0,00	211	0,08	17,7	64
1:2,96:3,24	20	0	0,64	238	40	882	965	0,00	215	0,23	15,7	74
1:1,75:2,25	0	25	0,42	437	0	764	737	203	183	0,13	28,9	61
1:2,36:2,74	0	25	0,53	354	0	834	729	201	207	0,08	28,5	65
1:2,96:3,24	0	25	0,64	298	0	882	724	200	210	0	27,6	66
1:1,75:2,25	0	50	0,42	393	33	764	737	203	214	0,28	16,5	78
1:2,36:2,74	0	50	0,53	319	26	834	729	201	219	0	16,3	80
1:2,96:3,24	0	50	0,64	268	22	882	724	200	223	0,09	16,1	83
1:1,75:2,25	10	25	0,42	349	65	764	737	203	226	0	14	94
1:2,36:2,74	10	25	0,53	283	53	834	729	201	232	0	13,7	91
1:2,96:3,24	10	25	0,64	238	44	882	724	200	236	0	13,8	96
1:1,75:2,25	10	50	0,42	437	0	764	491	407	225	0,09	18,7	69
1:2,36:2,74	10	50	0,53	354	0	834	486	402	230	0,11	20	85
1:2,96:3,24	10	50	0,64	298	0	882	483	400	233	0,09	19,5	83
1:1,75:2,25	20	25	0,42	393	36	764	491	407	238	0,17	15,3	83
1:2,36:2,74	20	25	0,53	319	29	834	486	402	244	0,17	17,9	70
1:2,96:3,24	20	25	0,64	268	25	882	483	400	247	0,15	15,4	88
1:1,75:2,25	20	50	0,42	349	72	764	491	407	251	0,21	18,3	61
1:2,36:2,74	20	50	0,53	283	58	834	486	402	257	0,22	19,3	55
1:2,96:3,24	20	50	0,64	238	49	882	483	400	262	0,23	17,3	65

¹Massa do volume de CCA equivalente ao volume da massa de cimento substituído; ²Massa do volume de ARC equivalente ao volume da massa de cimento substituído.

3.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

As fôrmas cilíndricas de 100 x 200 mm foram preenchidas em uma única camada e adensadas durante 10 segundos, contados desde a introdução até a retirada da agulha do vibrador de imersão. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desformados, identificados e prontamente submetidos à cura submersa em tanques com água saturadas de cal, em sala com temperatura controlada de 21°C ± 2°C. A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram a ABNT NBR 5738:2003 e os ensaios de resistência à compressão a ABNT NBR 5739:2003.

3.3.3 Preparação dos corpos de prova para ensaios de durabilidade

Após a etapa de cura de 28 dias, os corpos de prova foram retirados da sala de cura e cortados em três partes iguais, provenientes da parte central. Cada uma das três fatias foi utilizada para um tipo de ensaio de durabilidade: absorção de água por capilaridade,

penetração de cloretos pelo método ASTM C1202 e penetração de cloretos pelo método NT Build 492. A espessura dos espécimes adotada foi de 50 ± 2 mm, atendendo à todas as normas dos ensaios realizados. É importante ressaltar que houve uma aleatorização dessas fatias, a fim de não confundir o efeito da posição da fatia com o efeito das demais variáveis. O esquema que apresenta a maneira como as fatias foram cortadas encontra-se na Figura 20.

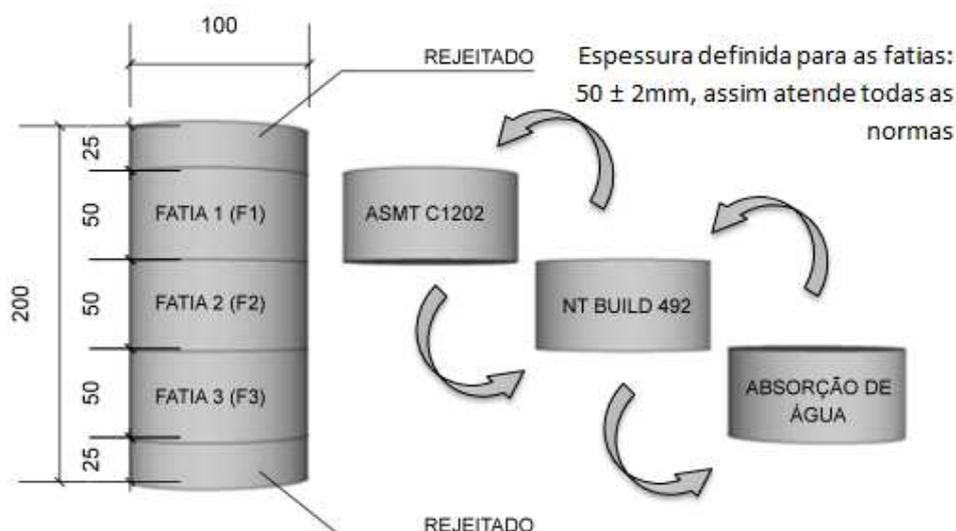


Figura 20 – Detalhe do modo como foram cortadas as fatias do corpo de prova e sua aleatoriedade.

Após o corte, as fatias foram identificadas, e a sua massa e espessura foram medidas. Em seguida, essas fatias foram levadas para secagem em estufa à $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até a obtenção de constância de massa de $\pm 0,5\text{g}$, a fim de parar a hidratação dos concretos. Após essa constância de massa, foram seladas as laterais dos corpos de prova com uma fita adesiva impermeável (tipo “*Silver Tape*”), mantendo as faces superior e inferior livres. Posteriormente, as fatias foram ensacadas em dois sacos plásticos resistentes com sílica gel dentro, a fim de evitar a presença de umidade. O armazenamento, até o momento do ensaio, foi realizado em tonéis plásticos com fechamento com anel metálico zincado e estes permaneceram em uma sala climatizada com temperatura $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

3.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu o procedimento da RILEM TC 116 PCD (1999), que foi modificado por Troian (2010) e Werle (2010), para os ensaios com concretos com a incorporação de resíduos.

As fatias de ensaio de absorção de água por capilaridade foram retiradas dos tambores, onde estavam armazenadas, conforme o procedimento citado anteriormente. A amostra ainda recebe uma cobertura impermeável na face superior, que não fica aderida à superfície, de maneira que não tenha interferência da umidade externa. Neste trabalho empregou-se látex de balões, por apresentar certa elasticidade. O ensaio se inicia com a colocação da amostra em uma bandeja com uma lâmina de água, imergindo três milímetros da amostra, sendo que este nível deve permanecer constante, conforme mostra a Figura 21.

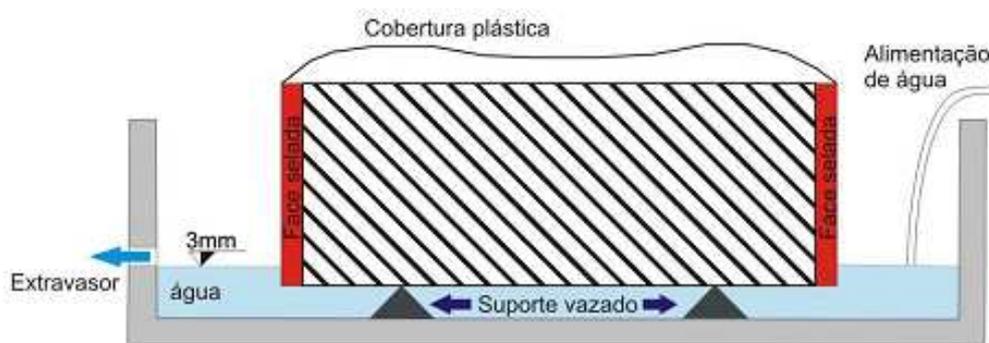


Figura 21 – Esquema experimental do método RILEM TC 116 PCD (1999)

Fonte: RILEM (1999) apud Troian (2010) e Werle (2010).

Para a execução do ensaio, foram utilizadas bandejas de plástico, com a colocação de estrados de plástico vazados internamente para que a água pudesse acessar a face inferior dos espécimes ensaiados, conforme Figura 22 (a). Para o abastecimento constante de água foi utilizado um suporte, feito a partir de garrafas pet, utilizado como reservatório, conforme Figura 22 (b).

O acompanhamento da pesagem das amostras foi feito nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas.



(a)



(b)

Figura 22 – (a) Bandeja com estrado de plástico metálico para passagem da água. (b) Detalhe do suporte com os reservatórios para o abastecimento constante de água.

Após cada intervalo de tempo, as amostras eram retiradas da água, secas superficialmente para remover o excesso de água (retirar o brilho), e a massa das mesmas eram medidas. Os resultados obtidos a partir deste ensaio constituem gráficos de absorção de água (em massa) ao longo do tempo.

3.5 ENSAIO ACELERADO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202

Um dos ensaios acelerados de migração de cloretos escolhido foi o método - ASTM C1202, pois ele é mundialmente utilizado, apesar de todas as críticas em relação a sua alta tensão (60V). No item 2.3.3 do presente trabalho, foi brevemente explicado este método; porém, para o programa experimental foram feitas algumas adaptações que serão descritas a seguir.

A primeira alteração realizada foi em relação à espessura do espécime. Segundo a ASTM C1202, ela deve ser em torno de 51 ± 3 mm, porém foi utilizada uma espessura de 50 ± 2 mm, medida que é especificada tanto pelo método da NT Build 492 quanto pelo método de absorção de água por capilaridade. Desta forma foi estabelecido um mesmo padrão para todos os ensaios.

A segunda alteração foi em relação à etapa de saturação das amostras. Conforme especificações da norma, inicialmente as fatias deveriam ser colocadas em um recipiente e submetidas à ação de vácuo por três horas. Ainda sob a ação do vácuo, deveria ser colocado no recipiente um litro ou mais de água potável, fervida e resfriada em temperatura ambiente, até a completa submersão da amostra, mantendo a bomba a vácuo ligada por mais uma hora. Substituiu-se a água, fervida e resfriada, por uma solução saturada de água destilada (ou deionizada) com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, empregando-se neste trabalho cal hidratada, seguindo o método NT Build 492. Foi realizado um estudo para verificar a correlação entre os valores de carga total passante para amostras preparadas conforme os dois procedimentos apresentados, obtendo-se um coeficiente de 98%, com valores em média 1,5% maiores para os preparados com água em relação aos preparados com cal. Desta forma, a preparação com cal parece não influenciar significativamente nos resultados.

Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura ambiente de $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 10\%$. Os espécimes foram colados entre as meias células com um selante à base de poliuretano e as solução de 3% de NaCl e 0.3N de NaOH, em água destilada, foram feitas no Laboratório de Análise Ambiental da Unisinos.

De acordo com a norma ASTM C1202, a face superior da fatia deve ser colocado na meia célula contendo o NaCl, e esta deve ser ligada no terminal negativo da fonte de alimentação. A outra face da fatia deve ser colocada na meia célula contendo NaOH, que deve ser ligada no terminal positivo da fonte de alimentação. O esquema das ligações elétricas e dos aparelhos envolvidos pode ser visualizado na Figura 23. A montagem completa do ensaio pode ser visualizada na Figura 24.

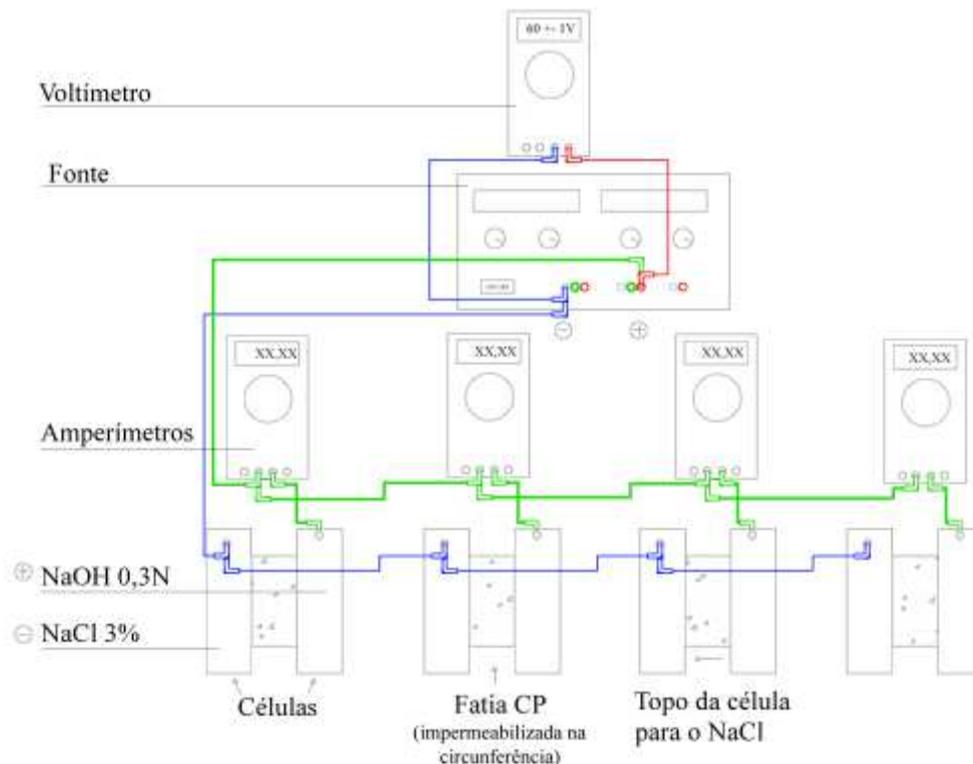


Figura 23 – Esquema das ligações elétricas e dos aparelhos envolvidos no ensaio da ASTM C1202.



Figura 24 – Ensaio da ASTM C1202, com oito fatias sendo executado.

Após a realização de 6 horas de ensaio, monitorados a cada 30 minutos, a carga total passante, em Coulombs (Q) pode ser calculada conforme a Equação 1, e classificada conforme a Tabela 3, já citados anteriormente.

3.6 ENSAIO ACELERADO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – NT Build 492

Este ensaio já foi apresentado no item 2.3.4. Algumas adaptações foram realizadas, em função de custos e facilidade de aquisição dos materiais para a montagem do sistema empregado na execução dos ensaios. Os materiais, os detalhes e a forma de montagem do sistema de ensaio empregado na execução deste método são detalhados em Fedumenti e Kulakowski (2013). As dimensões adaptadas para o reservatório do sistema de ensaio e os componentes de suporte da amostra são apresentadas na Figura 25.

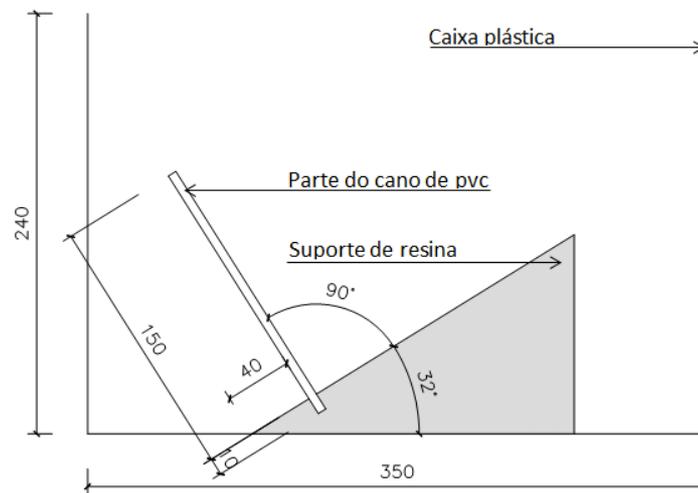


Figura 25 – Esquema da inserção do suporte dentro da caixa plástica.

A montagem completa do sistema de ensaio pode ser visualizada na Figura 26.



(a)



(b)

Figura 26 – (a) Montagem completa dos componentes envolvidos no ensaio e (b) vista geral do sistema de ensaio.

Todos os ensaios foram realizados na sala climatizada com temperatura ambiente de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 10\%$.

Após o término do ensaio, o corpo de prova é retirado da luva cuidadosamente, limpo com a aspersão de água destilada (ou deionizada, conforme o que foi utilizado), seco superficialmente e rompido axialmente, separando em duas partes. As superfícies fraturadas são aspergidas com uma solução de nitrato de prata (AgNO_3), sendo possível medir a sua profundidade de penetração em milímetros, conforme pode ser observado na Figura 27.

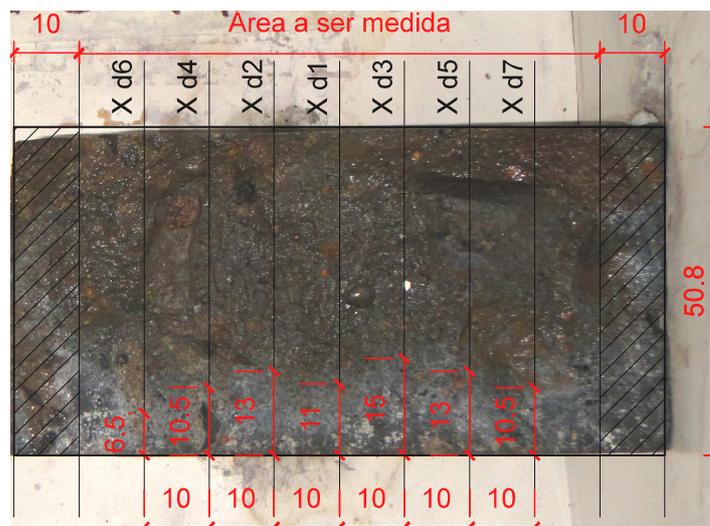


Figura 27 – Medição da penetração de íons cloreto após o ensaio e pulverização do AgNO_3 .

A expressão dos resultados é calculada através de um coeficiente de migração no estado não estacionário, apresentado na Equação 2 e pode-se classificar os concretos com base nos dados da Tabela 5 (item 2.3.4).

