

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

MARINA CARTAXO BRAGA MORAIS DE OLIVEIRA
VITÓRIA KAROLINE SILVA DE MORAIS

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE
RESÍDUOS DE TIJOLO MOÍDO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA
FRENTE À CORROSÃO POR CLORETOS**

Cajazeiras-PB
2023

MARINA CARTAXO BRAGA MORAIS DE OLIVEIRA
VITÓRIA KAROLINE SILVA DE MORAIS

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE
RESÍDUOS DE TIJOLO MOÍDO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA
FRENTE À CORROSÃO POR CLORETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil, sob
Orientação do Prof. Dr Robson Arruda dos
Santos.

Cajazeiras-PB
2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

O48d Oliveira, Marina Cartaxo Braga Morais de.
Desempenho de concretos com elevados teores de resíduos de tijolo moído e adição de cal hidratada frente à corrosão por cloretos / Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira, Vitória Karoline Silva de Morais. - 2023.

25f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

1. Construção civil. 2. Concreto. 3. Resíduo de tijolo. 4. Corrosão. I. Morais, Vitória Karoline Silva de. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUOS DE TIJOLO MOÍDO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA FRENTE À CORROSÃO POR CLORETOS

MARINA CARTAXO BRAGA MORAIS DE OLIVEIRA

marina.cartaxo@academico.ifpb.edu.br

VITÓRIA KAROLINE SILVA DE MORAIS

karoline.vitoria@academico.ifpb.edu.br

ROBSON ARRUDA DOS SANTOS

robson.santos@ifpb.edu.br

RESUMO

Com o aumento da demanda de concreto, surge a necessidade de utilização de concretos de alta qualidade e menor consumo de cimento, visto os esforços atuais de reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão da armadura embutida em concretos com baixo consumo de cimento, substituído por resíduo de tijolo moído (RTM) e adição de cal hidratada. Os concretos foram dosados utilizando técnicas de empacotamento de partículas, com consumo de cimento de referência em torno de 380 kg/m³. Foram estudados três concretos com substituição do cimento, com barras de aço de 6,3 mm, T150, T150 5% e T150 10%, consumo médio de cimento de 150 kg/m³, e adições de 5% e 10% de cal, para verificar a influência desta na alcalinidade do concreto. Para analisar o tempo de despassivação foi realizado monitoramento eletroquímico ao final de cada ciclo de imersão/secagem em solução de NaCl. Os resultados mostraram bom desempenho dos concretos com RTM, todos acima de 40 MPa aos 28 dias, sem diferença estatística com a adição de cal. Os índices de ligante (IL) mostram que o empacotamento dos agregados e o efeito filer/pozolânico do RTM foram significativos, com resultados de IL abaixo de 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹. O monitoramento dos concretos não apresenta medidas de barras em corrosão, com destaque aos níveis de densidade de corrente do concreto T150 10%, em que os 10% de cal foram suficientes para melhorar o filme passivo das barras aos níveis encontrados no concreto de referência.

Palavras-Chave: Resíduo de tijolo moído. Corrosão. Concreto. Empacotamento.

ABSTRACT

The increase in the demand for concrete develops the need to use high quality concrete and lower cement consumption, given the current efforts to reduce CO₂ emissions into the atmosphere. This work aims to evaluate the corrosion resistance of reinforcement embedded in concrete with low cement consumption, replaced by ground clay bricks waste (GCBW) and the addition of hydrated lime. The concretes were dosed using particle packing techniques, with reference cement consumption around 380 kg/m³. Three concrete compositions (T 150, T 150 5% and T 150 10%) with cement replacement were studied, with 6,3 mm steel bars, average cement consumption of 150 kg/m³ and additions of hydrated lime at levels of 5% and 10%, to verify its influence on the alkalinity of the pore solution. Electrochemical monitoring was carried out to analyze the depassivation time at the end of each immersion/drying cycle in NaCl solution. The results showed good performance of the concretes with GCBW, all above 40 Mpa at 28 days, with no statistical difference with the addition of hydrated lime. The binder indices (BI) show that the packing of aggregates and filer/pozzolanic effect of the GCBW reveal significant effects, with BI results below 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹. The monitoring of the concretes does not show measurements of the bars under corrosion, emphasizing the current density levels of T 150 10%, in which 10% of hydrated lime was sufficient to improve the passive film of the bars to the levels found in the reference concrete.

