

# DURABILIDADE DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS: REVISÃO EM RELAÇÃO AOS CLORETOS

## DURABILITY OF CONCRETE WITH RESIDUES: REVIEW REGARDING CHLORIDES

**Lucas Menezes Lima Silva,**  
Graduando em Eng civil,  
Instituto federal de Sergipe,  
email: lucas\_menezes\_lima@hotmail.com

**Fernanda Martins Cavalcante de Melo,**  
profa Ms do Instituto Federal de Sergipe  
email: fernanda.melo@ifs.edu.br

**Vanessa Gentil de Oliveira Almeida,**  
profa Ms do Instituto Federal de Sergipe  
vanessa.gentil@hotmail.com

**Shevine Silva Oliveira Risso,**  
Doutoranda em Eng de Energia da UFABC  
email: shevine.oliveira@gmail.com

**Herbet Alves de Oliveira**  
Prof. Dr. Instituto Federal de Sergipe  
email: herbet.oliveira@ifs.edu.br

**Resumo:** As edificações são construídas de modo que tenham maior durabilidade. Contudo, a falta de manutenção, a baixa qualidade dos materiais utilizados nas construções, as mudanças nas características urbanas e outros fatores, fazem com que a vida útil da edificação seja reduzida, e deste modo, sua durabilidade acaba sendo prejudicada. Incorporar determinados resíduos industriais tem se apresentado como uma opção muito atraente para produzir argamassas, concretos e blocos. Determinadas aplicações com o cimento Portland não só melhoram a durabilidade, como também reduzem o impacto ambiental provocado pelo descarte aleatório. As substâncias que mais têm chamado a atenção quanto a durabilidade, são os cloretos (Cl<sup>-</sup>), por conta da sua presença nas águas. O presente trabalho teve como objetivo investigar e correlacionar os concretos produzidos com alguns resíduos utilizados na produção de concreto e sua durabilidade relacionada aos Cl<sup>-</sup>. A partir disso, foi possível observar que a maioria dos resíduos utilizados no concreto favorecem a melhoria de propriedades, como a resistência mecânica, bem como a sua durabilidade em relação aos Cl<sup>-</sup>, seja por causa da finura que melhora o empacotamento ou por ser inerte.

**Palavras-Chave:** Concreto; Durabilidade; Resíduos.

**Abstract:** Buildings are constructed in such a way that they have greater durability. However, the lack of maintenance, the low quality of the materials used in the constructions, the changes in the urban characteristics and other factors, makes the useful life of the building reduced, and in this way, its durability ends up being harmed. Incorporating certain industrial residues has been presented as a very attractive option to produce mortars, concrete and blocks. Certain applications with Portland cement not only improve durability, but also reduce the environmental impact caused by random disposal. The substances that have drawn the most attention in terms of durability are chlorides (Cl<sup>-</sup>), due to their presence in water. The present work aimed to investigate and correlate the concrete produced with some waste used in the production of concrete and its durability related to Cl<sup>-</sup>. From this, it was possible to observe that most of the residues used in concrete favor the improvement of properties, such as mechanical strength, as well as its durability in relation to Cl<sup>-</sup>, either because of the fineness that improves packaging or because it is inert.

**Keywords:** Concrete; Durability; Residues.

## INTRODUÇÃO

O concreto após completa secagem torna-se um material sólido, e a sua durabilidade depende do projeto de execução, e do processo de intemperismo no qual o mesmo está sujeito (GUIMARÃES, 2005; KULKARNI e PEREIRA, 2019).

O concreto é um material de elevada durabilidade, pois a sua resistência mecânica eleva-se com o passar do tempo, mesmo quando exposto a intempéries (NEVILLE, 1997; PETRUCCI, 2011).

Levando em consideração esses aspectos, é necessária a procura por materiais alternativos que consigam reduzir os custos de processo, reduzir a poluição ambiental e obter uma maior resistência mecânica, além do aumento de sua durabilidade (KAZMI, 2020).

Segundo Dang et al. (2020), existem vários materiais suplementares que têm sido amplamente utilizados na produção de concreto como opção de substituição ao cimento Portland, reduzindo o impacto ambiental, e diminuindo uso do cimento como: cinzas de modo geral, fibras, metacaulim, etc. A adição de materiais suplementares, têm mostrado melhorias na durabilidade do concreto (KORF, 2020; BRAGAGNOLO). Segundo Ali, Gulzar e Raza (2021), todo cuidado deve ser dado ao concreto, e por sua vez ao cimento, que pode ser agredido pelas intempéries, podendo danificar a sua estrutura. Utilizar resíduos de materiais de construção em misturas de concreto ajuda a solucionar problemas de sustentabilidade, pois reduz o consumo de cimento. A ação dos íons  $\text{Cl}^-$  é responsável pela redução da durabilidade e pela danificação do concreto. Nas estruturas de concreto, a ação de íons de  $\text{Cl}^-$ , além de provocar a despassivação do aço, favorece a corrosão localizada, com aparecimento de deslocamento e trincas no concreto.

Existem muitos trabalhos a respeito da influência dos resíduos gerados na construção civil, sobretudo em relação à resistência do concreto à penetração do  $\text{Cl}^-$ . No entanto, não foi identificado na revisão de literatura algum trabalho que pudesse nortear os usuários quanto aos tipos de materiais que já foram usados e sobretudo os benefícios obtidos.