3.7 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de regressão não linear e análise de variância (ANOVA) foram empregadas como análises estatísticas para o tratamento dos dados, pois elas apontam se há significância dos fatores de controle envolvidos no estudo sobre as variáveis de resposta, bem como as possíveis interações entre essas variáveis a partir dos resultados obtidos. As análises foram feitas na versão de demonstração dos softwares *Statgraphics Centurion XVI.I* e *Statistica 10*.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados.

Conforme já citado anteriormente, as variáveis em análise são: resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, penetração de íons cloretos através dos métodos propostos pela ASTM C1202 (carga passante) e pela NT Build 492 (coeficiente de migração).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

Para auxiliar no entendimento do comportamento da interação da pasta de cimento da nova matriz com a superfície do ARC fez-se uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no laboratório do ITT FUSE da Unisinos. A análise enfocou a zona de transição pasta nova/ARC das amostras, pois é nessa região que se espera observar a interação da pasta de cimento com o ARC, o que pode auxiliar na compreensão do comportamento das variáveis de resposta dos concretos estudados. Para obtenção dessas imagens, foram moldadas pastas de cimento, sem areia, com uma relação a/agl 0,42 e com a substituição de 20% de cimento por CCA. A Figura 28 ilustra o aspecto geral da amostra com pasta de cimento e CCA.

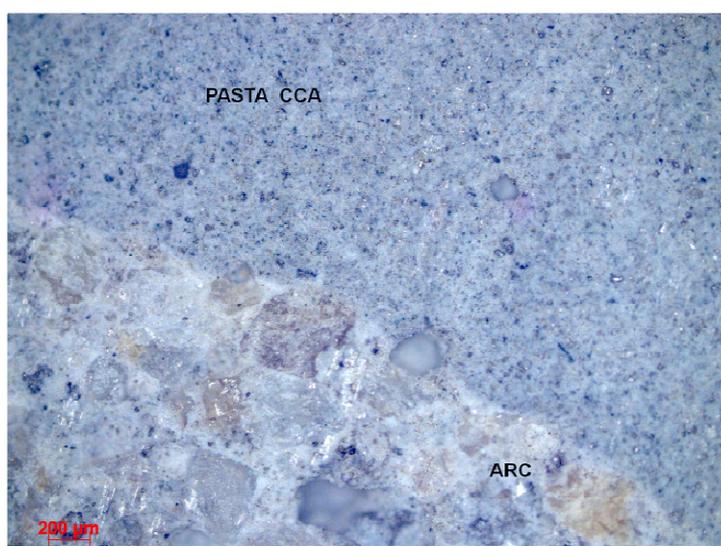


Figura 28 – Micrografia da interface ARC e pasta CCA, em microscópio ótico (50x).

A Figura 29 apresenta a interface da pasta de cimento sem CCA com a argamassa presente no ARC, em 48 horas de hidratação da pasta nova. O aumento é de 1000 vezes e a fissura observada provavelmente deve-se à retração da pasta de cimento, que não possui areia. Parece haver uma fraca penetração da pasta no ARC, pois se percebe cristais de produtos de

hidratação jovem presentes na argamassa do ARC. Nesta ordem de magnificação da microestrutura, é possível verificar a diferença entre os materiais, pois as pastas de idades avançadas são mais densas do que as pastas jovens.

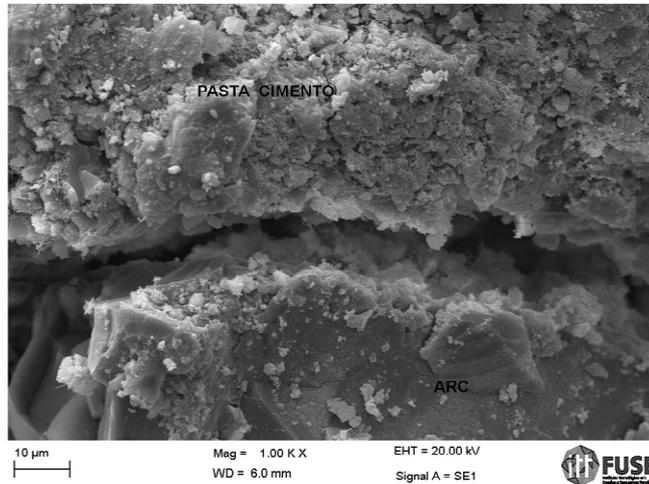


Figura 29 – Micrografia da interface entre a pasta nova de cimento e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 1000x).

A Figura 30 apresenta uma magnificação de 3000x da zona de transição entre o ARC e a nova pasta de cimento sem CCA, observada na Figura 29, podendo ser verificada a fissura formada e também os poros. Essa fissura pode ser proveniente de uma retração, em função da pasta não ter areia na sua composição, ou também da trepidação ocasionada pela serra, durante o corte da amostra.

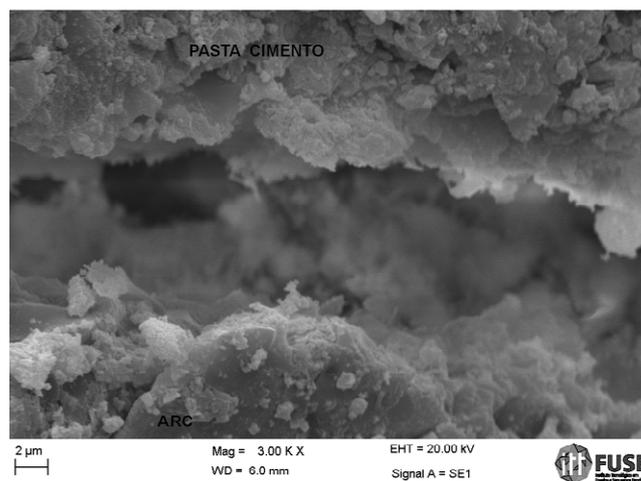


Figura 30 – Micrografia da interface entre a pasta nova de cimento e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 3000x).

Tam, Gao e Tam (2005) acreditam que os poros e fissuras dos agregados reciclados aumentam o consumo de água, diminuindo a relação água/aglomerante na zona de transição entre o agregado reciclado de concreto e a nova matriz de cimento.

A interface entre a pasta de cimento contendo 20% de CCA com 48 horas e a pasta (argamassa) do agregado reciclado é apresentada na Figura 31. Pode ser observado que há uma interação mais significativa entre as duas fases. A zona de interface é difícil de visualizar. Isto significa que a cinza de casca de arroz presente na pasta de cimento está interagindo com o ARC, o que pode auxiliar no entendimento de alguns resultados obtidos que serão apresentados na sequência.

Medina, Frías e Rojas (2012), acreditam que a interação existente entre o agregado reciclado e a pozolana, em que o agregado reciclado foi incorporado com grãos de dimensões maiores que 4 mm, se deve à reação pozolânica que ocorre com o hidróxido de cálcio disponível na superfície do agregado reciclado, originando silicatos hidratados com estrutura menos porosa e com maior capacidade aglomerante, resultando em concretos mais densos. A zona de transição entre o agregado reciclado e pasta se torna mais densa com o uso de pozolanas e pode diminuir a penetração de agentes agressivos nos concretos com CCA quando comparados aos concretos sem CCA.

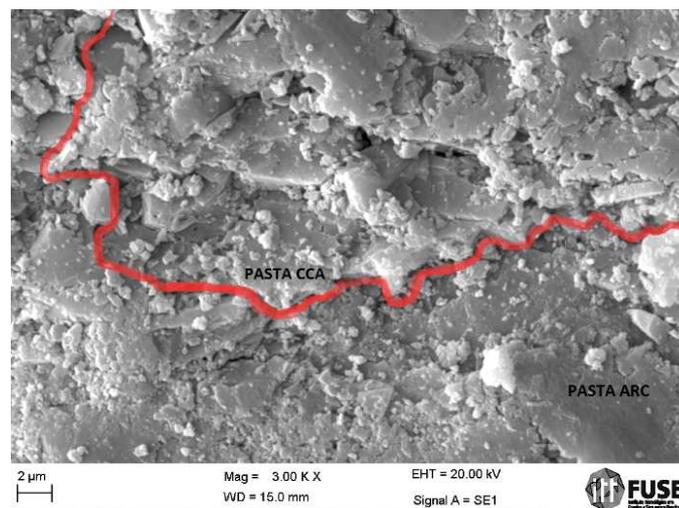


Figura 31 – Micrografia da interface entre a pasta contendo CCA e a pasta do ARC em 48 horas (aumento de 3000x).

A Figura 32 apresenta a interface entre ARC e pasta de cimento com CCA, aos 7 dias. Na região em destaque parece ter ocorrido a penetração da pasta para o interior do poro do ARC, o que poderia explicar alguns comportamentos em que os concretos com 50% de ARC e 20% de CCA apresentaram desempenho superior ou compatível com os concretos de referência, conforme será apresentado no item 4.3.

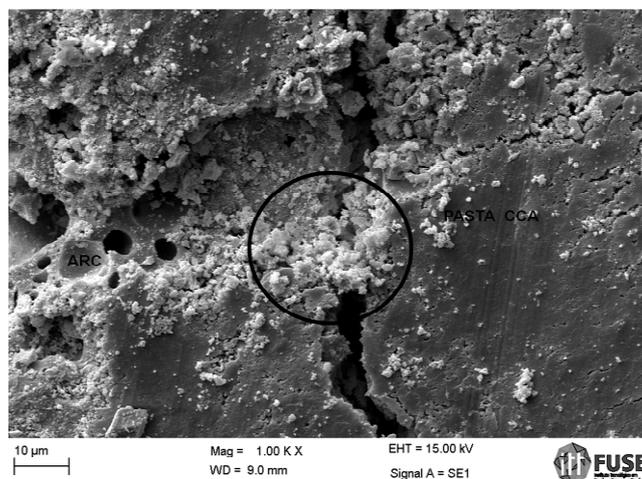


Figura 32 – Interface entre ARC e pasta de cimento com CCA aos 7 dias (aumento de 1000x)

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As médias dos resultados de resistência à compressão ao longo das idades são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17- Média dos resultados de compressão axial em todas as idades.

Traço	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Média 7 dias (MPa)	Média 28 dias (MPa)	Média 63 dias (MPa)	Média 91 dias (MPa)
A	0	0	0,42	37,10	41,10	46,97	46,93
			0,53	35,63	39,27	41,80	44,80
			0,64	20,73	25,23	27,30	27,23
B	10	0	0,42	41,57	45,80	51,93	46,30
			0,53	24,97	33,97	32,83	39,70
			0,64	17,83	25,30	31,00	27,43
C	20	0	0,42	38,47	51,53	44,40	49,67
			0,53	27,23	38,57	37,27	41,03
			0,64	19,43	28,30	30,00	31,43
D	0	25	0,42	34,00	39,00	43,47	31,63
			0,53	24,80	28,43	33,80	32,53
			0,64	21,87	18,00	21,83	22,00
E	0	50	0,42	38,90	41,67	43,30	41,80
			0,53	25,00	32,03	37,10	32,67
			0,64	20,33	25,60	30,17	28,17
F	10	25	0,42	34,57	49,83	42,83	42,50
			0,53	22,23	33,97	32,70	35,90
			0,64	16,70	23,90	28,57	27,97
G	10	50	0,42	35,60	45,27	33,07	53,33
			0,53	24,87	34,17	40,37	41,00
			0,64	19,30	26,60	30,83	29,67
H	20	25	0,42	39,13	51,10	46,50	36,47
			0,53	28,80	36,13	40,50	42,30
			0,64	20,20	24,80	32,07	31,47
I	20	50	0,42	41,33	52,50	51,47	52,23
			0,53	27,60	41,63	33,87	46,07
			0,64	21,20	29,80	34,00	38,10

Todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 7, 28, 63 e 91 dias são apresentadas na Tabela A1 (apêndice). A análise de variância da resistência à compressão é apresentada na Tabela 18, onde apresenta-se a significância do efeito isolado de cada uma dos fatores estudados, e das interações entre eles, sobre a variável de resposta.

Tabela 18- ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão em todas as idades.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
CCA	2	1061,5	530,7	31,28	0,000000	Sim
ARC	2	711,0	355,5	20,95	0,000000	Sim
A/AGL	2	16480,4	8240,2	485,60	0,000000	Sim
IDD	3	4793,7	1597,9	94,16	0,000000	Sim
CCA*ARC	4	479,9	120,0	7,07	0,000023	Sim
CCA*A/AGL	4	156,6	39,1	2,31	0,059225	Não
ARC*A/AGL	4	143,4	35,8	2,11	0,080288	Não
CCA*IDD	6	516,8	86,1	5,08	0,000068	Sim
ARC*IDD	6	273,5	45,6	2,69	0,015531	Sim
A/AG*IDD	6	520,6	86,80	5,11	0,000062	Sim
CCA*ARC*A/AGL	8	438,1	54,8	3,23	0,001733	Sim
CCA*ARC*IDD	12	298,2	24,9	1,46	0,139281	Não
CCA*A/AGL*IDD	12	315,7	26,3	1,55	0,108149	Não
ARC*A/AGL*IDD	12	481,3	40,1	2,36	0,007101	Sim
CCA*ARC*A/AGL*IDD	24	597,9	24,9	1,47	0,080068	Não
Erro	216	3665,3	17,0			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; ARC = agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante; IDD= idade.

Através dos resultados da análise apresentados na Tabela 18 é possível visualizar estatisticamente a significância do efeito dos fatores estudados sobre a variável resistência à compressão. Todos os fatores isolados e algumas interações de primeira e segunda ordem apresentaram, a um nível de confiança de 95%, efeito significativo sobre a variável ‘resistência à compressão’, pois apresentam valores de “p” menores que 0,05.

A Figura 33 apresenta o gráfico de médias para o efeito isolado do fator ‘cinza de casca de arroz’ sobre a resistência à compressão, considerando todos os teores de ARC, todas as relações a/agl e todas as idades. A substituição de 10% da cinza de casca de arroz pelo cimento melhora, em média, cerca de 4% a resistência à compressão quando comparados aos concretos sem CCA. No entanto, quando são substituídos 20% de CCA, este valor passa a ser 13% superior em relação aos concretos sem cinza. Isto quer dizer que, conforme o aumento da substituição de CCA, maior são os valores de resistência à compressão axial. A

justificativa deste comportamento é em função do alto índice de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz utilizada neste estudo.

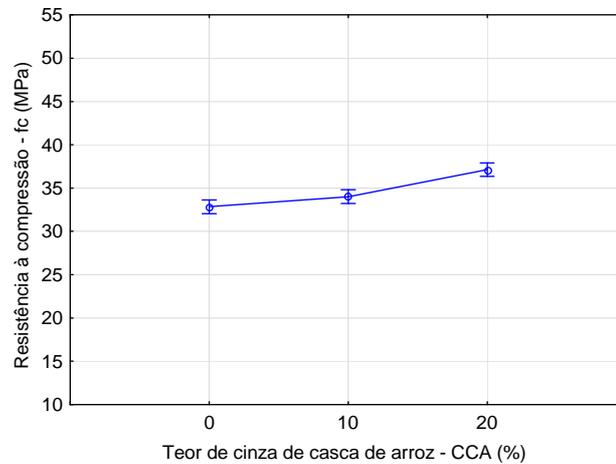


Figura 33 – Efeito isolado da variável “CCA” no comportamento de resistência à compressão axial.

O efeito isolado do fator ‘agregado reciclado de concreto’, em relação ao comportamento da resistência, é apresentado no gráfico de médias da Figura 34. A substituição de 25% agregado graúdo natural pelo de agregado reciclado de concreto exerce um efeito negativo, diminuindo a resistência em cerca de 9%. No entanto, quando são substituídos 50% de agregado natural por ARC, este valor passa a ser menor que 1%, equivalendo-se aos concretos com agregado natural, podendo-se afirmar que tecnicamente a diferença não é significativa.

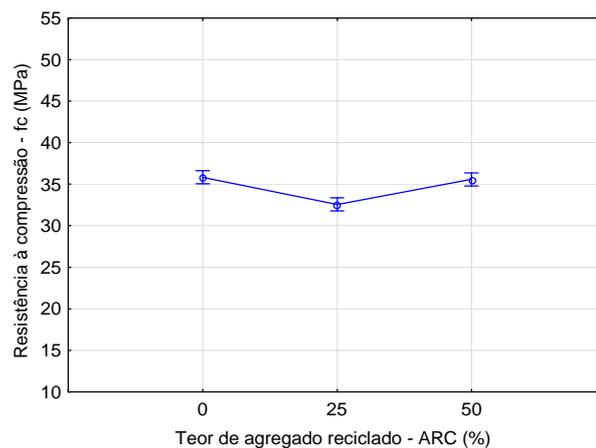


Figura 34 – Efeito isolado da variável “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.

A análise das médias do fator de controle ‘relação água/aglomerante’ indica que o seu efeito isolado aumenta 67% a resistência à compressão quando a relação água/aglomerante diminui de 0,64 para 0,42. Para uma relação a/agl igual a 0,53 esse aumento

em passa a ser de 25% se comparado à relação a/agl 0,64 (Figura 35). Podendo-se concluir que a menor relação a/agl contribui para melhores valores de resistência à compressão axial, como já era esperado.

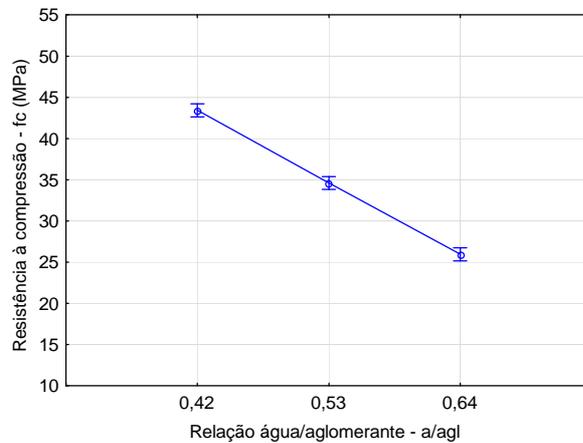


Figura 35 – Efeito isolado da variável “A/AGL” no comportamento de resistência à compressão axial.