Keywords: Clay bicks waste. Corrosion. Concrete. Particle packing.

1 INTRODUÇÃO

Para Belato (2013), o cimento é um dos principais *commodities* mundiais, sendo um material de construção essencial, pois sua importância se dá pelo fato de suas diversas propriedades, como moldabilidade, hidráulica e elevada resistência, como também pelo papel fundamental em uma grande revolução na construção civil, além de ser conquistado com facilidade na natureza por meio de matérias-primas.

No entanto, Rebmann (2011) afirma que as consequências das estimativas que apontam para a elevação do consumo de cimento se refletem no aumento do consumo de energia e emissão de CO₂, oriundo, principalmente, da decomposição em óxidos dos carbonatos presentes no calcário durante a produção do cimento. O mesmo autor discute que a preocupação em reduzir o consumo de cimento ultrapassa as esferas ambiental e técnico-econômicas, tem relação com a sustentabilidade da cadeia produtiva do cimento. Dessa maneira, a indústria cimenteira busca por novas tecnologias que em nada modifiquem a qualidade do produto final.

À vista disso, a confecção de concretos que utilizam Resíduos da Construção Civil (RCC) vem sendo estudada desde o fim da Segunda Guerra Mundial, justificada pela conservação de matérias-primas finitas, e redução do consumo de energia (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002).

A inclusão de materiais pozolânicos na mistura do concreto reduz a demanda de cimento, além de reduzir o tamanho dos poros, permeabilidade, retração e fluência, podendo melhorar significativamente propriedades como: resistência à compressão, tração e flexão e o módulo de elasticidade do concreto de acordo com o nível de substituição pelo material (KAVITHA *et al.*, 2015). Ao reduzir a demanda de cimento, o concreto fica mais barato, por se tratar do componente mais caro de sua mistura.

De acordo com Vejmelková *et al.* (2012), os minerais argilosos se tornam altamente reativos quando passam por processo de queima em altas temperaturas, que variam entre 600°C e 900°C e depois moídos até a finura do cimento, além de que, se forem misturados com hidróxido de cálcio, sofrem reação pozolânica, formando compostos com maior resistência e durabilidade. Apesar da variabilidade nas composições destes resíduos, como a composição da matéria-prima e temperatura de queima, que agem de forma positiva nas características do concreto, as reações pozolânicas podem favorecer uma estrutura mais densa, homogênea e pouco permeável (VIEIRA, 2005).

Além da utilização de finos reativos ou não, uma alternativa para compensar a redução de cimento nos concretos é a realização do empacotamento de partículas dos agregados, e, quando possível, também dos finos, que resultará em mistura com menos vazios intergranulares, consequentemente, necessitará de um menor volume de pasta para preenchê-los. Os modelos de empacotamento baseiam-se na ideia de que os grãos maiores formam vazios que vão sendo progressivamente preenchidos por grãos menores, que resultará em uma alta densidade pela diminuição do volume de vazios entre os grãos (DAMINELI, 2013).

Uma alternativa de finos que pode atuar tanto com atividade pozolânica, como efeito filer na matriz cimentícia é o resíduo de tijolo moído (RTM) (SANTOS *et al.*, 2021). Este resíduo pode ter origem na própria produção, uma vez que as peças quebradas não retornam ao ciclo produtivo, tal qual no canteiro de obras.

O RTM já vem sendo estudado como adição mineral em concretos, contudo, poucos trabalhos avaliam o impacto na alcalinidade da solução de poros dos concretos com a substituição do cimento em níveis elevados, responsável pela proteção química à corrosão das barras de aço no concreto armado (SANTOS, 2022).