Portanto, o trabalho tem como objetivo investigar a influência da incorporação de resíduos, sobretudo os materiais de construção e cinzas de modo geral na durabilidade do concreto quando atacados pelos íons  $\text{Cl}^-$ .

## MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho, trata-se de uma revisão de literatura relacionada à durabilidade de concreto, em que foram incorporados resíduos de materiais de construção e cinzas de modo geral, ou seja, materiais usualmente utilizados em concreto.

Como critérios de elegibilidade dos artigos de publicação, foram escolhidos os artigos publicados entre 1999 a 2021 em sua íntegra, e que apresentam os termos associados à durabilidade do concreto, sobretudo inserção de resíduos (LAKATOS e MARCONI, 2010).

### Teor de Cloretos ( $\text{Cl}^-$ )

Durante o processo de cura do concreto, diversos compostos químicos são produzidos, dentre eles os íons  $\text{Cl}^-$ . Esses íons podem surgir na mistura de maneira livre ou combinada, cuja soma é denominada de cloretos totais, estando diretamente relacionados à redução da durabilidade do concreto, acelerando o processo de corrosão das armaduras.

Referente às quantidades permitidas de íons  $\text{Cl}^-$  nos concretos, não existe consenso para controle. De acordo com Helene (1993) o limite permitido é de 0,4% de  $\text{Cl}^-$  em relação à massa de cimento, ou de 0,05 a 0,1% em relação à massa total. Já segundo Czarnecki (2013), o teor permitido no concreto pode oscilar de 0,2 a 1% da massa total. Já Ribeiro (2018), definiu como desprezível inferior a 0,2%, baixo entre 0,2 a 0,4 %; médio de 0,4 a 1,0% e maior do que 1,0 como alto.

A norma NBR 6118:ABNT 2014 destaca o valor de 500 mg/l em relação à água de amassamento como sendo o máximo teor de  $\text{Cl}^-$  totais, tendo como base o procedimento para determinar o teor de cloretos totais, de acordo com a norma ASTM C 1152, 2018.

### Determinação do teor de cloretos por meio da Norma ASTM C 1202 (2017)

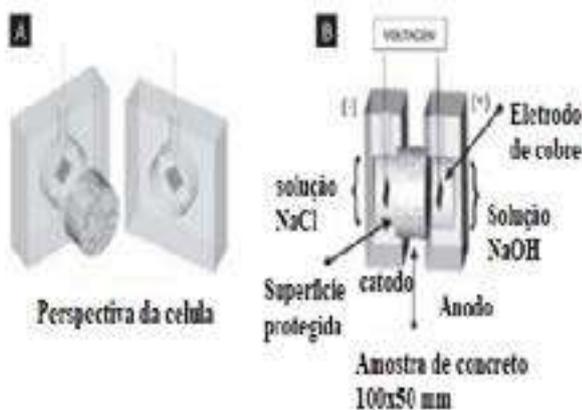
Um dos métodos mais utilizados para determinação dos  $\text{Cl}^-$  está apresentado na norma da ASTM C 1202 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, primeiramente proposta por Whiting (1981) e atualizada em 2017 (STANISH, 1997).

Os corpos de provas precisam estar com as laterais secas e seladas (HELENE, 1993). As amostras são colocadas em dessecador sob pressão a vácuo e mantidas por 3 horas, com pressão 6650 Pa. A

câmara é preenchida com água, até que as amostras sejam cobertas pela água. Em seguida, as amostras são mantidas no vácuo por um período de 1 hora.

Depois deste período, em que as amostras são submetidas à pressão, as mesmas são conservadas envolvidas em água por um período de  $(18 \pm 2)$  horas. Em seguida as amostras são retiradas da água, são enxugadas e conservadas em UR de 95% para o início do ensaio. Logo depois, são colocadas entre as meia-células, onde a face inferior fica em contato com a solução 0,3 N de (NaOH) e a face superior fica em contato com solução 3% de cloreto de sódio (NaCl). Deve ser mantida uma diferença de potencial de  $(60 \pm 1)$  volts entre as meio células, no decorrer de 6 horas, enquanto a monitoração da corrente é realizada em intervalos de 30 minutos, conforme apresentado nas Figuras 1 (a) e (b).

Figura 1: ensaio de penetração do íon Cl<sup>-</sup>



Fonte: Medeiros (2008)

Determina-se, em Coulombs (C), o total de carga passante e a classificação da resistência do concreto quanto à penetração de cloreto, conforme Equação 1, onde:

Q = total de carga passante;

(C)  $I_0$  = corrente medida imediatamente após a tensão aplicada;

(A)  $I_t$  = corrente medida nos tempos pré-estabelecidos no decorrer do ensaio (A).

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (1)$$

Os valores permitidos de carga elétrica em Coulomb, podem oscilar de 100 a 4000 C, sendo que

acima de 4000 C são considerados elevados e abaixo de 100, desprezíveis (OLIVEIRA, 2018).

Ensaio de Penetração de Cloreto (Cl<sup>-</sup>)

No Quadro 1 é apresentado métodos de análise do Cl<sup>-</sup> normatizados. Pode-se observar que o parâmetro mais usado é o da análise e coeficiente de difusão.