As médias do fator ‘idade’ são apresentadas no gráfico da Figura 36, onde também é possível comprovar um comportamento já esperado, ou seja, o aumento da resistência à compressão com o aumento da idade; observando-se uma tendência de estabilização a partir de 28 dias.

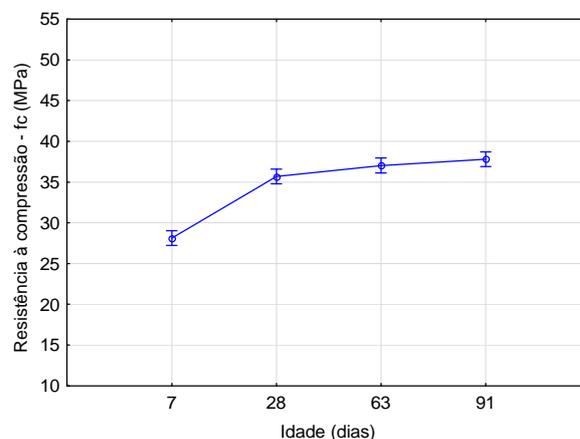


Figura 36 – Efeito isolado da variável “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.

A interação entre o efeito da CCA e do ARC na resistência à compressão pode ser visualizada na Figura 37. O uso de 25% de ARC obtém resultados inferiores se comparados com o uso de 50% de ARC. Para os concretos sem adição de CCA, quando se comparam concretos com 25% de ARC com os concretos com 50% observa-se um aumento médio de 13% com o uso de 50% de ARC. No entanto, ao comparar com os concretos de referência, o emprego de 50% de ARC diminui a resistência em 8%. Para os concretos com 20% de CCA,

o emprego de 50% de ARC aumenta em 7% a resistência quando comparados aos concretos com 20% de CCA e 0% de ARC. Sem CCA este aumento é similar, em torno de 8%. A microscopia eletrônica de varredura pode auxiliar na interpretação dos resultados contendo 50% de ARC e 20% de CCA serem melhores que 25% e 20% de ARC e CCA, respectivamente. Uma boa transição nessa zona auxilia no fechamento dos poros, aumentando a resistência do concreto. Na Figura 38 são apresentadas as médias para o efeito das interações entre a CCA e a IDD sobre a resistência à compressão.

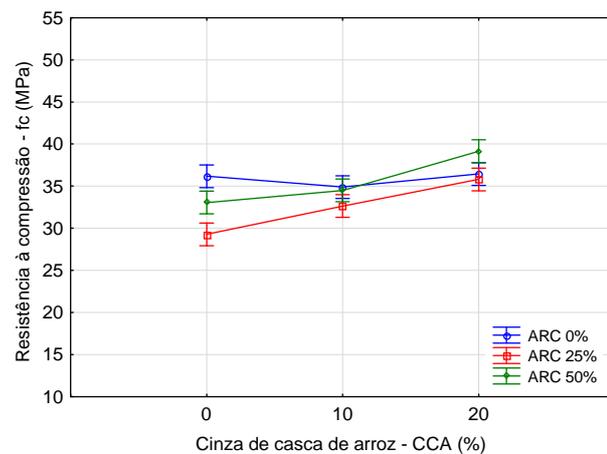


Figura 37 – Interação da variável “CCA” e “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.

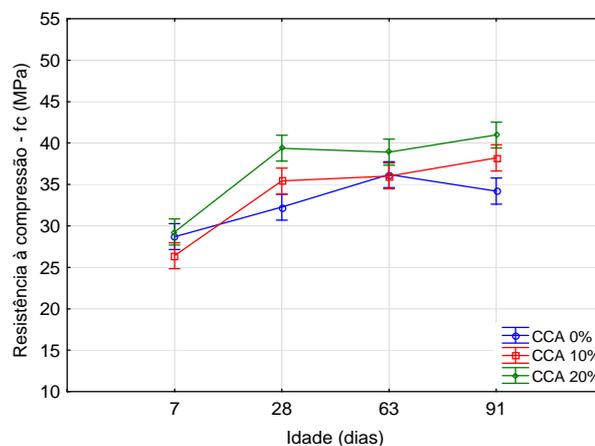


Figura 38 – Interação da variável “CCA” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.

O gráfico de médias da Figura 38 mostra que a substituição de 20% de CCA, resulta em um aumento médio na resistência à compressão de 20% em relação ao concreto sem cinza. O maior crescimento acontece de 7 para 28 dias, cerca de 12% para os concretos sem cinza e 34% para concretos com 10% e 20% de CCA. Em relação ao crescimento total ao longo do tempo, obteve-se um aumento de 19% para concretos sem cinza, 45% para concretos com 10% de CCA e 40% para concretos com 20% de CCA. É importante destacar que a tendência é que os valores se estabilizem após os 28 dias. Valores similares de aumento de

resistência foram obtidos por Krug (2011) ao trabalhar com CCA residual, beneficiada por peneiramento e por moagem, com perda ao fogo média de 7,5% e tamanho médio de partícula de 25 μ m. A Figura 39 apresenta o efeito da interação de primeira ordem entre o fatores A/AGL e IDD sobre a resistência à compressão.

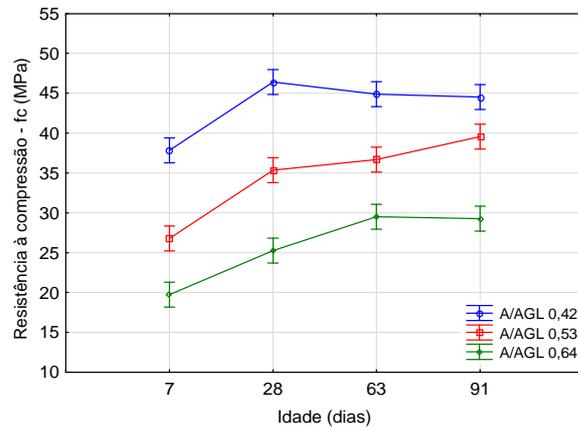


Figura 39 – Interação da variável “A/AGL” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.

A análise das médias apresentadas no gráfico da Figura 39 mostra que os melhores resultados de compressão são observados nas relações a/agl de 0,42. O maior crescimento acontece entre 7 e 28 dias de idade, sendo este aumento de 23% para os concretos com a menor relação a/agl 0,42; 32% para os concretos com relação a/agl de 0,53 e 28% para concretos com relação a/agl de 0,64. Em relação ao crescimento total ao longo do tempo, obteve-se um aumento de 18% para concretos com a menor relação a/agl, 48% para concretos com relação a/agl de 0,53 e para 0,64. A interação de segunda ordem entre a CCA, o ARC e relação a/agl pode ser visualizada na Figura 40.

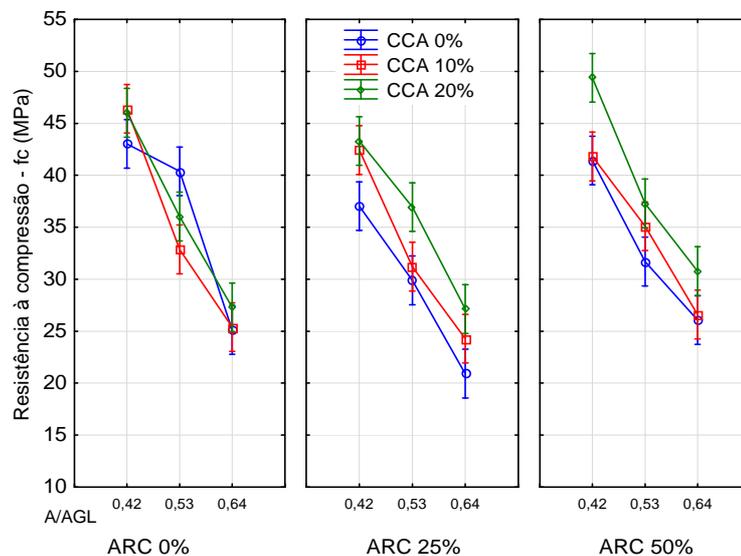


Figura 40 – Interação da variável “CCA”, “ARC” e “A/AGL” em relação à resistência à compressão.

Pela análise dos gráficos de médias da Figura 40 percebe-se, conforme o esperado, que a relação a/agl mais alta resulta em resultados de compressão menores. Em concretos sem ARC, as diferenças não são tecnicamente significativas, pois, para os níveis de relação a/agl 0,42 e 0,64, com e sem emprego de CCA, obteve-se resistências médias na ordem de 45 e 25 MPa respectivamente. Isto significa que os níveis de resistência podem ser mantidos e o consumo de cimento pode ser diminuído em 20%, diminuindo o impacto ambiental do concreto. O comportamento da substituição de cimento por 20% de CCA melhora a resistência, em concretos com 25 e 50% de ARC. Quando se emprega 10% de CCA os concretos com ARC apresentam comportamento próximo ao comportamento dos concretos sem substituição de cinza. Porém, se comparados entre eles, pode-se dizer que os concretos com substituição de agregado natural por 50% de ARC e com 20% de CCA retornam resultados de compressão mais elevados, em média 14%, que os concretos com de 25% de ARC com 20% de CCA.

Nestes casos, o efeito pozolânico da cinza de casca de arroz auxilia no fechamento dos poros existentes na pasta antiga do agregado reciclado, além de haver uma interação na zona de transição entre a pasta nova de cimento e a pasta antiga, conforme micrografias do item 4.1. Kou e Poon (2013) afirmam que o aumento da resistência em concretos com agregado reciclado e adição pozolânica se dá pela melhora da microestrutura na zona intersticial, aumentando a ligação entre o novo ligante e os agregados. Hwang et al. (2013) acreditam que a substituição parcial de cimento por material pozolânico em uma mistura de concreto pode compensar uma redução da resistência à compressão resultante do uso de ARC, com um aumento significativo da resistência obtido a longo prazo.

A interação de segunda ordem entre o ARC, a a/agl e a idade pode ser visualizada na Figura 41. O crescimento ao longo do tempo é visível em todas as combinações de fatores com exceção do concreto com 25% e 50% de ARC e relação a/agl de 0,42. Esta variabilidade observada nestes concretos provavelmente se deve à diferença entre a resistência da matriz (~45 MPa) e a resistência do ARC, que possui f_{ck} de 35 MPa. Ou seja, o ARC apresenta resistência muito inferior à resistência da matriz, fazendo que o efeito da sua inserção seja mais significativo em concretos de resistências superiores à sua resistência.

Werle (2010) também chegou a conclusões similares, observando que as maiores quedas de resistências, quando comparados ao concreto referência ocorreram para os ARC de 18 MPa inseridos em matriz de resistência igual a 35 MPa, enquanto que os concretos de 35

MPa com ARC de resistência 35 e 50 MPa não apresentaram diferença significativa em relação aos concretos sem ARC.

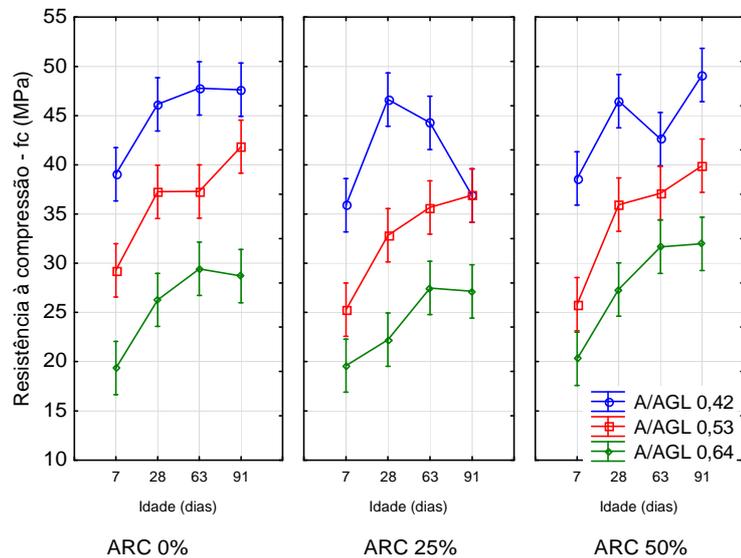


Figura 41 – Interação da variável “ARC”, “A/AGL” e “IDD” no comportamento de resistência à compressão axial.

Em relação à resistência à compressão pode-se concluir que os traços com relação a/agl de 0,42 apresentam os melhores resultados. A substituição de cimento por cinza de casca de arroz aumenta em média 8% a resistência à compressão, sendo que o teor de 20% de cinza retorna um aumento médio de 13% em relação aos concretos sem CCA. A incorporação de 50% de ARC juntamente com percentuais de 10% e 20% de cinza retornam resistências superiores aos concretos com 25% de ARC. O comportamento do concreto ao longo do tempo aumenta até os 63 dias, com um maior crescimento entre os 7 e 28 dias. Após os 28 dias a tendência dos concretos é atingir a estabilidade na evolução da resistência à compressão.

Ainda na análise de resistência à compressão foram ajustadas equações matemáticas para a curva de Abrams para a idade de 28 dias. A Tabela 19 apresenta as equações matemáticas para as curvas ajustadas e os coeficientes de determinação das mesmas. Os diagramas de dosagem para 0, 25 e 50% de ARC são apresentados na Figura 42, na Figura 43 e na Figura 44, respectivamente, e são compostos pelas as curvas de Abrams, pelas curvas da Lei de Molinary e pela a reta de dosagem. O ajuste das curvas de Abrams foi realizado com base nos valores médios de resistência, uma vez que os concretos com ARC apresentam uma variabilidade maior do que os concretos com agregado natural.

Tabela 19 – Equações de ajuste da curva de Abrams, 28 dias.

ARC (%)	CCA (%)	Equação	r ²
0	0	LOG(fc)= 1,8598-0,6694*a/c	0,8813
0	10	LOG(fc)= 2,1472-1,1311*a/c	1
0	20	LOG(fc)= 2,1055-1,0167*a/c	0,9995
25	0	LOG(fc)= 2,0700-1,1948*a/c	0,8535
25	10	LOG(fc)= 2,3684-1,5939*a/c	0,9991
25	20	LOG(fc)= 2,4934-1,7892*a/c	0,9989
50	0	LOG(fc)= 2,1880-1,2372*a/c	0,9385
50	10	LOG(fc)= 1,9954-0,8763*a/c	0,9988
50	20	LOG(fc)= 2,1897-1,1179*a/c	0,9889

Onde: fc=Resistência à compressão axial;
a/c=relação água aglomerante (cimento+cinza volante);

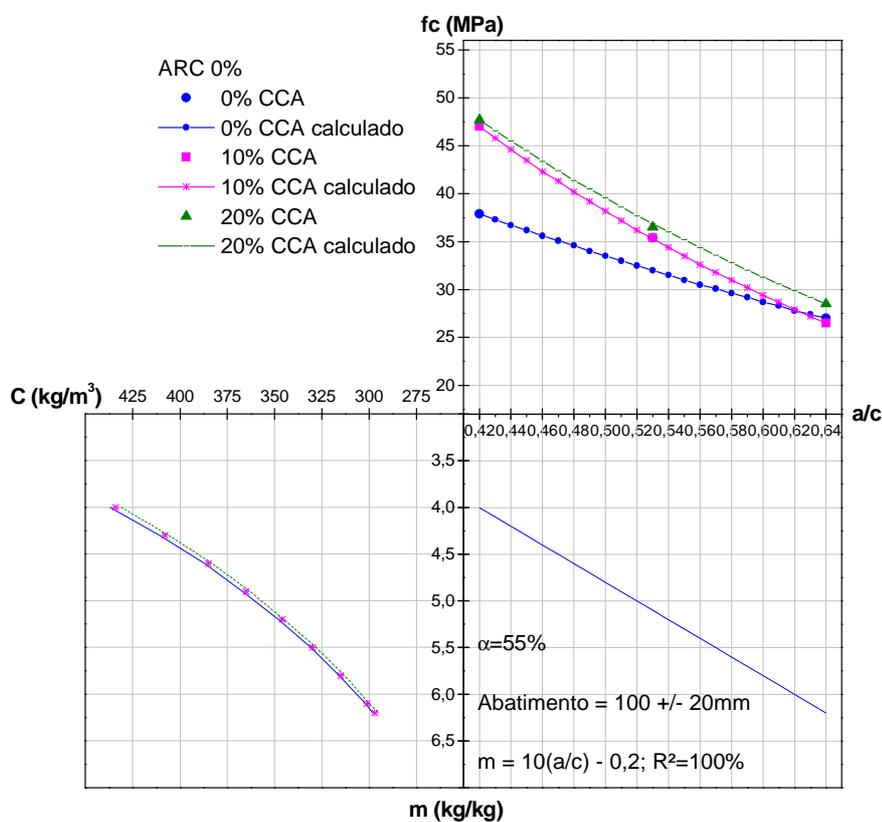


Figura 42 – Diagrama de dosagem 28 dias de concretos sem ARC.

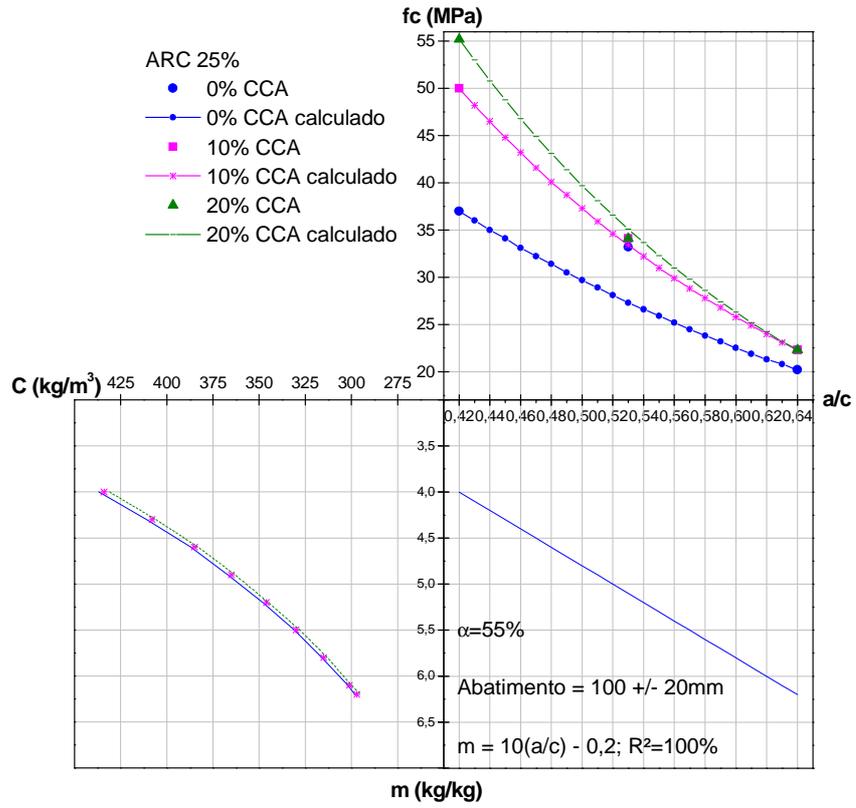


Figura 43 – Diagrama de dosagem para 28 dias de concretos com ARC 25%.

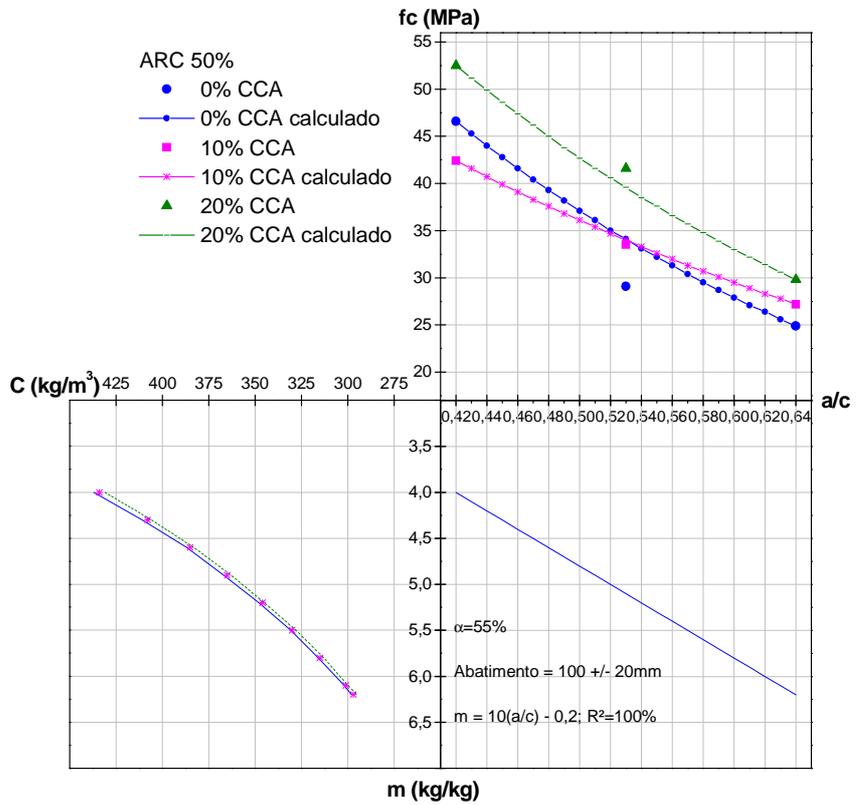


Figura 44 - Diagrama de dosagem para 28 dias de concretos com ARC 50%.

4.3 DURABILIDADE

Neste item, são apresentados os resultados obtidos a partir das propriedades analisadas de durabilidade, sendo elas: absorção de água por capilaridade, penetração de íons cloretos através do método ASTM C1202 e NT Build 492.

Os resultados de absorção de água por capilaridade foram submetidos à análise de variância (ANOVA), enquanto que os resultados dos ensaios acelerados de penetração de íons cloretos foram analisados a partir de uma análise de regressão múltipla não linear, testando-se todos os fatores e seus níveis de controle propostos nesta pesquisa. Foram utilizados gráficos e tabelas para demonstrar os resultados das análises por ANOVA e por regressão.

4.3.1 Absorção de água por capilaridade

Os resultados de absorção de água por capilaridade foram analisados através da análise de variância (ANOVA) considerando o efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas, e das interações entre eles (Tabela 20). As médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água por capilaridade são apresentadas na Tabela A2 (apêndices).

Tabela 20- ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
CCA	2	1,39565	0,69782	290,760	0,000000	Sim
ARC	2	0,01704	0,00852	3,550	0,035609	Sim
A/AGL	2	0,42905	0,21452	89,385	0,000000	Sim
CCA*ARC	4	0,02054	0,00513	2,139	0,088422	Não
CCA*A/AGL	4	0,02833	0,00708	2,951	0,028080	Sim
ARC*A/AGL	4	0,00632	0,00158	0,658	0,623897	Não
CCA*ARC*A/AGL	8	0,0355	0,00444	1,849	0,087781	Não
Erro	54	0,12960	0,00240			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; ARC = agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante; IDD= idade.

Na Tabela 20, é possível verificar a significância dos fatores estudados e das suas interações. Os fatores isolados CCA, ARC e a/agl, no presente trabalho, apresentam efeito significativo sobre a absorção de água a um nível de confiança de 95%. Estes fatores apresentam valores de “p” menores que o nível de significância α igual a 0,05. A interação entre CCA e a/agl também apresenta efeito significativo sobre a propriedade em questão. A Figura 45 apresenta o efeito isolado da cinza de casca de arroz em relação à absorção de água por capilaridade dos concretos.

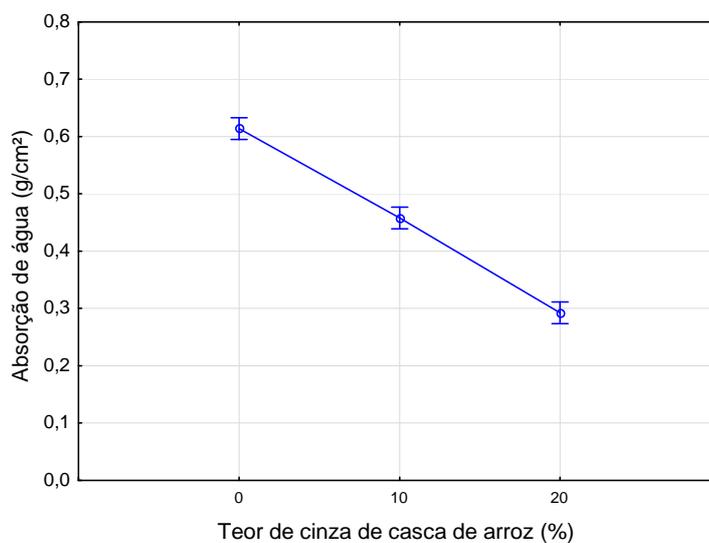


Figura 45 – Efeito isolado da variável “CCA” no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A substituição de cimento por 10% e 20% de cinza de casca de arroz diminui a absorção de água dos concretos em 25% e 52%, respectivamente. Os valores médios de absorção observados para os concretos com 0, 10 e 20% de CCA foram 0,61, 0,46 e 0,29 g/cm², respectivamente.

A cinza de casca de arroz empregada no trabalho possui dimensão média de grãos de 6,22 μm e atividade pozolânica elevada, o que pode auxiliar no fechamento dos poros, tornando os concretos mais compactos e menos porosos e a consequência disto é uma menor absorção de água.

O efeito isolado do ARC na absorção de água é apresentado no gráfico da Figura 46. Obteve-se a média de 0,47; 0,45 e 0,44 respectivamente para os concretos com 0, 25 e 50% de ARC, cujas diferenças não podem tecnicamente ser consideradas significativas, pois as diferenças observadas são menores do que o erro experimental obtido. Ou seja, a maior porosidade dos ARC em comparação com o agregado natural parece não introduzir uma grande diferença de absorção de água. No entanto, deve-se ter cautela ao interpretar este comportamento, salientando-se que estas médias levam em conta todos os resultados de absorção somente em função do ARC, contabilizando assim, os dados de concretos com CCA.

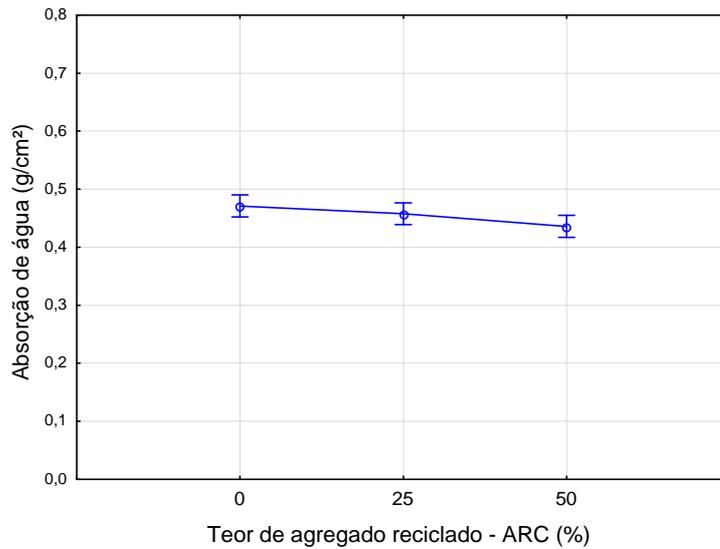


Figura 46 – Efeito isolado da variável “ARC” no ensaio de absorção de água por capilaridade.

O comportamento da absorção de água dos concretos em função do efeito isolado do fator relação a/agl é diretamente proporcional, quanto maior é a relação a/agl, maior é a absorção de água. As médias apresentadas no gráfico da Figura 47 indicam aumento de aproximadamente 0,18 g/cm² na absorção de água quando se passa do nível de relação a/agl 0,42 para 0,64, significando um aumento de 49%. A maior porosidade dos concretos com relação a/agl mais elevada é responsável por esta diferença.

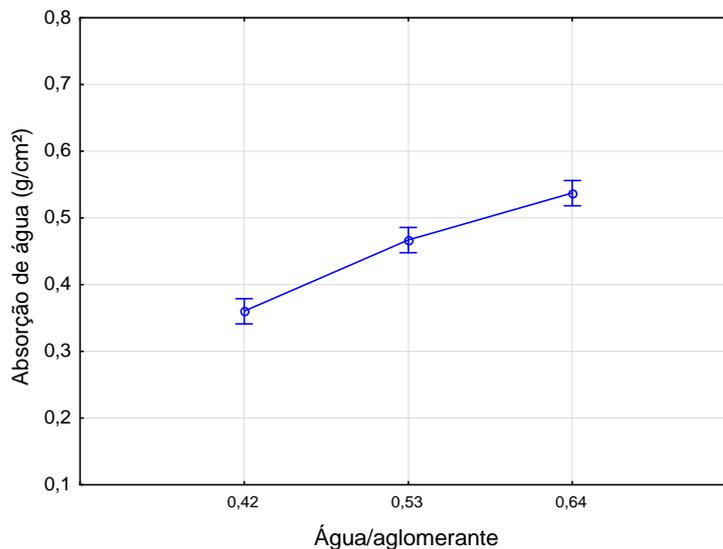


Figura 47 – Efeito isolado da variável “A/AGL” no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A análise estatística indica que a interação entre os efeitos dos fatores a/agl e teor de CCA é fortemente significativa, conforme indicado na Tabela 20. No gráfico da Figura 48 pode-se verificar que para a relação a/agl 0,64 ocorre uma diminuição média de 0,30 g/cm²,

ou 33%, na absorção quando emprega-se 20% de CCA. Quando esta análise é feita para a relação água/aglomerante 0,42 esta diminuição é de 0,35 g/cm², ou 45%. Em uma estrutura de poros que já é mais refinada a expectativa é de que o desempenho do emprego de CCA seja melhor, como o observado.

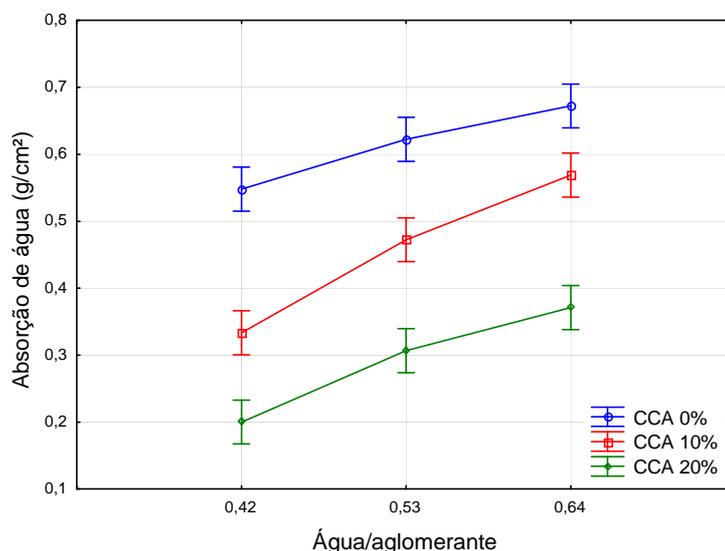


Figura 48 – Interação da variável “CCA” e “A/AGL” no comportamento de absorção de água.

Apesar da interação entre CCA e ARC não ser significativa a um nível de confiança de 95%, o valor ‘p’ de 0,088422 indica que para um nível de significância α de 0,10 esta interação seria significativa. A inserção de 50% de ARC em concretos isentos de CCA acarretou num aumento de absorção de água de 4%. No entanto, quando se emprega 20% de CCA em concretos com ARC obtém-se uma redução na absorção de água na ordem de 13%, quando comparado ao concreto sem ARC. Ou seja, a presença de CCA parece reduzir o efeito da maior porosidade do ARC sobre a absorção de água, o que pode ser explicado pelas colocações realizadas na análise das micrografias da Figura 31 e da Figura 32.

Os resultados dos concretos com ARC e sem CCA seguem a mesma tendência de comportamento dos dados da literatura, pois alguns autores afirmam que quanto maior o percentual de substituição de agregado natural por ARC e quanto maior sua relação a/agl, maior será a absorção de água (SOBERÓN, 2002; WERLE 2010; TROIAN, 2010; EVANGELISTA e BRITO, 2010; KOU e POON, 2012; SOMNA, 2012; THOMAS et al, 2013). Pela ANOVA dos efeitos dos fatores isolados, do presente trabalho, encontra-se a mesma conclusão para a relação a/agl, mas quando se refere ao uso de ARC, os resultados demonstram que o aumento da absorção é muito baixo ao se aumentar o teor de ARC, sendo no máximo de 10%, o que pode ser explicado pelo fato de que estas médias contemplam

também os concretos com ARC. A análise da interação entre ARC e CCA explica este comportamento.

Através deste ensaio pode-se concluir que o emprego de CCA pode reduzir os efeitos negativos do emprego de ARC no que diz respeito à absorção de água. Neste trabalho as menores médias de absorção de água foram observadas nos concretos contendo 50% ARC, em substituição ao agregado graúdo natural e 20% de CCA, em substituição ao cimento.

4.3.2 Penetração de Íons Cloreto – ASTM C1202

Com os resultados das correntes ao longo do tempo dos ensaios segundo a norma ASTM C 1202, a carga total passante foi calculada (Equação 1), que caracteriza a resistência à penetração de íons cloreto do concreto. Os dados das correntes observados nos ensaios estão na Tabela A3 do apêndice.

O modelo proposto por regressão, para análise da carga total passante pelo método ASTM C1202 é apresentado na Equação 5.

$$Q = b_0 + b_3 \times CCA + b_{11} \times A/AGL^2 + b_{33} \times CCA^2 + b_{12} \times A/AGL \times ARC + b_{13} \times A/AGL \times CCA + b_{23} \times ARC \times CCA \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Q= carga total passante pelo método ASTM C1202 (Coulombs);

CCA = teor de cinza de casca de arroz (0, 10 e 20%);

A/AGL = relação água/aglomerante (0,42; 0,53 e 0,64);

ARC = teor de agregado reciclado agregado reciclado de concreto (0, 25 e 50%).

Os resultados para o modelo da análise por regressão são apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21.

Tabela 21 - Anova do modelo para penetração de íons cloreto através do método ASTM C1202.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	7	1,20E+09	1,72E+08	358,72	0,0000
Resíduos	74	3,55E+07	479303		
Total	81	1,24E+09			
Total Corrigido	80	4,74E+08			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 22 - Parâmetros das variáveis analisadas para carga total passante através do método ASTM C1202.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	P	Efeito significativo
CONSTANTE	b0	2131,46	397,241	5,365659637	0,00000	
CCA	b3	-185,958	66,0099	-2,817122886	0,00262	Sim
A/AGL*A/AGL	b11	12041,8	1296,94	9,284778016	0,00000	Sim
CCA*CCA	b33	10,3165	1,63181	6,312120835	0,00000	Sim
A/AGL*ARC	b12	28,105	10,8575	2,588533272	0,00511	Sim
A/AGL*CCA	b13	-469,363	104,616	-4,486531697	0,00000	Sim
ARC*CCA	b23	-1,13184	0,452128	-2,50336188	0,00648	Sim

Onde: CCA= cinza de casca de arroz; ARC=agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante.