A norma da ASTM C 1202 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* é uma adaptação da AASHTO T277, é um dos métodos mais utilizados em estudos científicos devido a sua simplicidade e rapidez (OLIVEIRA, 2018)

Durabilidade de concreto em relação ao Cl<sup>-</sup> com incorporação de resíduos

Pesquisadores têm estudado a incorporação de resíduos em concretos a fim de aumentar a durabilidade do mesmo, e paralelamente reduzir custos e a poluição ambiental. (CZARNECKI, 2013)

Estudos com a incorporação de resíduos em relação ao cloreto

Os resíduos que são utilizados em concretos são diversos. No entanto, os resíduos de materiais de construção e alguns tipos de cinza, são os que normalmente apresentam maior volume e estão presentes sempre nas obras.

Foi então selecionado alguns dos principais materiais de construção como tijolos, resíduo de concreto e argamassa, mármore, granitos, vidros e outros mais usuais como cinzas de bagaço de cana e escória de alto forno.

**Quadro 1**-Síntese dos métodos normatizados para análise de cloretos

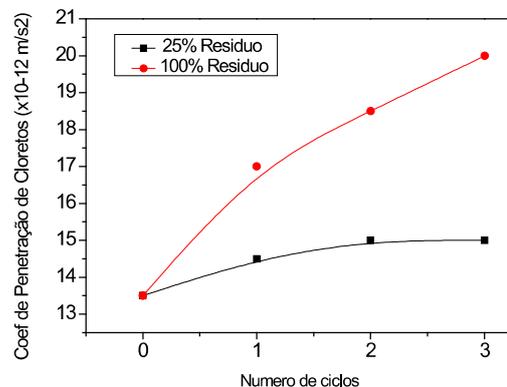
Base teórica	Método de Ensaio	Parâmetro de Análise	Duração	Norma
Equação de Nernst Planck	Aplicação de corrente de 12 V em sistema de NaCl	Coef. de difusão no estado estacionário	semanas	NT BUILD 355
	Aplicação de corrente de 12 a 60 V em sistema 11% de de NaCl e NaOH	Coef. de difusão no estado não estacionário	24 a 96 h	NT BUILD 355 e ASTM C 1202
	Aplicação de corrente de 12 V em sistema de NaCl e H <sub>2</sub> O	Coef. de difusão no estado não estacionário	>14 dias	ASTM C 1543
2ª Lei de Fick	Imersão em NaCl	Coef. de difusão no estado estacionário e não estacionário	>35 dias	ASTM C 1556
Outros	Aplicação de corrente elétrica (60V) num sistema com 3% de NaCl e NaOH	Resistência do concreto à penetração do Cl <sup>-</sup> em função da carga passante.	6 h	ASTM C 1202
	Exposição de uma face de amostra prismática de concreto em NaCl	Perfil de Cl <sup>-</sup>	>90 dias	ASTM C 1543

### Resíduo de construção civil (RCC)

O resíduo da construção civil são as sobras geradas na construção, materiais como: concreto, argamassa, gesso e tijolo. Silva et al. (2021), investigaram a durabilidade de um concreto com relação aos Cl<sup>-</sup> substituindo o agregado natural por RCC, os quais foram reciclados por diversas vezes. Foram realizadas substituições de 25% e 100%.

Os resultados apontaram que à medida que se acrescentou o RCC e aqueles que foram mais de uma vez reciclados, demonstrou-se um aumento da absorção de água e maior penetração do íon Cl<sup>-</sup>. Esse fato se deve a presença de argamassa aderida na superfície, que dificultou as reações entre o aglomerante e agregado, conforme Figura 2, o que foi também confirmado por (GUO, 2018; e KISKU, 2017).

Soares (2017) procurou avaliar a influência do uso dos RCC para substituir de forma parcial os agregados graúdos e miúdos. Foram realizadas substituições parciais de 10% e 20% do agregado miúdo convencional pelo agregado miúdo reciclado do agregado graúdo convencional pelo agregado graúdo reciclado.

**Figura 2-** Difusão do íon Cl<sup>-</sup> em relação no de ciclos

Fonte: Silva et al (2021)

A relação a/c usada para todos os traços foi de 0,44, sendo necessário o uso de aditivo plastificante. Foi observada semelhança entre as propriedades mecânicas e se referindo à durabilidade, os concretos com substituição de resíduos exibiram resultados melhores em relação ao concreto referência. O fato pode ser explicado devido a uma cura interna, que ocorreu em função dos poros deixados pelo resíduo e que possibilitaram a penetração do cimento. Com relação a trabalhabilidade, Somma et al (2012), observaram queda da trabalhabilidade do concreto com RCC mas que poderia ser utilizado sem plastificantes.