O ajuste do modelo (Equação 5) resultou em um valor de r^2 de 0,92, indicando que o modelo explica 92% (Figura 49) dos valores observados para carga total passante (ASTM C1202) e o valor 'p' do modelo menor que 0,01 indicando que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. O efeito isolado das variáveis ARC e a/agl, neste modelo estatístico, não foi significativo, porém observou-se uma interação entre eles com o fator CCA. O coeficiente de determinação de 92% é considerado satisfatório, tendo em vista a variabilidade inerente ao experimento e aos concretos com ARC.

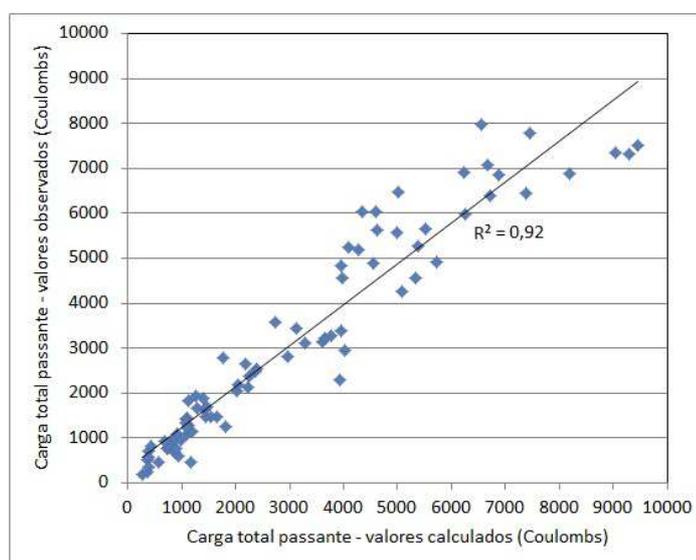


Figura 49 –Relação entre os valores calculados e os valores observados para carga total passante.

O modelo adotado para a carga total passante, que representa a resistência à penetração de íons cloreto pelo do método ASTM C1202, é apresentado na Equação 6.

$$ASTM = 2131,46 - 185,958 * CCA + 12041,8 * AAG^2 + 10,3165 * CCA^2 + 28,105 * AAG * ARC - 469,363 * AAG * CCA - 1,13184 * ARC * CCA$$

Equação 6

Onde:

Q= carga total passante pelo método ASTM C1202 (Coulombs);

CCA = teor de cinza de casca de arroz (0, 10 e 20%);

A/AGL = relação água/aglomerante (0,42; 0,53 e 0,64);

ARC = teor de agregado reciclado agregado reciclado de concreto (0, 25 e 50%).

As curvas que representam os valores calculados pelo modelo obtido e os valores observados para carga total passante são apresentados na Figura 50, na Figura 51 e na Figura 52.

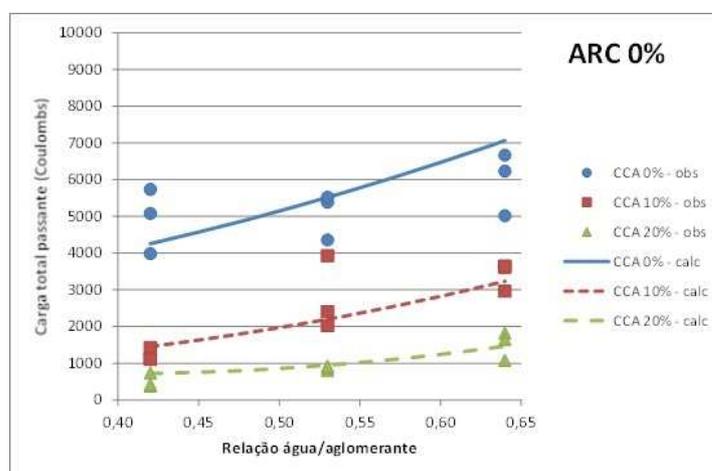


Figura 50 – Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 0.

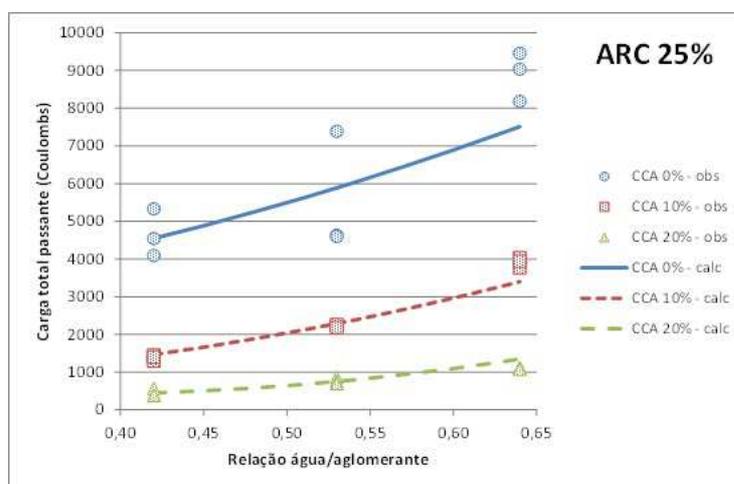


Figura 51 – Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 25%.

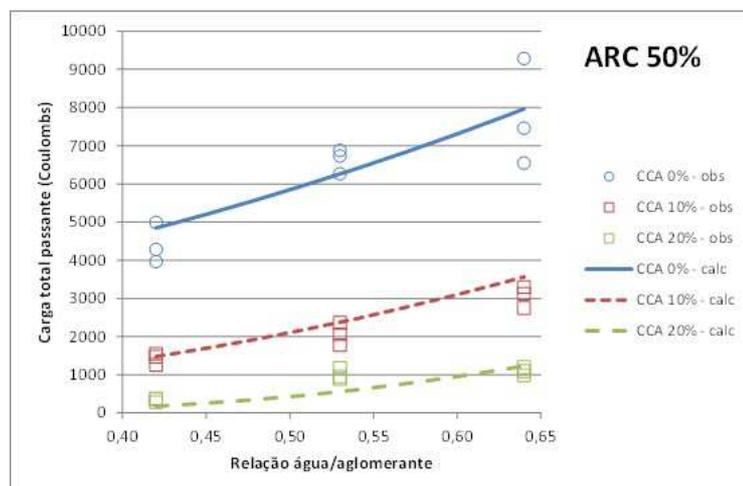


Figura 52 –Valores observados e calculados para carga total passante em concretos com ARC 50%.

A tendência geral observada no comportamento dos concretos para este ensaio é uma diminuição da carga total passante conforme o aumento da relação a/agl. O percentual crescente de CCA nos concretos aumenta a sua resistência à penetração de íons cloreto. Os resultados são coerentes com os resultados do estudo de Poon e Kou (2006), onde o aumento no teor de agregado reciclado diminuiu a resistência à penetração de íons cloreto e a substituição de 25% de cimento por cinza volante melhora a resistência à penetração de íons cloreto.

Observando os dados do gráfico na Figura 50, percebe-se que os concretos com 20% de substituição de cimento por CCA, comparados com os concretos sem cinza, possuem uma carga passante cerca de 83% menor com a/agl 0,42 e 0,53 e cerca de 80% menor quando a relação a/agl passa a ser de 0,64. Já os concretos com substituição de cimento por 10% de CCA, comparados com os concretos sem cinza, tem uma carga passante menor em 64%, 60% e 55%, para as relações a/agl de 0,42, 0,53, 0,64, respectivamente.

A Figura 51 mostra o resultado dos concretos com 25% de ARC. O percentual de CCA de 20% melhora a resistência à penetração de íons cloreto em aproximadamente 85% para todas as relação a/agl, comparados aos concretos sem cinza. Quando o percentual de substituição do cimento pela cinza é de 10% as propriedades melhoram cerca de 65%, 60% e 55%, para as relações a/agl de 0,42, 0,53, 0,64, respectivamente.

O gráfico da Figura 52 demonstra a diminuição da carga passante em concretos com 20% de CCA, em torno de 95%, quando comparados com o concreto sem cinza e relação a/agl de 0,42, 90% com relação a/agl de 0,53 e 85% com relação a/agl de 0,64. Para concretos

com 10% CCA a melhora é de 67%, 61% e 56%, para as relações a/agl de 0,42, 0,53, 0,64, respectivamente, quando comparados com o concreto sem cinza.

Os resultados com 50% ARC, obtiveram uma carga total passante menor que os concretos com 25% de ARC, em concretos que incorporam 10% e 20% de cinza. Este fato pode ser explicado pela melhor interação na zona de transição (ZT) do ARC com a pasta de cimento contendo CCA. Segundo Limbachiya, Meddash e Ouchagour (2012), nos resultados obtidos em seu estudo, a incorporação de mais de 30% de ARC diminui a resistência à penetração de íons cloreto, porém o uso de cinza volante no concreto melhora significativamente a resistência ao ingresso destes íons.

Medina, Frías e Rojas (2012), obtiveram um resultado semelhante, quando utilizaram ARC em conjunto com material pozolânico. Segundo eles, a melhora do comportamento mecânico e de durabilidade pode ser explicada pela existência de uma ZT mais compacta e menos porosa, observada nas análises efetuadas.

Corroborando com os resultados de absorção de água obtidos neste programa experimental, pode-se concluir que a utilização de 20% de CCA em substituição ao cimento e 50% de ARC em substituição ao agregado graúdo natural, resultam nos melhores resultados quando se analisa a carga total passante, através do método ASTM C1202.

4.3.3 Penetração de Íons Cloreto – NT Build 492

Os resultados dos coeficientes de migração de cloretos obtidos pelos cálculos, segundo a norma NT Build 492, que caracteriza a resistência à penetração de íons cloreto do concreto podem ser observados na Tabela A4 do apêndice. O modelo proposto para análise estatística da penetração de cloretos pelo método NT Build 492 é apresentado na Equação 7.

$$D_{nssm} = b_0 + b_1 \times A/AGL + b_2 \times (1/(1-ARC)) + b_{13} \times A/AGL^2 \times CCA + b_{23} \times \frac{1}{(1-ARC)} \times (CCA^{0,5}) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

D_{nssm} = coef. de migração de íons cloretos pelo método NT Build 492 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

CCA = cinza de casca de arroz;

A/AGL = relação água/aglomerante

ARC = agregado reciclado de concreto.

A Tabela 23 apresenta a ANOVA para análise por regressão para migração de íons cloreto e a Tabela 24 apresenta as estimativas dos coeficientes para cada um dos fatores que apresentam efeito significativo no comportamento da variável de resposta em questão.

Tabela 23 - Anova do modelo para penetração de íons cloreto através do método NT Build 492.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	5	13346,2	2669,23000	108,9606	0,0000
Resíduos	76	1861,79	24,4972		
Total	81	15207,9			
Total Corrigido	80	7782,29			

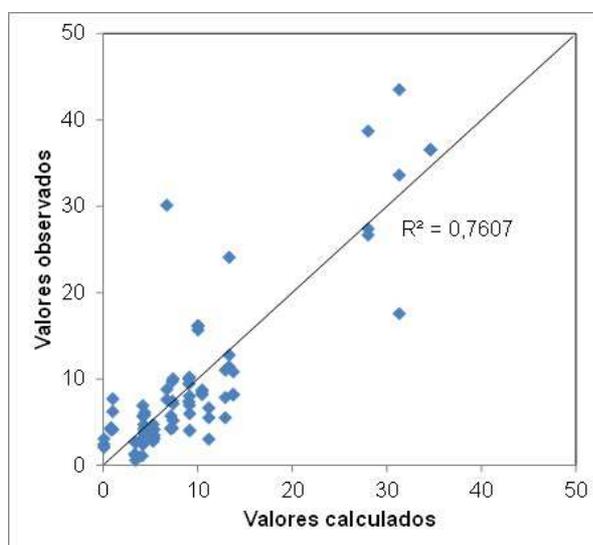
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 24 - Parâmetro das variáveis analisadas para penetração de íons cloreto através do método NT Build 492.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p	Efeito significativo
CONSTANTE	b0	-4,98457	3,38299	-1,473421	0,0723569	
A/AGL	b1	29,9676	6,69495	4,47615	0,0000130	Sim
ARC	b2	20,4255	1,86992	10,92319	0,0000000	Sim
A/AGL *CCA	b13	-1,21214	0,255422	-4,745637	0,0000047	Sim
ARC*CCA	b23	-5,28744	0,585067	-9,12218	0,0000000	Sim

Onde: CCA= cinza de casca de arroz; ARC=agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante.

A regressão do modelo (Equação 7) resultou um valor de r^2 de 0,76, indicando que o modelo explica 76,07% (Figura 53) dos valores observados para a variável de resposta 'coeficiente de migração de íons cloreto' pelo método NT Build 492 e o valor 'p' do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação r^2 de 76%, embora inferior ao encontrado no método anterior, pode ser considerado razoável, considerando a variabilidade no comportamento dos concretos, devido ao emprego de ARC, e a variabilidade do experimento, em função de características próprias do método de execução.

**Figura 53 – Relação entre os valores calculados e os valores observados para o ensaio da NT Build 492.**

O modelo resultante para o coeficiente de migração é apresentado na Equação 8.

$$D_{nssm} = -4,98457 + 29,9676 \cdot AAG + 20,4255 \cdot (1/(1-ARC)) - 1,21214 \cdot AAG^2 \cdot CCA - 5,28744 \cdot (1/(1-ARC)) \cdot (CCA^{0,5}) + b_0 + b_1 \times A/AGL + b_2 \times (1/(1-ARC)) + b_{13} \times A/AGL \times CCA + b_{23} \times (1/(1-ARC)) \times (CCA^{0,5}) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

D_{nssm} = coef. de migração de íons cloreto pelo método NT Build 492 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

CCA = cinza de casca de arroz;

A/AGL = relação água/aglomerante

ARC = agregado reciclado de concreto.

As curvas que representam os valores calculados pelo modelo obtido e os valores observados para o coeficiente de migração são apresentados na Figura 54, Figura 55 e na Figura 56.

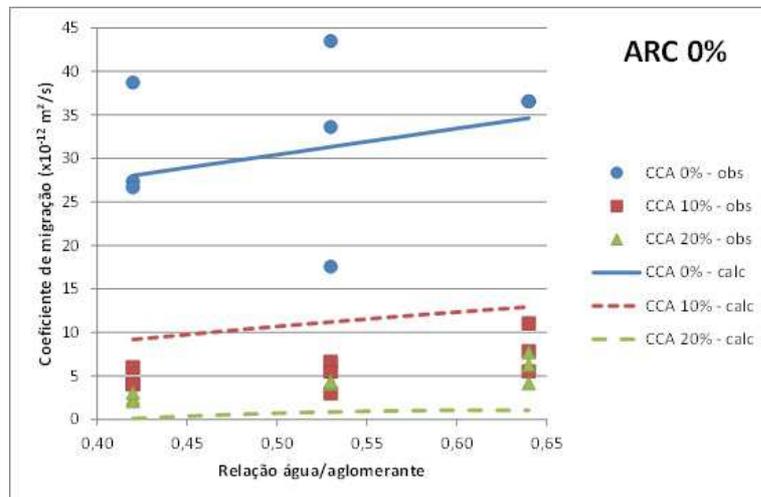


Figura 54 –Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 0%.

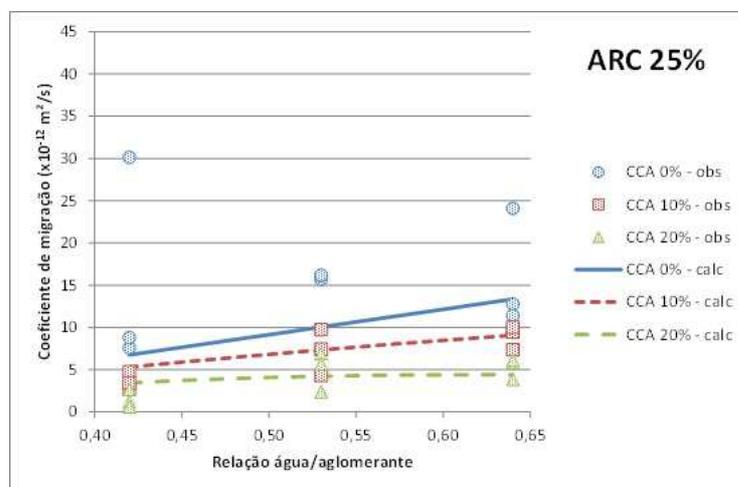


Figura 55 - Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 25%.

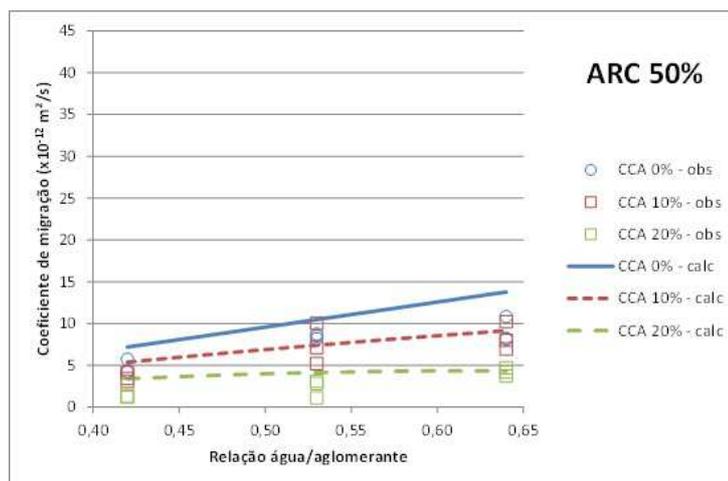


Figura 56 – Valores observados e calculados para o coeficiente de migração em concretos com ARC 50%.