Já a pesquisa de Vasques (2018) com o mesmo objetivo, confeccionou corpos-de-prova nos traços de referência, 10%, 20% e 100% de substituição do agregado natural do concreto pelos resíduos da construção civil (RCC) mantendo-se a/c 0,45 e 0,60. No estado endurecido, foi realizada avaliação do seu desempenho mecânico, por meio do ensaio de resistência à compressão simples e da sua durabilidade, por meio do ensaio de absorção por capilaridade. Referente aos resultados obtidos quanto à resistência aos cloretos, obteve-se melhores resultados com menor relação a/c 0,40. Ou seja, os resíduos favoreceram a maior absorção de água, piorando a durabilidade, provavelmente porque a relação a/c foi alta o suficiente para deixar poros muito grandes favorecendo a penetração dos íons Cl<sup>-</sup>. No trabalho de Troian (2010) utilizando o método ASTM C1202-07, foram molhados previamente os agregados em proporção de 0 a 100% em relação ao peso. Os resultados foram analisados estatisticamente, apresentando que tanto o teor de agregado, como de pré-molhagem reduzem a penetração dos íons, o que foi confirmado por (SILVA E CAPUZZO, 2020).

### **Mármore (RM)**

Esse tipo de resíduo é gerado em marmorarias por ocasião do beneficiamento de placas cortadas de rochas. Esse resíduo apresenta na sua composição majoritariamente o CaCO<sub>3</sub>. É um material frágil e de baixa resistência mecânica em relação aos granitos. Singh, Srivastava e Bhunia (2019) analisaram a resistência a longo prazo e a durabilidade do concreto substituindo parcialmente o cimento em peso por resíduos secos de pasta de pó de mármore. Foram propostas substituições em porcentagens de 0, 10, 15 e 20 e 25% e três relações água e cimento respectivamente: a/c 0,35; 0,40 e 0,45. Concluiu-se que para até 15% de reposição, houve uma melhora da resistência mecânica e resistência da durabilidade aos Cl<sup>-</sup>. Esse fato se deve ao melhor empacotamento das partículas, o que foi também confirmado por Negredo (2018), que substituiu o RM, pelo cimento Portland, em proporções de 0 a 25%.

### **Cerâmica (RCV)**

No Brasil existem 6903 fábricas de produtos de cerâmica vermelha que geram resíduos os quais são descartados aleatoriamente (ANICER, 2021).

Jerônimo (2014) analisou os efeitos da substituição de parte do cimento por resíduos de tijolos moídos

frente à corrosão da armadura causada pela ação de cloretos. Foram preparados concretos convencionais cada um com 10%, 20% e 30% de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) na dimensão de agregado miúdo. Foram também considerados concretos autoadensáveis (CAA) com traço de 1:3 e 20%, 30% e 40% de substituição de resíduos.

Para a penetração de cloretos o RCV dificultou a penetração do íon Cl<sup>-</sup> tanto para os concretos convencionais, como para os concretos autoadensáveis. Fato esse explicado pela redução da porosidade e pela maior capacidade de fixação de cloretos.

A respeito da durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo proveniente de resíduo de cerâmica vermelha, também apresentaram bons resultados de resistência aos cloretos, em decorrência da cura interna, conferida pela absorção maior de água do resíduo cerâmico.

O estudo de Moraes (2015) teve como objetivo principal produzir concretos experimentais usando agregados miúdos produzidos com resíduo de cerâmica vermelha RCV. Nesse estudo os mesmos foram submetidos a pré-molhagem com água (PM) utilizando diferentes tempos. Então, foi avaliada a durabilidade destes concretos através dos ensaios de penetração de íons Cl<sup>-</sup>.

Foram produzidas misturas com relação a/c de 0,45; 0,55 e 0,65, onde o agregado miúdo natural teve sua substituição por agregado miúdo cerâmico em 0%, 12,5% e 25%, e cada porcentagem foi submetida às taxas de pré-molhagem de 40%, 60% e 80%.

Notou-se que em todas as misturas de substituição do agregado natural pelo agregado miúdo cerâmico, exibiram melhora na resistência à penetração de íons cloretos, reduzindo o risco de penetração de íons cloretos em até 30%.

A pré-molhagem dificulta a penetração do cimento no interior dos poros, promovendo uma capa protetora que por sua vez favorece a melhora da durabilidade quanto a penetração de íons Cl<sup>-</sup> (MORAES, 2015).

### **Cinza de bagaço de cana (CBC)**

A cinza de bagaço de cana é gerada em usinas de álcool de modo geral, como resultados da calcinação de lenha usada como combustível. A cinza é constituída basicamente por SiO<sub>2</sub> e CaSO<sub>4</sub>. Pietrobon et al. (2018), investigaram a resistência à penetração de Cl<sup>-</sup> em concreto autoadensável (CAA) com substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana de açúcar (CBC) e adição de filer calcário além

de sílica ativa.

Foram elaboradas quatro dosagens de concreto autoadensável, são essas: 1) CAA + CBC em substituição parcial à areia, sem adição de finos; 2) CAA + CBC + filer calcário, sendo a brita empregada suja (com pó de pedra); 3) CAA + CBC + filer calcário + brita lavada (sem pós de pedra); 4) CAA + CBC + sílica ativa. Observou-se no estudo que o melhor desempenho em relação à barreira contra a penetração de Cl<sup>-</sup> foi observado no concreto autoadensável com adição de 5% de sílica e no concreto auto adensável com 30% de filer e pó de pedra.

Esses resultados ocorrem devido a um maior preenchimento dos vazios do concreto, proporcionando maior densidade da pasta, prevenindo, dessa forma, o surgimento de futuras patologias devido à maior dificuldade da penetração de agentes agressivos.