Em todos os traços estudados, fica claro que a relação a/agl tem influência direta sobre a penetrabilidade de íons cloreto. Os concretos com as menores relações a/agl possuem um coeficiente de migração mais baixo quando comparados aos concretos com a relação a/agl 0,64. Os concretos com substituição de 20% do cimento por cinza de casca de arroz sempre retornaram coeficientes de difusão menores do que os concretos com 10% de CCA. Estas afirmações podem ser comprovadas visualizando a Figura 54, Figura 55 e Figura 56.

O gráfico da Figura 54, apresenta os valores observados e calculados para os concretos sem a utilização de agregado reciclado. Nesta condição, o concreto com relação a/agl de 0,42 apresenta um coeficiente de migração alto, 92% maior quando comparado ao concreto com 20% de cinza. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a CCA empregada apresenta uma elevada reatividade aos 28 dias, com Índice de Atividade Pozolânica de 132,5%. Além disso, a finura das partículas, com a dimensão média de partícula de 6,22 μm , pode exercer um efeito fíler favorecendo o preenchimento dos poros e assim reduzindo a penetração de íons cloreto.

Para Zerbino, Giaccio e Isaia (2011), o beneficiamento da cinza de casca de arroz alcança resultados de propriedades de durabilidade superiores ao concreto de referência, quando se utiliza uma substituição do cimento por CCA em teor de 15%. Já Ganeasan, Rajagopal e Thangavel (2008), comprovaram que a substituição de 30% do cimento pelo CCA reduz cerca de 28% o coeficiente de difusão de cloretos, sendo que este valor pode aumentar dependendo do tipo de cimento utilizado e da relação a/agl.

Os resultados obtidos com ARC 50% e CCA 20% são em torno de 53% melhores para concreto com relação a/agl de 0,53 e 20% melhores para concretos com relação a/agl de

0,64, quando comparados aos concretos com ARC 25% e CCA 20%. Estes resultados podem estar relacionados com a interação obtida pela zona de transição entre a pasta velha do ARC e a pasta nova contendo CCA. Provavelmente a maior porcentagem de ARC da mistura em conjunto com um maior percentual de cinza, permite que esta pozolana seja aderida pelos agregadores reciclados em uma fração maior, formando uma espécie de selagem, preenchendo os poros e compactando a mistura. Esta hipótese de comportamento é defendida pelo estudo de Thomas et al. (2013) e de Medina, Frías e Rojas (2012), onde os autores acreditam que os concretos com agregados reciclados tem a interface entre concreto novo e velho melhorada em função da presença de pozolanas, tornando os concretos com agregado reciclado mais compactos, melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade.

A diferença em relação à ASTM C1202 é que os resultados de 10 e 20% de CCA ficaram muito próximos, ou seja, segundo este método, aparentemente a substituição de 10 e 20% de cimento pela pozolana em estudo traz uma contribuição significativa para melhorar a resistência à penetração de íons cloreto. Essas diferenças provavelmente são causadas pela diferença de potencial aplicada para cada método, pelo tempo de ensaio que é diferente e por eventuais distorções na execução do método NT Build 492. Assim como na ASTM C1202, os melhores resultados obtidos foram com a substituição de 50% de ARC e 20% de CCA.\

4.3.4 Relação entre resistência à compressão e os ensaios de penetração de íons cloreto

Neste item, são analisados e comparados resultados dos dois métodos de ensaio aplicados no programa experimental relativo à resistência à penetração de íons cloreto com os resultados de resistência à compressão. Também neste item, visou-se a classificação desses concretos conforme a sua maior ou menor resistência à penetração de íons cloreto.

Para a norma da ASTM C1202, a classificação se baseia na Tabela 3, enquanto que para o método da NT Build 492, a classificação é sugerida na Tabela 5.

Os concretos com 10% e 20% de CCA, sem agregado reciclado possuem resistência à penetração de cloretos melhores que o concreto referência, conforme pode ser observado na Figura 57. Quando se substitui 25 e 50% de agregado natural pelo agregado reciclado, percebe-se uma melhora em relação à resistência de penetração de cloretos nos concretos que possuem 10 e 20% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz em relação àqueles sem adição (Figura 57). Com relação à resistência à compressão, os concretos com relação a/agl menores apresentam sempre maiores resistências à compressão e são mais resistentes à penetração de cloretos. Essa tendência é observada em todos os concretos.

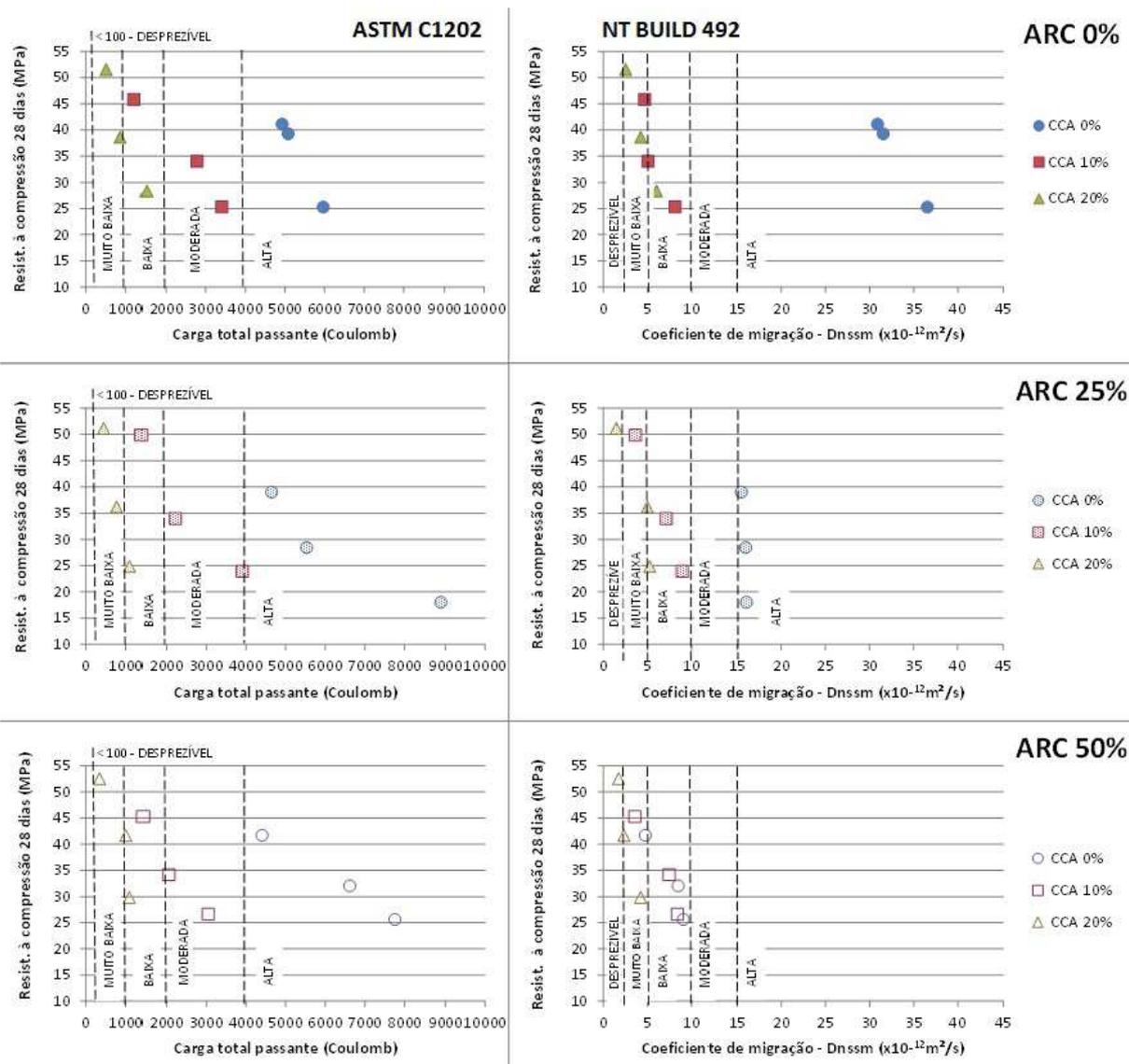


Figura 57 – Comparativo entre as médias dos resultados de resistência à compressão x ensaios acelerados de migração de cloretos (ASTM C1202 e NT Build 492) em concretos com 0%, 25% e 50% de ARC.

É importante observar, que somente uma análise de resistência à compressão não garante a durabilidade dos concretos. Para exemplificar, pode-se tomar os resultados de resistência à compressão na faixa situada entre 35 e 40 MPa. Nesta faixa de resistência os concretos com 0% de CCA e de ARC apresentam alta penetrabilidade, em ambos os métodos, e aos e empregar 20% de CCA a classificação do concreto desloca-se para ‘muito baixa’. Ainda para o mesmo nível de resistência, os concretos com 25% de ARC e 0% de CCA tem a penetração de cloretos classificada como alta em ambos os métodos, melhorando o comportamento para baixa/muito baixa penetração de íons cloreto ao empregar uma relação a/agl mais baixa e usando 20% de CCA.

A Tabela 25 apresenta a classificação obtida quanto à penetração de íons cloreto para os concretos organizados por Classe de Resistência.

Tabela 25 - Classificação dos concretos quanto à resistência à compressão e à penetração de íons cloreto.

Classe de Resistência	CCA (%)	ARC (%)	a/c	Média f_{c28} (MPa)	Média D_{nss} ($\times 10^{-12} \text{xm}^2/\text{s}$)	Classificação NT Build 492	Média Q (Coulombs)	Classificação ASTM C1202
<C25	0	25	0,64	18,0	16,08	Alta	8886	Alta
	10	25	0,64	23,9	8,94	Baixa	3913	Moderada
	20	25	0,64	24,8	5,26	Baixa	1099	Baixa
C25	0	0	0,64	25,2	36,55	Alta	5970	Alta
	10	0	0,64	25,3	8,12	Baixa	3406	Baixa
	0	50	0,64	25,6	9,06	Baixa	7763	Alta
	10	50	0,64	26,6	8,39	Baixa	3053	Baixa
	20	0	0,64	28,3	6,01	Baixa	1518	Baixa
	0	25	0,53	28,4	15,98	Alta	5535	Alta
	20	50	0,64	29,8	4,21	Muito baixa	1092	Baixa
C30	0	50	0,53	32,0	8,47	Baixa	6622	Alta
	10	0	0,53	34,0	5,05	Baixa	2783	Moderada
	10	25	0,53	34,0	7,14	Baixa	2224	Moderada
	10	50	0,53	34,2	7,44	Baixa	2063	Alta
C35	20	25	0,53	36,1	4,98	Muito Baixa	771	Muito Baixa
	20	0	0,53	38,6	4,24	Muito baixa	867	Muito baixa
	0	25	0,42	39,0	15,50	Alta	4652	Alta
	0	0	0,53	39,3	31,54	Alta	5084	Alta
C40	0	0	0,42	41,1	30,90	Alta	4930	Alta
	20	50	0,53	41,6	2,34	Desprezível	1004	Baixa
	0	50	0,42	41,7	4,74	Muito baixa	4410	Alta
C45	10	50	0,42	45,3	3,56	Muito baixa	1426	Baixa
	10	0	0,42	45,8	4,67	Muito baixa	1215	Baixa
	10	25	0,42	49,8	3,63	Muito Baixa	1380	Baixa
C50	20	25	0,42	51,1	1,47	Desprezível	444	Desprezível
	20	0	0,42	51,5	2,51	Muito Baixa	513	Baixa
	20	50	0,42	52,5	1,73	Muito baixa	340	Desprezível

Assim como os resultados obtidos nos ensaios deste trabalho, vários autores relatam o aumento maior na resistência à compressão e o aumento maior da durabilidade em concreto contendo ARC quando associados com o uso de algum tipo de pozolana (ANN et al., 2008; LI, XIAO e ZHOU, 2009; MEDINA, FRÍAS e ROJAS, 2012; HWANG et al., 2013).

A diferença de classificação dos concretos com 50% de ARC, sem CCA e com 10% de CCA, observada entre os dois métodos de penetração, pode ser atribuída por uma combinação de dois aspectos:

- O primeiro deles é o fato de que ao se empregar 50% de ARC, é introduzida mais pasta de cimento nos concretos, proporcionando um maior teor de produtos hidratados (aluminatos) capazes de se combinar com os íons cloreto, diminuindo a profundidade de penetração dos cloretos.
- O segundo aspecto refere-se aos métodos de ensaios, pois a ASTM C1202 parece medir a movimentação iônica e a introdução de ARC aumenta a

porosidade do material facilitando esta movimentação; já o método NT Build 492 simula uma “difusão acelerada” por uma diferença de potencial (migração) e, ao se determinar a profundidade de penetração dos íons cloreto por indicador químico, pode-se estar medindo, de forma relativamente mais direta, a contribuição que a pasta presente no ARC pode oferecer para a fixação de íons cloreto diminuindo a movimentação dos íons e a sua profundidade de penetração.

No entanto, a confirmação desta segunda hipótese relativa ao método NT Build 492 somente pode ser validada por uma investigação da concentração de íons cloreto extraídos em várias profundidades da amostra e por uma investigação da microestrutura.

A melhora na resistência dos concretos à penetração de íons cloreto pode ser devida, além da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio do ARC, ao efeito microfíler das partículas de CCA, cuja dimensão média é de 6, 22 μm . Este efeito associado pode melhorar a zona de interface com a pasta de cimento, o que está em acordo com os resultados obtidos pelo estudo de Chindaprasirt et al. (2007). Além disso, a substituição de cimento por cinza pode diminuir o diâmetro dos poros no ARC, reduzindo a porosidade total deste agregado reciclado (POON e KOU, 2006).

4.3.5 Avaliação dos métodos de ensaio de resistência à penetração de íons cloreto

Conforme a Figura 57, o método NT Build 492, classifica os concretos como de melhor resistência à penetração de cloretos, se comparados à classificação dos concretos submetidos ao método da ASTM C1202.

A NT Build 492 não apresentou nenhum concreto classificado na faixa de “moderada” resistência à penetração de íons cloreto, enquanto que a ASTM C1202 apresentou concretos classificados em todos os níveis de resistência à penetração de íons cloreto. Os concretos com 20% de cinza possuem uma classificação similar para ambos os testes de penetração acelerada de íons cloretos, enquanto que concretos sem cinza e com 10% de cinza resultam em classificações bem diferentes.

No entanto, o comportamento geral dos ensaios é o mesmo: quanto maior o percentual de CCA, menor a penetração de íons cloretos. O mesmo não acontece com o percentual de ARC, pois os concretos com 50% de ARC superaram os resultados com

concretos de 25% de ARC. Os melhores resultados obtidos foram os concretos com 50% de ARC e 20% de CCA, em ambos os ensaios.

É evidente que, mesmo em concretos de mesmo traço, há uma diferença entre os métodos para classificar os materiais quanto à resistência à penetração de íons cloreto. Essas diferenças são provavelmente causadas pela diferença de potencial aplicada em cada método e pela forma de medição e coleta de dados de cada um. Além disso, o tempo de execução dos ensaios é diferente.

No caso da NT Build 492, a pré-classificação do concreto, conforme a sua corrente inicial, já oferece uma pré-classificação da qualidade do concreto nos momentos iniciais do experimento, o que pode auxiliar na interpretação dos resultados.

Já a norma da ASTM C1202 fixa a tensão de 60 V ($\pm 1V$) para todos ensaios; tornando este método muito agressivo. Este é um dos pontos mais discutidos no meio científico, conforme apresentado na revisão de literatura. Se os concretos são diferentes, a tensão aplicada deveria ser diferente também, como propõe o método NT Build 492.

A Tabela 26 apresenta uma comparação entre os dois métodos de ensaio de penetração de íons cloreto, nas condições de condução dos experimentos desta pesquisa. É importante ressaltar que a avaliação foi elaborada a partir do contexto existente no laboratório onde foram conduzidos os ensaios, com todas as particularidades relativas à infraestrutura e de acesso a materiais e equipamentos auxiliares.

Tabela 26 – Avaliação dos métodos acelerados de penetração de íons cloretos.