### **Resíduo de vidro (RV):**

O resíduo de vidro é proveniente de garrafas descartadas, de composição a base NaOH e CaO. Kim et al. (2014) incorporou o resíduo de vidro e cinza volante a um concreto na forma de adição, o qual foi submetido a gelo e degelo e foi avaliado a resistência a durabilidade aos Cl<sup>-</sup>. O pó de vidro utilizado, apresentou um alto teor de sílica amorfa finamente moído, (menos de 100 µm), o que favoreceu a redução do volume de vazios de ar, e exibiu reatividade pozolânica. As composições elaboradas foram a incorporação do resíduo de vidro e de cinza volante em separado e formulação contendo 10% pó de vidro e 10% de cinzas volantes.

A mistura melhorou a resistência do concreto aos ciclos de congelamento e descongelamento com e sem sal de degelo (NaCl + CaCl<sub>2</sub>, solução a 4%). A melhora foi mais acentuada quando se incorporou 10% de vidro, que foi adicionado em separado.

No estudo de Lee (2018), definiu-se inicialmente as características dos materiais, logo depois foi feita a dosagem e concretagem em quatro traços, onde substituiu-se o agregado miúdo por resíduo de vidro de garrafas nas proporções de 0%, 5%, 15% e 25%. Exibiu-se neste estudo que, a incorporação do vidro moído ao concreto reduz a penetração dos Cl<sup>-</sup>, em decorrência do refinamento dos poros que existem no concreto o que foi confirmado por MEYER (2001).

O estudo de Soares (2021), avaliou a influência de resíduo de vidro para substituir o cimento Portland em um compósito cimentício com relação a durabilidade frente ao ataque por cloretos. Diferentes teores de

pó de vidro foram utilizados como: (0%, 10%, 20%, 30% e 50%).

O vidro, por ser inerte e fino, favoreceu a redução da porosidade. A melhor formulação foi o uso do teor de 50% de incorporação de pó de vidro para substituir o cimento Portland por exibir uma resistência mecânica alta, bem como alta resistência ao ataque de cloretos.

No entanto, se o vidro for utilizado na forma de agregado graúdo, o concreto apresenta baixa resistência mecânica e, por sua vez, resistência aos cloretos (COLLIVIGNARELLI, 2020).

### **Rochas ornamentais graníticas (RBRO):**

Esse resíduo trata-se de rochas utilizadas em marmorarias para produção de peças para construção civil, constituídas basicamente por feldspatos. No estudo de Degen et al. (2013) o objetivo foi avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com incorporação de resíduos de rochas ornamentais em substituição parcial do cimento. Foi possível comprovar que, com a incorporação dos rejeitos, não foi afetada a resistência mecânica e durabilidade dos concretos produzidos.

Para detecção de Cl<sup>-</sup>, foi usado o método colorimétrico. Foi utilizado a relação a/c 0,45 com teores de substituição de 5%, 10%, 15%.

Teixeira (2019), realizou uma pesquisa incorporando resíduo de granito nas proporções 5%, 7,5%, 10% e 12,5% para substituir a massa ao cimento. Os resultados exibiram a possibilidade de substituição de até 7,5% do cimento pelo RBRO, atendendo de forma simultânea os critérios de resistência à compressão, absorção de água e penetração de íons Cl<sup>-</sup>.

Dietrich (2015) avaliou o processo de corrosão das armaduras levado pela ação de íons cloreto em concretos produzidos com adição do resíduo do beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO). Avaliou-se então, propriedades físicas, químicas e mineralógicas do RBRO. Produziu-se concretos com três níveis de relação água/cimento 0,45; 0,55 e 0,65 – e quatro níveis de adição de RBRO - 0, 5, 10 e 15% em relação à massa de cimento. Quando avaliada a reação frente de cloretos, através do ensaio colorimétrico, foi confirmado o benefício promovido pela incorporação de 5% de RBRO nas formulações, sendo esta proporção capaz de reduzir a profundidade de penetração dos íons.

### **Cinza de casca de arroz:**

(CCA) A cinza de casca de arroz é produzida a partir da sua queima quando usada como combustível em usinas ou fornos cerâmicos. A cinza é rica em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$ . O objetivo da dissertação de Sacioloto (2005) foi realizar a investigação do comportamento de um concreto frente a ação de  $\text{Cl}^-$  em concretos com composição de adições minerais, especialmente a cinza de casca de arroz, quando submetidos a períodos diferentes de cura úmida (3, 7 e 28 dias).

Para isto foram usadas misturas em que a massa de cimento foi substituída por 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (CCA), que tiveram seu desempenho comparado ao de misturas com 35% de cinza volante (CV), 50% de escória de alto forno (EAF) e com cimento puro (sem adição), esta última chamada de mistura de referência (REF). As misturas com cinza volante, escória de alto forno e de referência representaram os cimentos comerciais CP III, CP IV e CP V-ARI, respectivamente.

Amistura 30% de CCA foi a que apresentou a melhor resistência à penetração do íon  $\text{Cl}^-$ . Nos estudos de Ali et al (2021) concluiu-se que o concreto com adição de cinzas volantes ativado mostrou 14-24% menos penetração de íons cloreto em todas as idades de teste. Deste modo, essas melhorias podem ser atribuídas à densificação da matriz cimentícia, devido ao consumo precoce de portlandita, que reduz a conectividade e o tamanho dos poros. Além disso, a penetração de íons cloreto em concreto geopolimérico também pode ser reduzida pelo aumento da proporção de Hidróxido de sódio (NaOH) utilizada na geopolimerização (AMRAN et al 2021).

### **Resíduo de alto forno (RAF)**

Esse tipo de resíduo é resultado da reação do minério de ferro com o calcário e do carvão no processo de produção do aço. Usualmente é reaproveitado pela indústria cimentícia para produção de cimento.

No estudo de Kim (2018) foi investigado os efeitos da incorporação de resíduos de escória de alto-forno granulada e moída como substituto do cimento Portland comum e também em concreto de alta resistência inicial, em substituição aos cimentos na proporção de 0, 30% e 70%. Foi avaliado a sua durabilidade quanto à penetração dos íons cloreto. Concluiu-se que a incorporação de escória até 30% no concreto reduziu significativamente a penetração dos íons cloreto, o que foi também confirmado por Magalhães (2019).

O concreto com escória de alto-forno já é usado em grandes estruturas marítimas por causa do baixo calor de hidratação. Além disso, a substituição parcial de cimento Portland comum pela escória de alto-forno é considerada como uma maneira promissora de melhorar a vida útil do concreto.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos principais resíduos analisados. Foi descrito o método de incorporação, a porcentagem de incorporação ou substituição, a resistência mecânica obtida, bem como o índice de cloretos encontrados. Por fim, a eficiência de acréscimo ou decréscimo de resistência e penetração de cloretos.

Tabela 1 - Resíduos utilizados no concreto para teste de Resistência aos Cloretos.

Resíduo	Descrição	Referência	(% Subst.	Resistência à compressão (MPa)	Cl <sup>-</sup>	Acréscimo↑ ou Decréscimo↓ (%)	
						RS	Cloretos
Cerâmica	A substituição do cimento por cerâmica exibiu perda de resistência, porém melhorou a durabilidade	Passos (2020)	0 a 100	24-16,4	100-50 <sup>3</sup>	↓33	↓50
	Não houve diferenças significativas na resistência, mas piorou a penetração do Cl <sup>-</sup>	Jerônimo (2014)	0 a 30	47-48	1 a 1,2%	↓2	↑ 20
Vidro	O pó de vidro substituiu o cimento. Houve queda na resistência e aumento da penetração de Cl <sup>-</sup>	Soares (2021)	0-50	84-44	1,0-1,5 <sup>2</sup>	↓48	↑50
		Rodrigues (2020)	0 a 30		5-4 <sup>2</sup>		↓10
		Lee (2018) e Collivignalli (2020)	0 a 15		↑ 20		↓24
Rochas Ornamentais	O resíduo substituiu totalmente o agregado natural	Binici (2008)	100%	70-68	15-11	3↓	↓26,7
	O resíduo substituiu o cimento	Degen(2013) e Teixeira (2019)	0-15	32-31	Não variou	↓6,1	
Mármore	O pó de Mármore adicionado até 15% gerou uma mistura densa melhorando a resistência e durabilidade	Saloni (2020)	0 a 50	40-50	1700-1200 <sup>1</sup>	↑25	↓ 3,6
		Negredo (2018)	0-25	45-37	2,24-4,21 <sup>2</sup>	↓18	↓46,8
		Singh (2016) Singh, (2017) Binici (2008)	0-25	32-37			
Escória de alto forno	Substituir o cimento ARI em concreto, melhorou a durabilidade pois formou nas idades iniciais C-S-H.	Kim et al (2018)	0 a 30	30-20	23,65-56,17 <sup>1</sup>	↓30	↑50
	A escória substituiu o cimento	Magalhães (2019)	0 - 60	30-15	15,1 a 7 <sup>2</sup>	↓50	↓ 53

RS- Resistência à compressão (MPa) ; ↓ redução ; ↑ aumento

1- Carga em coulomb passante; 2-Difusão do cloreto em 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, 3- Penetração em (mm)

**Tabela 1** - Resíduos utilizados em concreto para teste de Resistência aos Cloretos – Continuação.

Resíduo	Descrição	Referência	(% Subst.	Resistência à compressão (MPa)	Cl <sup>-</sup>	Acréscimo↑ ou Decréscimo↓ (%)	
						RS	Cloretos
Resíduo de construção de obra	Foi observado queda da resistência bem como aumento na penetração do cloreto	Silva et al (2021)	25-100	55-48	14-16 <sup>3</sup>	↓12,5	↑14,3
		Vasquez (2014)	0 a 100	70-40	0,8-1,0 (%)	↓42	↑ 25
	Foi observado que pré molhagem do resíduo reduz substancialmente a penetração dos íons Cl <sup>-</sup>	Trojan (2010)	0 a 100	32-28	8607-6222 <sup>1</sup>	↓12,5	↓27,7
Cinza de casca de arroz	Substituindo o cimento e agregado miúdo.	Sacilolo (2005) Rattanachu (2020)					
		Ramezianpour (2009)	0 a 10	45-36	2200-550	↓20	↓75

RS- Resistência à compressão (MPa) ; ↓ redução ; ↑ aumento

1- Carga em coulomb passante; 2-Difusão do cloreto em 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, 3- Penetração em (mm)

## Conclusões

Para que seja possível considerar uma estrutura durável no decorrer de sua vida útil, a mesma precisa conservar os requisitos do projeto quanto à estética, funcionalidade e principalmente à segurança, sem que gere custos de manutenção que não estavam previstos. Na maior parte das situações em que ocorre a degradação de estruturas, se atribui à corrosão de armadura por perda da passivação decorrentes da penetração de cloretos no concreto de recobrimento.