Descrição	ASTM C1202	NT Build 492	Observações
Preparação das soluções utilizadas nos experimentos	NaCl (3%) – 300 ml em água destilada NaOH (0,3N) – 300 ml em água destilada	NaCl (10%) – 7 litros em água potável NaOH (0,3N) – 300ml em água destilada ou deionizada	Para a preparação da solução de NaCl é mais fácil utilizar a água potável do que a água destilada, porém a quantidade da NT Build 492 é bem superior ao da ASTM C1202, o que demandou grandes volumes de armazenamento. Em relação ao NaOH, ambos foram preparados da mesma forma.
Condicionamento das amostras	Utilização de água potável fervida resfriada	Utilização de água destilada ou deionizada saturada com cal	A utilização da água fervida resfriada se mostrou um procedimento demorado e perigoso, visto que é preciso grande quantidade de água para submergir as amostras, ou seja, o recipiente deve ser grande, podendo causar acidentes. Por esse motivo, adotou-se para a ASTM C1202 o mesmo condicionamento utilizado pela NT Build 492
Procedimento de ensaio	Montagem feita com as meias células, fixadas com selante aos corpos de prova impermeabilizados.	Montagem com canos de pvc, fita <i>Silver Tape</i> , suporte inclinado, espaçador, utilização de chapas e ligações elétricas	ASTM C1202: Tempo despendido para a colagem da amostra às células e de aplicação do selante. Dificuldade de fixação das meias células. Se não vedadas de maneira correta, pode ocorrer vazamento. NT Build 492: Impermeabilização das amostras na luva de pvc é mais fácil. Dificuldade de abastecimento da solução de cloreto de sódio em função do volume. Dificuldades nas ligações elétricas. Ajuda de laboratorista da engenharia elétrica. Ambos os ensaios demoraram 24 horas para secagem da impermeabilização dos espécimes
Monitoramento do ensaio	Monitoramento realizado a cada 30 minutos	Monitoramento da temperatura inicial e final e dos coeficientes de migração no início e no término do ensaio	A aquisição de dados da norma NT Build 492 é mais simples do que a norma da ASTM C1202; a menos que seja empregada uma interface de aquisição de dados para que o monitoramento seja automatizado.
Monitoramento das temperaturas durante o ensaio	A medição da temperatura no início, durante e após o término do ensaio é opcional	Deve ser monitorada a temperatura inicial e final da célula contendo solução anódica	ASTM C1202: Dependendo o concreto, as temperaturas do ensaio são muito elevadas, como o caso do traço contendo 50% de ARC e 0% de CCA, a temperatura no final do ensaio chegou a 90°C. Conforme a norma, as altas temperaturas só ocorrem para concretos altamente penetráveis. NT Build 492: A temperatura inicial variava de 20°C à 21°C, enquanto que a temperatura final não passou dos 31°C, mantendo uma média em torno de 26°C.
Cálculo e Interpretação dos resultados	Resultado obtido é aplicado diretamente na fórmula encontrada na norma	Resultado obtido é acrescido de outros dados para ter o resultado final	No caso da NT Build 492, é necessário calcular a medida da profundidade de penetração de cloretos, através da aspersão de AgNO ₃ , isso demanda muito tempo. A média foi realizada em um software. Após todas as informações são calculadas por uma fórmula, até que se tenha o resultado final. O resultado da ASTM C1202 não calcula um coeficiente, mas a carga total passante, o que não dá a informação de penetração e sim da resistividade do concreto.
Dados	Somente corrente passante Cálculo da carga total passante	Tensão inicial, corrente inicial, profundidade de penetração dos íons cloreto, corrente final. Cálculo do coeficiente de migração.	A ASTM C1202 a carga total em função da corrente registrada não fornece um retrato da movimentação de íons cloreto no concreto. No NT Build 492 é possível verificar a profundidade de penetração dos íons cloreto, ao final do ensaio, pela aspersão de nitrato de prata. Realmente se mede a penetração do íon cloreto.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais deste trabalho, conforme os objetivos propostos.

A avaliação da durabilidade de concretos utilizando cinza de casca de arroz associado ao agregado reciclado de concreto possui um caráter inovador na pesquisa científica. Sendo assim, os resultados obtidos são válidos para a compreensão do comportamento desses novos concretos. Na sequência, são apresentadas as conclusões finais que respondem aos objetivos propostos, circunscritas às condições de estudo deste trabalho.

Quanto à influência da substituição de agregado graúdo natural por, pode-se considerar que:

Para a **Resistência à compressão** dos concretos com substituição de agregado graúdo natural por ARC sem CCA, obteve-se resultados de resistência à compressão inferiores se comparados ao concreto referência. Entretanto, avaliando somente a influência do fator ‘teor de ARC’, os resultados obtidos, considerando todas as idades e relações água/aglomerante estudados, os concretos com 50% de ARC obtiveram resistência maior do que os concretos com 25% de ARC. Em relação ao efeito isolado do fator ‘idade’, percebe-se um aumento da resistência à compressão, em média, de 27% dos 7 aos 28 dias. No período de 28 a 63 dias há um aumento de 4% na resistência à compressão, enquanto que a evolução da resistência de 63 para 91 dias é de apenas 2%; ou seja, há uma tendência de estabilização após os 28 dias;

A **Absorção de água** em concretos sem incorporação de CCA com emprego de 50% de ARC aumenta em 4%. Quanto maior for a relação a/agl, maior será a absorção de água do concreto;

A resistência à penetração de íons cloreto **ASTM C 1202** diminui conforme o aumento da relação a/agl. Os concretos com 25 e 50% de ARC, sem CCA, retornaram resultados de carga total passante muito próximos, com diferenças médias na ordem de 4%. Quando comparados ao concreto referência, ambos concretos com ARC possuem menor resistência à penetração de íons cloreto, na ordem de 50%, o que era esperado em função da maior porosidade;

Nos testes de penetração de íons cloreto pela **NT Build 492**, os concretos com agregado natural e sem CCA retornaram coeficientes de migração mais elevados que os

demais concretos, inclusive, em média, maiores, que aqueles sem CCA e com ARC. Os concretos com as menores relações a/agl possuem um coeficiente de migração mais baixo.

Quanto à influência da substituição de cimento por CCA, a consideração final a ser feita é:

Que na **Resistência à compressão**, a análise do efeito isolado deste fator, indica que as resistências mais elevadas são obtidas para os concretos com 20% de CCA. Quando se comparam os concretos sem CCA com os concretos com 20% de CCA, o incremento de resistência à compressão foi de aproximadamente 10% para 7 dias, 38% para 28 dias e 20% para 91 dias;

Para a **Absorção de água**, que a CCA reduz a absorção de água nos concretos. Quando se substitui o cimento por 10% de CCA a diminuição da absorção de água é de 43% para uma relação a/agl 0,42; 10% para uma relação a/agl 0,53 e 6% para uma relação a/agl 0,64. Quando a substituição de cimento por CCA passa a ser 20% esse percentual diminui ainda mais, sendo 63, 41 e 38% para a relação a/agl 0,42, 0,53 e 0,64, respectivamente;

Nos testes pela **ASTM C 1202**, que quanto maior o teor de substituição de cimento por CCA maior é a resistência à penetração de íons cloreto. Nos concretos com agregado natural, o emprego da cinza faz com que a classificação dos concretos em relação à penetração de íons cloreto, dependendo da relação a/agl, passe de alta para moderada a baixa quando emprega-se 10% de CCA; e de alta para baixa a muito baixa, quando o teor de substituição de cimento por CCA é de 20%;

Que, para os resultados do método **NT Build 492**, o comportamento dos concretos com a substituição do cimento por cinza de casca de arroz em teores de 20% sempre retornaram um coeficiente de difusão menor do que os concretos com 10% de CCA;

Quanto ao efeito da interação entre agregados reciclados de concreto com a cinza de casca de arroz pode-se considerar que:

Em relação à **Resistência à compressão**, quando é empregada CCA nos concretos contendo ARC observa-se que, considerando todas as idades e todas as relações água/aglomerante, a média dos concretos com 50% de ARC apresentaram 6 e 9% de aumento na resistência com, respectivamente, 10 e 20% de CCA, quando comparados aos concretos com 25% de ARC com 10 e 20% de CCA. O maior valor médio de resistência à compressão aos 28 dias foi observado para a combinação a/agl 0,42-ARC 50%-CCA 20%, seguida pela combinação a/agl 0,24-ARC 0%-CCA 20%. O emprego combinado de ARC com CCA pode

tornar equivalente ou até mesmo melhorar o desempenho da resistência à compressão quando comparados aos concretos sem ARC. Provavelmente este comportamento se deve à melhora da interface concreto novo-ARC quando se emprega CCA, e que, conforme revisão da literatura, também foi observada por outros autores quando empregaram cinza volante e ARC;

Nas análises de **Absorção de água** foi observado que ocorre uma diminuição de 13% na absorção de água de concretos com 20% de CCA e ARC quando comparados aos concretos de referência. Ou seja, a presença de CCA parece contribuir para melhorar o desempenho dos concretos com ARC frente à absorção de água, provavelmente em função da interação da pasta do novo concreto com a pasta do ARC. Esta interação, com efeitos positivos para a diminuição da porosidade do ARC, pode ocorrer tanto por uma provável reação pozolânica da CCA com os produtos de hidratação da pasta do ARC, quanto pelo efeito microfíler no preenchimento dos poros do ARC, melhorando as condições de porosidade do mesmo;

Para os testes de penetração de cloretos conduzidos pela **ASTM C 1202**, o emprego de 10% de CCA nos concretos com 25% de ARC levam a uma melhoria na resistência à penetração de íons cloreto de 65, 60 e 55%, respectivamente para as relações a/agl 0,42, 0,53, e 0,64. Já o emprego de 20% de CCA em substituição ao cimento nos mesmos concretos, com 25% de ARC diminui em média 85% a carga total passante. Os concretos com 50% de ARC tiveram uma carga passante menor que os concretos com 25% de ARC, para ambos teores de CCA. A diminuição da carga total passante nos concretos com 50% de ARC e relação a/agl 0,42, 0,53 e 0,64 com 10% de CCA é na ordem de 67, 61 e 56% respectivamente, e 95, 90 e 85%, para as mesmas relações água/aglomerante com 20% de CCA. A melhor composição na análise da penetração de íons cloreto é aquela que emprega 50% de ARC e 20% de CCA, superando, inclusive que a composição de agregado natural com 20% de CCA;

Na penetração de íons cloreto testada pela **NT Build 492**, o emprego de CCA em concretos com 25% de ARC melhora os resultados, em média, de 55 a 69% com a incorporação de teores de 10 e 20%, quando comparados aos concretos sem CCA. Em concretos com 50% de ARC, o emprego de 10% de CCA reduz o coeficiente de migração, em média, 12% e 64% quando o teor de CCA passa para 20%. Da mesma forma que para as demais variáveis estudadas, este resultado pode estar relacionado à interação obtida entre a pasta do ARC e a pasta contendo CCA do novo concreto, melhorando a zona de transição. Acompanhando a tendência de comportamento observada no estudo das demais propriedades

do concreto os melhores resultados obtidos para os concretos produzidos com a substituição do agregado natural por 50% de ARC e do cimento por 20% de CCA.

Quanto à relação entre resistência à compressão e penetração de íons cloretos dos concretos estudados, pode-se considerar que concretos de mesma classe de resistência podem apresentar classificações quanto à penetração de íons cloreto bem distintas. Logo, apenas uma análise quanto à resistência à compressão não é um indicativo de previsão da durabilidade dos concretos;

Quanto à avaliação dos métodos de transporte de íons cloreto para fins de análise da durabilidade de concretos com agregado reciclado de concreto, pode-se considerar que as diferenças entre as classificações de ambos os ensaios de penetração de íons cloreto são provavelmente causadas pela diferença de potencial aplicada em cada método e pelo tempo de ensaio que é diferente e por eventuais distorções na execução do método NT Build 492. No entanto, o comportamento geral dos ensaios é o mesmo: quanto maior o percentual de CCA, menor a penetração de íons cloretos. O mesmo não acontece com o percentual de ARC, pois os concretos com 50% de ARC superaram os resultados com concretos de 25% de ARC. Os melhores resultados obtidos foram os concretos com 50% de ARC e 20% de CCA, em ambos os ensaios.

Por fim, visto que os concretos produzidos com a utilização de 50% de ARC, associado com 20% de CCA obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão, absorção de água e resistência à penetração de íons cloretos pelos dois métodos de ensaio, nas condições deste trabalho. Assim, pode-se afirmar que a cinza de casca de arroz influencia positivamente para melhorar o desempenho dos concretos com agregados reciclados de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T-259: **Standard Method of Test for Resistance of Concrete Chloride Ion Penetration**. Washington D. C., 2002.

AASHTO T-277: **Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Washington D. C., 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-07: Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Philadelphia, 2007.

ANDRADE, A. C. de. **Método para quantificação das perdas de materiais em obras de construção de edifícios: superestrutura e alvenaria**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Tradução e adaptação: Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C.; WHITING, D. A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration. **Materials and Structures**, v. 29, p. 476-484, 1996.

ANDRADE, J. J. de O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

ANGEL, J. D. M. et al. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p.1110-1114, 2009.

ANN, K. Y. et al. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. **Waste Management**, v. 28, p. 993-999, 2008.

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

ARAGÃO, H.G. **Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição**. 2007. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2007.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da Influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós

graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Sistemas construtivos a base de cimento**. Uma contribuição efetiva para sustentabilidade da construção civil. 2009. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2010/02/folder_sustentabilidade_A4.pdf>. Acesso em: 20 de out. de 2011.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53: 2006**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8953: 2009**. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653: 2012**. Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575-1: 2013**. Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738: 2003**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12655: 2006**. Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118: 2003**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2012.

BERNDT, M. L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2606-2613, 2009.

BIODISELBR. **Casca de Arroz: Energia**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/energia/residuo/energia-do-arroz.htm>>. Acesso em: 06 de Fev. de 2013.

BIRNIN-YAURIA, U.A; GLASSER, F.P Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: its solid solutions and their role in chloride binding. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 1713–1723, 1998.

BJEGOVIC, D.; STIRMER, N.; SERDAR, M. Ecological Aspects of Concrete Production. In: **Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2010, Ancona, Italy.

BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE - **ACI 318 – 05** AND COMMENTARY – ACI 318R – 05. American Concrete Institute, 2005.

BUTLER, L.; WEST, J. S; TIGHE, S.L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1037–1049, 2011.

BUTTLER, A. M.; CORRÊA, M. R. S. Desenvolvimento de unidades de alvenaria estrutural produzidas com agregados reciclados de concreto. **Cadernos de Engenharia de Estrutura**, São Carlos, v.8, n.32, p. 9-12, 2006.

CALHEIRO, D. **Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como coproduto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade no Concreto**. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Efecto de la aplicación de campos eléctricos sobre las interacciones entre los iones cloruro y la matriz de cemento. **Cerámica y Vidrio**, v.43, n.2, p. 565-568, 2004.

CECCONELLO, V. **Análise da retração em concretos moldados com agregados graúdos de concreto e cinza de casca de arroz**. 2011. 48p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013 – Em desenvolvimento.

CDIAC – CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER. **Global Fossil-Fue CO₂ Emissions**. 2011. Disponível em: <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2008.html>. Acesso em: 05 Jan. 2013.

CEZAR, D. de S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

CHENG, Y.K; KARMIADJU, I.W.Z.; HUANG, W.H. The Effect of Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient on the Chloride Ingress in Concrete. In: **Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011 International Conference on**, p. 7098-7101, 2011.

CHINDAPRASIRT, P. et al. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 356–361, 2007.

DÍAZ, B.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M.C. Study of the chloride diffusion in mortar: A new method of determining diffusion coefficients based on impedance measurements. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 237-245, 2006.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. de. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 9-14, 2010.

FARIAS, R. F. dos S.; TEZUKA, Y. Corrosão das Armaduras do Concreto: Mecanismos e Controle. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil**, São Paulo, p. 1-21, 1992.

FEDUMENTI, M.B.; KULAKOWSKI, M. P. **Manual de montagem do sistema de experimento NT Build 492**. NT BUILD 492. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, , 2013. 11p.

FELDMAN, R. F. et al. Investigation of the rapid chloride permeability test. **ACI Materials Journal**, v.91, n.3, p. 246-255, 1994.

FELDMAN, R. F.; JR. L. R. P.; CHAN, G. Rapid chlorid permeability testo n blendes cement and other concrets: correlations between charge, initial current and conductivity. **Construction and Bulding Materials**, v. 13, p. 149-154, 1999.

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim Técnico BT/PCC/121, 31p, 1993.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das Armaduras de Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 903-931, 2011.

FORMOSO, C. T. et al. Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n.4, 2002.

GANEASAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1675–1683, 2008.

GASTALDINI, A. L. G. et al. Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, p. 176–180, 2007.

GIVI, A. N. et al. Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review. **Journal of American Science**, v. 6, n.3, p. 157- 165, 2010.

GONZÁLEZ, J.A., FELIU, S., RODRIGUEZ, P., RAMIREZ, E., ALONSO, C., ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**. v.29, jan-feb, p. 40-46, 1996.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231f. Teses (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1993.

HELENE, P. R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo, v.1, n.2, p.45-57, 1997.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concreto**. 2001. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

HORSAKULTHAI, V.; PHIUVANNA, S.; KAENBUD, W. Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 54-60, 2011.

HWANG, J. P. et al. Enhancing the Durability Properties of Concrete Containing Recycled Aggregate by the Use of Pozzolanic Materials. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, p. 155-163, 2013.

IRGA – INSTITUTO RIO GRANDENSE DE ARROZ. **Sílica da casca de arroz garante resistência e durabilidade na construção civil**. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=1&id=638>>. Acesso em: 06 de Fev. 2013.

ISAIA, G. C. A água no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 311-346, 2011.

JINPING, C.; XUESONG, Z. The study of durability of the concrete structure. In: **E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on** , p.1-4, 7-9 Nov. 2010.

JUAN, de M. S; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 872-877, 2009.

KIELING, A. G. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2009.

KOU, S.; POON, C.S.. Compressive Strength, Pore Size Distribution and Chloride-ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Class-F Fly Ash. **Journal of Wuhan University of Technology**, v. 21, n.4, 2006.

KOU, S.C.; POON, C.S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

KOU, S.C.; POON, C.S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement & Concrete Composites**, article in press, 2013.

KRUG, L.F. **Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos**. 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

KULAKOWSKI, M.P. **Associação de agregado reciclado de concreto com cinza de casca de arroz na produção de concretos**. 2011. 40f. Projeto de pesquisa aprovado no do Edital PRONEM/FAPERGS/CNPq n. 003/2011 - Programa de Apoio a Núcleos Emergentes.

LI, J; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1287–1291, 2009.

LIMA, J. A. R. de. **Avaliação das conseqüências da produção de concreto no brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 129 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, SP, 2010.

LIMA, M. B. **Avaliação da capacidade de proteção contra a corrosão da armadura induzida por cloretos de concretos com adições minerais e inibidores de corrosão**. 2009. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Programa de Pós-graduação Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

LIMBACHIYA, M.; MEDDASH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 439-449, 2012.

LINDVALL, A. Chloride ingress data from Field and laboratory exposure – Influence of salinity and temperature. **Cement & Concrete Composites**, v.29, p. 88-93, 2007.

LIU, X.; CHIA, K. S.; ZHANG, M. H. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 335-343, 2011.