Dentre os fatores que influenciam na corrosão, está a dimensão do agregado. Muitos estudos exibem benefícios da utilização do agregado graúdo reciclado, em relação ao agregado miúdo. Nos resultados apresentados, os dados podem variar, tendo em vista sua relação com a forma, grãos, constituição do agregado, porcentagem de material, dentre outros fatores. Os materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes, escória de alto forno granulada moída, metacaulim e outros, têm sido amplamente utilizados na produção de concreto como opção de substituição do cimento Portland comum.

Uma das principais razões para o uso de materiais cimentícios suplementares na produção de concreto é a redução dos impactos ambientais e diminuição do uso de cimento. Notou-se que nos estudos em que o resíduo de alto forno foi utilizado, foi possível

concluir que a substituição parcial do cimento Portland por escória de alto forno reduziu significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e provocou na diminuição dos coeficientes de migração de íons. Em resumo, os resultados mostraram maior resistência à penetração de cloretos.

Em se tratando dos estudos que utilizaram do mármore, concluiu-se que para até 15% de reposição, favoreceu a melhoria na resistência e durabilidade aos cloretos.

A respeito da cinza de bagaço de cana, notou-se que com a introdução de finos no CAA, há maior preenchimento dos vazios do concreto, proporcionando maior densidade da pasta, prevenindo dessa forma, o surgimento de futuras patologias devido à maior dificuldade da penetração de agentes agressivos.

Quanto aos resíduos de vidro observou-se que, quanto à durabilidade, a mistura conseguiu melhorar a resistência do concreto, e além disso, o vidro moído acarreta na diminuição da penetração de cloretos por conta do seu refinamento, pois o vidro fino acaba favorecendo a porosidade. Já nos estudos utilizando rochas ornamentais, foi possível perceber que em um estudo usou-se de um teor de 7,5% e no outro usou-se de 5%, em ambos, conseguiu-se reduzir a permeabilidade e a penetração de íons cloreto, isto ocorreu em decorrência da finura do resíduo.

Quando analisada a mistura com cinza de casca de arroz, observou-se que esta mistura exibiu uma resistência maior a penetração de cloretos, além de melhorar a durabilidade em ambos os estudos, tudo isso aconteceu em decorrência da redução da conectividade e tamanho dos poros.

Conclui-se, portanto, que a adição de materiais cimentícios suplementares têm mostrado melhorias na durabilidade de longo prazo e suporte mecânico, tanto a propriedades do concreto quanto a ação dos cloretos.

## Referências

ALI, Babar; GULZAR, Muhammad Ahsan . A.; RAZ Ali. *Effect of sulfate activation of fly ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, v. 277, 2021, 122329.

AMRAN, Mugahed; DEBBARMA, Solomon; OZBAKKALOGLU, Togay . *Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties*. Journal Of Materials In Civil Engineering, v. 270, 2021.

ANICER- ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS DO BRASIL. Disponível em [https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2014/08/Release\\_Setor.pdf](https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2014/08/Release_Setor.pdf). Acessado em 07.08.2021

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: *Concreto de cimento Portland Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015. 67

\_\_\_\_\_. **NBR. 15575**: *Norma de desempenho. Emenda 1, 2021, complementa a ABNT NBR 15575-1:2021*, Rio de Janeiro, 2021.

ASTM C 1202, *Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, Philadelphia, 2017.

ASTM C 1152, - *Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*, 2017

BINICI, Hanifi; TAHIR, Shah; AKSOGAN, Orhan. *Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*. Journal of materials processing technology, v. 208, n. 1-3, p. 299-308, 2008.

BOUZOUBA, N.; ZHANG, M. MALHOTRA, Min-Hong. *Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash*. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 10, p. 1393-1402, 2001.

BRAGAGNOLO Lucimara; PAVAN, Eduardo Korff. *Aplicação de resíduos na fabricação de concreto: como técnicas analíticas de caracterização podem auxiliar na escolha preliminar do material mais adequado?* Revista Matéria, v.25, n.01, 2020, p. 1-15.

CHEN, Keyu; WU, Dazhi; XIA, Linling; CAI, Quimao; ZHANG, Zeing;. *Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement*. Construction and Building Materials. EDP Sciences, v. 279, 2021, p. 122-496.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina; CILLARI, G., RICCIARDI, P. et al. *The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review*. Sustainability, v. 12, n. 19, p. 7903, 2020.

CZARNECKI, L.; WOYCIECHOWSKI, Piotr. *Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, p. 173-181-173-181, 2013.

DA SILVA, F. G., HELENE, P., CASTRO-BORGES, P., LIBORIO, J. B. L. *Sources of Variations When Comparing Concrete Carbonation Results*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 21, ed. 7, p. 333-342, 2009

DANG, Viet Quoc; OGAWA, Yuko; BUI, Phuong Trinh; KAWAI, Kenji. *Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition*. Construction and Building Materials, v. 274, 2020, p. 1-13, 122016.

DEGEN, M. Klein. VIEIRA G. Lima. CALMON J. L. TEIXEIRA J. L. *Avaliação das propriedades mecânicas e do percentual de cloretos livres em*

- concretos produzidos com resíduos de rochas ornamentais, XII Congresso Latino americano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013.
- DIETRICH, Yustane Paula. *Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto*. 2015. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- GUIMARÃES, A.T. *Propriedades do Concreto Fresco*. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005, p. 793-827.
- GUO, Hui et al. *Durability of recycled aggregate concrete: review*. Cement and concrete composites, v.89, p 251-259, 2018
- HELENE, Paulo R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, 219 f. Tese de livre docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.
- JERÔNIMO, Valdith Lopes. *Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras*. (Tese) Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.
- MEYER, Christian; EGOSI, N.; ANDELA, C. *Concrete with waste glass as aggregate*. In: *Recycling and reuse of glass cullet*. Thomas Telford Publishing, 2001. p. 179-188.
- MORAES, Ruan Fabrício Gonçalves. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha*. Dissertação. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, 2016.
- NEGREDO, Alexandre Silveira. *Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos*. 2018. Tese de Mestrado. Depto de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Tecnologia de Brasília, Brasília, DF, 129p.
- NEVILLE, Adam. M. *Propriedades do Concreto*. Tradução de Salvador E. Giammusso ed. em inglês. São Paulo: Pini, 1982, 750 p. *Propriedades do concreto*. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997, 182 p.
- OLIVEIRA, Carla Dabian. *Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar*. Programa de Pós graduação em Eng civil, UFMG, 2018.
- PASSOS, L; MORENO JUNIOR, A. L.; GOMES, C. E. M. *Durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo proveniente de resíduo de cerâmica vermelha*. Revista Matéria, v.25, n.2, 2020
- PETRUCCI, Eládio G. R. *Concreto de Cimento Portland*. 5. ed. rev. Porto Alegre: Ed. Globo, 1978, 306 p.
- PIETROBON, Marina. PEINADO, Hugo Sefrian . VANDERLEI, Romel Dias. *Análise da penetração de cloretos em concreto autoadensável com cinza do bagaço da cana de açúcar, sílica e filer calcário*. Revista de Engenharia e Tecnologia v.10, n 2,2018.
- RAMEZANIANPOUR, A.A.; MAHDIKH ANI, Mahdi; AHMADIBENI, G. H. *The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes*. *International Journal of Civil Engineering*, 2009, 7(2), 83-91.
- RATTANACHU, Pokpong ;TOOLK AS IKORN, Prajak; TANGC, Weerachart; JATURAPITAKKUL, Chai. *Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder*. *Cement and Concrete Composites*, v. 108, p. 103533, 2020.
- RIBEIRO, D., & Ribeiro, D. *Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos*. In: RIBEIRO (Ed.). *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*, 2ª ed. São Paulo: Elsevier, cap. 6, p. 125-158, 2018.
- SACILOTO, Adriano Pedroso. *Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura*. Dissertação. UNIVERSIDADE Federal de Santa Maria Centro de Tecnologia - Programa de pós-

graduação em engenharia civil, 2005

SALONI, P.; Yee Y. L.; Thong M. Pham, Jatin. Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studie. *Construction Building* v283, 10 May 2021, 122795

SILVA, Carla Mabel Medeiros de Albuquerque. CAPUZZO, Silva Valdirene Maria. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura de dois estágios*. *Revista Matéria*, v.25, n.1, 2020.

SILVA, Stefano, EVANGELISTA, Luís, BRITO, Jorge. *Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates*. *Construction and Building Materials*. v. 272, 2021.

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

SINGH, MANPREET; SRIVASTAVA, ANSHUMAN; BHUNIA, DIPENDU. Potential applications of marble dust in industrial use by characterization techniques—A review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, v. 5, n. 3, p. 99-106, 2016.

SOARES, S. M. *Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, 2021.

SOMNA, Rattapon 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, n. 1, p. 16-22, 2012.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. Douglas; THOMAS, M. D. A. *Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review*. 1997.

TEIXEIRA, Fernando Ritiele. *Concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do*

*beneficiamento de rochas ornamentais: Análise quanto à ação de íons cloreto*. 2019.142f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019

TORGAL, Fernando Pacheco. *Propriedades de resistência à compressão e durabilidade da cerâmica Resíduos de concreto à base de resíduos*. *Materiais e Estruturas* (2011) 44: 155-167.

TROIAN, Aline. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto*. 129p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

VÁZQUEZ, Enric; BARRA, Marilda; CRISTIA, Diego Aponte; VALLS, Jimenez Susanna et al. *Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environments*. *Construction and Building Materials*, v. 67, p. 61-67, 2014.

WANG, Dezhi, ZHOU, Xiangming, BO, Fu, ZHANG, Lirong et al. *Chloride ion penetration resistance of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and chloride attack*. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 740-747, 2018.

WANG, Dezhi, ZHOU, BO FU, Xiangming, ZANG Lirong. WHITING, David. *Rapid Measurement of the Chloride Permeability of concrete*. *Public Roads*, v. 45, n. 3, 1981, p. 101-102.