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

MAHMUD, H.B.; HAMID, N. A. A.; CHIN, K. Y. Production of high strength concrete incorporating an agricultural waste - rice husk ash. In: 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE 2010), 2010.

MAPA – MINISTÉRIO DA CULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Arroz**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>>. Acesso em: 06 de Fev. 2013.

MARRIAGA, J. L.; GONZALEZ, J.; CLAISSE, P. Simulation of the concrete chloride NT build-492 migration test. Numerical Modeling – **Strategies for Sustainable Concrete Structures**, Aix-en-Provence, France, 2012.

MC-BAUCHEMIE. **Fichas de Segurança**. Disponível em: <<http://www.mc-bauchemie.com.br/datasheets.aspx>>. Acesso em: 15 de Jan. 2013.

MEDEIROS, M. H. F. de. ANDRADE, J. J. de O.; HELENE, P..Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 773-808, 2011.

MEDINA, C. FRÍAS, M. ROJAS, M.I.S de. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 112–118, 2012.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 573p.

MEIRA, G.R. et al. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 427–435, 2010.

MEIRA, L.R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. 2009. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

MCT - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. 2005. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/25441.html>>. Acesso em: 05 Jan. 2013.

MUTHADHI, A.; KOTHANDARAMAN, S. Optimum production conditions for reactive husk ash. **Materials and Structures**, v.43, p. 1303-1315, 2010.

McGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1239-1248, 1999.

NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O.E. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In: **Second International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading**, v. 2, p. 1193–1198, 1998.

NORMA PORTUGUESA – **NP EN 206-1: 2007** – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Caparica, Portugal, 2007.

NT BUILD 492 - NORDTEST METHOD – **Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments**. Nordtest, Espoo, Finland, 1999.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 179–185, 2002.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; TARRAS, A. El. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete research**, v. 11, p. 395-406, 1981.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/agl, da temperatura e do tempo de cura**. 2001. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia da Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RICE HUSK ASH. **Application of Rice Husk Ash**. Disponível em: <<http://www.ricehuskash.com/application.htm>>. Acesso em: 31 de Out. 2011.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 32, p. 163 – 173, 1999.

SALTA, M. M.; GONÇALVES, A. Métodos de caracterização da resistência dos betões em ambientes agressivos. In: **Seminário: Prevenção da Corrosão em estruturas de betão armado**, LNEC, Lisboa, 1997.

SALTA, M. M. Resistência dos betões à penetração de cloretos. Previsão do tempo de iniciação da corrosão nas estruturas. In: **6º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas, Betão Estrutural 1996, Lisboa**, 1996.

SARASWATHY, V.; SONG. H. W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1779-1784, 2007.

SARTORI, B.R.C. **Propriedades de concretos com adição de cinza de casca de arroz e agregado reciclado de concreto, dando ênfase à carbonatação**. 2012. 55p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013 – Em desenvolvimento.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, 2004.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Rice Husk Ash**. In.: Supplementary Cementing Materials. Engineering Materials Series. v. 37, p. 1-287, 2011.

SILVA, T. J. da. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 809-847, 2011.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, v.31, p. 2352-2360, 2011.

SIQUEIRA, H. C., **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno ativados quimicamente**. 2008. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. Rio de Janeiro: SNIC, 2011. 55p. Disponível em: < http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2011-12_web.pdf>. Acesso em: 07 Fev 2013.

SOBERÓN, J. M. V. G. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v.32, p. 1301 -1311, 2002.

SOMNA, R. et al. Effect of the Water to Binder Ratio and Ground Fly Ash on Properties of Recycled Aggregate Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, p. 16-22, 2012.

SOUTSOS, M. N.; TANG, K. K.; MILLARD, S.G. Use of Recycled Demolition Aggregate in Precast Concrete Products. In: **Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2010, Ancona, Itália.

SOUZA, U.E.L. **Como reduzir perdas nos canteiros: Manual de gestão do consumo de materiais na construção civil**. Ed. Pini, São Paulo, 2005. 128 p.

SOUZA, U.E.L. et al. **O custo do desperdício de materiais nos canteiros de obras. Qualidade na construção**. São Paulo: Sinduscon, Ano III, n. 21, p. 64-67, 1999.

SPIESZ, P.; BALLARI, M. M.; BROUWERS, H. J. H. RCM: A new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free- and bound-chloride concentrations. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 293-304, 2012.

SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. P. Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1072-1082, 2012.

STANISH, K. D., HOOTON, R. D, THOMAS, M. D. A. **Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. FHWA Contract DTFH61, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1997.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1163-1167, 2009.

TALERO, R. Synergic effect of Friedel's salt from pozzolan and from OPC co-precipitating in a chloride solution. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 164-180, 2012.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1195-1203, 2005.

TANGCHIRAPAT, W. et al. Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1812-1819, 2008.

TENG, S.; LIM, T.Y.D.; DIVSHOLI, B.S. Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 875-881, 2013.

THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054-1065, 2013.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469p, 1982.

US-EIA – UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Overview data for Brazil: Carbon Dioxide Emissions**. Disponível em: <<http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=BR#cde>>. Acesso em: 07 Fev 2013..

VIVAS, E.; BOYD, A.; HAMILTON, H. R. **Permeability of Concrete – Comparison of Conductivity And Diffusion Methods**. University of Florida – Department of Civil & Coastal Engineering, Gainesville, Florida, 2007.

WERLE, A.P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G. ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 371–378, 2011.

ZHUO, Z.; FENG, X.; DAWANG, L. Stochastic durability analysis of pré-stressed concrete structure under marine environment. **In: Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on** , p.765-767, 26-28 June 2010.

APÊNDICES

Tabela A1 - Resultados de compressão axial para todas idades, em MPa.

Traço	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	Média 7 dias	Média 28 dias	Média 63 dias	Média 91 dias
A	0	0	0,42	37,5	37,9	45,2	47,1	37,1	41,1	47,0	46,9
			0,42	36,9	44,6	47,8	45,0				
			0,42	36,9	40,8	47,9	48,7				
A	0	0	0,53	35,2	35,4	38,8	47,1	35,6	39,3	41,8	44,8
			0,53	35,3	41,4	44,4	40,1				
			0,53	36,4	41,0	42,2	47,2				
A	0	0	0,64	20,2	27,0	26,3	26,9	20,7	25,2	27,3	27,2
			0,64	21,1	24,3	26,2	28,2				
			0,64	20,9	24,4	29,4	26,6				
B	10	0	0,42	42,1	47,0	51,1	50,1	41,6	45,8	51,9	46,3
			0,42	41,0	43,4	55,3	37,1				
			0,42	41,6	47,0	49,4	51,7				
B	10	0	0,53	25,7	35,4	25,6	38,5	25,0	34,0	32,8	39,7
			0,53	23,5	33,1	36,4	40,3				
			0,53	25,7	33,4	36,5	40,3				
B	10	0	0,64	17,3	26,5	31,3	21,6	17,8	25,3	31,0	27,4
			0,64	18,1	22,8	31,5	31,2				
			0,64	18,1	26,6	30,2	29,5				
C	20	0	0,42	40,2	47,7	43,9	49,2	38,5	51,5	44,4	49,7
			0,42	34,2	50,3	47,8	44,4				
			0,42	41,0	56,6	41,5	55,4				
C	20	0	0,53	27,3	36,5	32,3	42,2	27,2	38,6	37,3	41,0
			0,53	25,9	37,3	34,6	38,3				
			0,53	28,5	41,9	44,9	42,6				
C	20	0	0,64	20,0	28,5	31,4	30,3	19,4	28,3	30,0	31,4
			0,64	18,5	29,6	29,1	31,8				
			0,64	19,8	26,8	29,5	32,2				
D	0	25	0,42	34,8	37,0	43,5	40,6	34,0	39,0	43,5	31,6
			0,42	33,0	37,9	40,8	17,0				
			0,42	34,2	42,1	46,1	37,3				
D	0	25	0,53	24,1	33,2	33,7	34,8	24,8	28,4	33,8	32,5
			0,53	24,5	22,2	33,9	32,3				
			0,53	25,8	29,9	33,8	30,5				
D	0	25	0,64	15,9	20,2	20,3	18,2	21,9	18,0	21,8	22,0
			0,64	23,2	20,5	18,4	23,5				
			0,64	26,5	13,3	26,8	24,3				
E	0	50	0,42	42,4	46,6	56,4	42,4	38,9	41,7	43,3	41,8
			0,42	38,0	36,6	43,9	36,9				
			0,42	36,3	41,8	29,6	46,1				
E	0	50	0,53	25,6	29,1	35,4	36,7	25,0	32,0	37,1	32,7
			0,53	25,1	33,3	39,6	29,1				
			0,53	24,3	33,7	36,3	32,2				
E	0	50	0,64	17,9	24,9	29,4	36,0	20,3	25,6	30,2	28,2
			0,64	22,9	25,0	30,6	25,4				
			0,64	20,2	26,9	30,5	23,1				
F	10	25	0,42	35,3	50,0	45,9	39,9	34,6	49,8	42,8	42,5
			0,42	34,7	46,9	30,2	43,2				
			0,42	33,7	52,6	52,4	44,4				
F	10	25	0,53	22,7	34,1	22,8	34,8	22,2	34,0	32,7	35,9
			0,53	22,1	36,2	40,7	35,3				
			0,53	21,9	31,6	34,6	37,6				
F	10	25	0,64	15,8	22,3	28,1	26,5	16,7	23,9	28,6	28,0
			0,64	17,0	23,4	28,7	29,8				
			0,64	17,3	26,0	28,9	27,6				
G	10	50	0,42	34,5	42,4	22,5	53,4	35,6	45,3	33,1	53,3
			0,42	33,5	50,8	32,1	53,7				
			0,42	38,8	42,6	44,6	52,9				
G	10	50	0,53	22,8	33,5	42,8	41,5	24,9	34,2	40,4	41,0
			0,53	27,1	35,8	39,9	41,3				
			0,53	24,7	33,2	38,4	40,2				
G	10	50	0,64	17,9	27,2	32,2	28,1	19,3	26,6	30,8	29,7
			0,64	20,4	26,9	30,6	30,2				
			0,64	19,6	25,7	29,7	30,7				
H	20	25	0,42	37,5	55,2	44,9	40,7	39,1	51,1	46,5	36,5
			0,42	39,4	44,4	42,2	44,1				
			0,42	40,5	53,7	52,4	24,6				
H	20	25	0,53	29,3	34,1	42,7	40,9	28,8	36,1	40,5	42,3
			0,53	28,6	40,6	35,5	42,4				
			0,53	28,5	33,7	43,3	43,6				
H	20	25	0,64	20,7	22,3	30,9	36,3	20,2	24,8	32,1	31,5
			0,64	20,6	24,3	32,1	30,3				
			0,64	19,3	27,8	33,2	27,8				
I	20	50	0,42	40,3	50,7	54,9	61,4	41,3	52,5	51,5	52,2
			0,42	42,2	56,6	50,3	49,2				
			0,42	41,5	50,2	49,2	46,1				
I	20	50	0,53	26,5	41,7	39,9	48,5	27,6	41,6	33,9	46,1
			0,53	28,8	41,3	23,1	40,8				
			0,53	27,5	41,9	38,6	48,9				
I	20	50	0,64	22,2	29,1	37,2	40,5	21,2	29,8	34,0	38,1
			0,64	20,9	31,8	33,4	35,6				
			0,64	20,5	28,5	31,4	38,2				

Tabela A2 - Resultados de absorção de água por capilaridade.

Traço	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Absorção (g/cm ²)	Absorção Total (%)	Média Absorção Total (%)
A	0	0	0,42	0,58	5,09	1,70
			0,42	0,58	5,02	
			0,42	0,54	4,77	
A	0	0	0,53	0,54	4,81	1,60
			0,53	0,6	5,38	
			0,53	0,59	5,28	
A	0	0	0,64	0,69	6,31	2,10
			0,64	0,67	6,07	
			0,64	0,63	5,53	
B	10	0	0,42	0,31	2,70	0,90
			0,42	0,33	2,81	
			0,42	0,33	2,85	
B	10	0	0,53	0,53	4,57	1,52
			0,53	0,54	4,58	
			0,53	0,49	4,18	
B	10	0	0,64	0,66	6,03	2,01
			0,64	0,62	5,69	
			0,64	0,6	5,37	
C	20	0	0,42	0,22	1,82	0,61
			0,42	0,22	1,81	
			0,42	0,19	1,60	
C	20	0	0,53	0,35	3,08	1,03
			0,53	0,34	2,89	
			0,53	0,33	2,84	
C	20	0	0,64	0,41	3,50	1,17
			0,64	0,44	3,75	
			0,64	0,39	3,33	
D	0	25	0,42	0,59	5,25	1,75
			0,42	0,57	5,07	
			0,42	0,56	4,90	
D	0	25	0,53	0,63	5,56	1,85
			0,53	0,65	5,85	
			0,53	0,65	5,94	
D	0	25	0,64	0,68	6,46	2,15
			0,64	0,69	6,59	
			0,64	0,69	6,01	
E	0	50	0,42	0,51	4,51	1,50
			0,42	0,42	3,62	
			0,42	0,58	5,16	
E	0	50	0,53	0,65	5,74	1,91
			0,53	0,66	5,79	
			0,53	0,63	5,58	
E	0	50	0,64	0,7	6,33	2,11
			0,64	0,66	6,43	
			0,64	0,64	6,04	
F	10	25	0,42	0,36	3,09	1,03
			0,42	0,4	3,48	
			0,42	0,31	2,67	
F	10	25	0,53	0,52	4,55	1,52
			0,53	0,45	3,91	
			0,53	0,53	4,54	
F	10	25	0,64	0,31	2,81	0,94
			0,64	0,68	6,27	
			0,64	0,6	5,42	
G	10	50	0,42	0,3	2,73	0,91
			0,42	0,38	3,40	
			0,42	0,28	2,52	
G	10	50	0,53	0,43	3,87	1,29
			0,53	0,37	3,26	
			0,53	0,39	3,43	
G	10	50	0,64	0,56	5,01	1,67
			0,64	0,55	4,85	
			0,64	0,54	4,83	
H	20	25	0,42	0,19	1,64	0,55
			0,42	0,22	1,91	
			0,42	0,18	1,51	
H	20	25	0,53	0,3	2,64	0,88
			0,53	0,25	2,21	
			0,53	0,27	2,34	
H	20	25	0,64	0,41	3,63	1,21
			0,64	0,33	2,94	
			0,64	0,34	2,90	
I	20	50	0,42	0,21	1,86	0,62
			0,42	0,2	1,72	
			0,42	0,17	1,51	
I	20	50	0,53	0,35	2,95	0,98
			0,53	0,31	2,89	
			0,53	0,26	3,25	
I	20	50	0,64	0,34	3,15	1,05
			0,64	0,32	2,75	
			0,64	0,36	2,33	

Tabela A3- Resultados obtidos através do ensaio acelerado de penetração de íons cloretos – ASTM C1202, em Coulombs.

Traço	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Média
A	0	0	0,42	5079	3979	5732	4930
			0,53	5381	5518	4353	5084
			0,64	5015	6228	6665	5970
B	10	0	0,42	1103	1424	1119	1215
			0,53	2024	3925	2400	2783
			0,64	2962	3612	3645	3406
C	20	0	0,42	381	733	426	513
			0,53	807	874	919	867
			0,64	1821	1082	1652	1518
D	0	25	0,42	5328	4543	4086	4652
			0,53	4628	4595	7382	5535
			0,64	8179	9030	9450	8886
E	0	50	0,42	3961	4281	4988	4410
			0,53	6264	6725	6876	6622
			0,64	9283	7458	6547	7763
F	10	25	0,42	1451	1292	1397	1380
			0,53	2234	2260	2180	2224
			0,64	4031	3765	3943	3913
G	10	50	0,42	1546	1473	1260	1426
			0,53	2054	2361	1775	2063
			0,64	3294	3121	2746	3053
H	20	25	0,42	566	376	391	444
			0,53	864	754	695	771
			0,64	1107	1114	1076	1099
I	20	50	0,42	283	357	378	340
			0,53	1171	952	890	1004
			0,64	982,12	1202,14	1091,74	1092

Tabela A4- Resultados obtidos através do ensaio acelerado de penetração de íons cloretos – NT Build 492 em $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Traço	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Média
A	0	0	0,42	27,36	26,66	38,69	30,90
			0,53	33,59	43,48	17,56	31,54
			0,64	19,05	16,67	73,94	36,55
B	10	0	0,42	5,98	4,01	4,04	4,67
			0,53	6,63	3,01	5,50	5,05
			0,64	5,51	7,84	11,02	8,12
C	20	0	0,42	2,40	2,08	3,05	2,51
			0,53	4,10	4,32	4,30	4,24
			0,64	7,68	4,13	6,22	6,01
D	0	25	0,42	7,59	30,11	8,78	15,50
			0,53	15,67	16,09	16,18	15,98
			0,64	12,77	11,41	24,07	16,08
E	0	50	0,42	4,27	4,24	5,73	4,74
			0,53	8,17	8,73	8,51	8,47
			0,64	8,14	8,23	10,82	9,06
F	10	25	0,42	2,76	4,73	3,41	3,63
			0,53	7,41	9,72	4,29	7,14
			0,64	7,36	9,44	10,01	8,94
G	10	50	0,42	3,10	3,45	4,12	3,56
			0,53	5,19	10,01	7,13	7,44
			0,64	10,20	8,00	6,95	8,39
H	20	25	0,42	1,20	2,64	0,58	1,47
			0,53	6,90	5,67	2,38	4,98
			0,64	5,84	6,08	3,85	5,26
I	20	50	0,42	2,68	1,30	1,20	1,73
			0,53	1,09	2,83	3,08	2,34
			0,64	4,71	4,20	3,72	4,21