O processo corrosivo pode ocorrer por carbonatação ou ação de íons de cloreto. Os íons cloreto, que se originam da água do mar ou de poluentes ambientais, podem penetrar no interior da massa do concreto por difusão através da água contida em poros saturados total ou parcialmente, esses íons são capazes de dissolver a película passivadora do aço (FUSCO, 2008).

A corrosão de armaduras induzida por íons de cloreto representa um dos problemas mais graves de durabilidade de estruturas de concreto (YILDIRIM; ILICA; SENGUL, 2011). Quando os cloretos são penetrados em estruturas de concreto armado tornam-se responsáveis pela corrosão da

armadura, e assim, diminuem sua vida útil. O tempo necessário para que os íons alcancem a armadura depende do mecanismo de intrusão, da concentração externa de cloretos e da microestrutura do concreto (ANDRADE, 1993; JERÔNIMO, 2014).

Assim, esse estudo objetiva analisar a influência do RTM no tempo de iniciação da corrosão em barras de aço CA-50, 6,3mm, embutidas em concretos com elevados teores de substituição do cimento pelo referido resíduo. Foi avaliada, também, a adição de cal hidratada nos níveis de 5% e 10%, com o objetivo de compensar a perda de alcalinidade nos concretos. Atrelado ao estudo das propriedades do concreto quanto à corrosão de armaduras, a relevância deste trabalho se dá pela incorporação do resíduo de tijolo moído como substituto parcial do cimento, reduzindo impactos ambientais gerados pela emissão de CO₂ na produção do clínquer, preenchendo uma lacuna na literatura em relação à durabilidade de concretos com baixo consumo de cimento Portland.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção diversas literaturas são abordadas para embasamentos dos aspectos relativos ao tema, selecionando os estudos mais significativos que suportem as ideias para desenvolvimento do trabalho.

2.1 Concretos com baixo consumo de cimento

É fato que, a partir da evolução dos sistemas construtivos e econômicos, o consumo de cimento eleva-se proporcionalmente, inclusive no Brasil, visto a predominância de estruturas de concreto. A estimativa de Müller e Harnisch (2008) é que até o ano de 2030 a produção global de cimento seja pelo menos 5 vezes maior que em 1990, aproximando-se de 5 bilhões de toneladas em todo o mundo.

Em concordância com esse aumento, em EPE & IDDRI (2008), é apontado que em 2050 o consumo anual de cimento pode ser em torno de 4,9 a 5,7 bilhões de toneladas por ano. Dessa forma, a principal consequência desse consumo é o aumento de emissões de CO₂, já que a produção de cimento é um processo de alta demanda energética.

A emissão de CO₂ acontece em decorrência, principalmente, da decomposição de óxidos de carbonatos presente no calcário, processo denominado como calcinação; já outra parcela, vem da combustão dos combustíveis que devem aquecer os fornos até a temperatura necessária para produção de clínquer. O teor de clínquer trata-se de um dado importante que influencia na variação da emissão de CO₂, e muda conforme o tipo de cimento (REBMANN, 2011).

Considerando os processos construtivos com concreto, e visando a redução de emissões de CO₂, Mehta (2008) cita que há a possibilidade por meio de menor consumo de concreto nas estruturas, menor consumo de cimento no concreto e menor consumo de clínquer no cimento. Com relação aos cimentos com menor teor de clínquer, torna-se necessário o aprimoramento das dosagens dos concretos, para que se potencialize a eficiência do ligante e mantenha, ou melhore, a durabilidade das estruturas.

Rebmann (2016) cita algumas formas de reduzir o consumo do cimento, entre elas: o empacotamento de partículas, em que o máximo de vazios deve ser preenchido, uso de materiais pozolânicos, escolha adequada dos finos, agregados e da mistura. A redução de cimento no concreto, através desses métodos, por exemplo, pode permitir a redução de CO₂ de uma forma que não eleve os custos finais no concreto.

O consumo de cimento é expresso, tradicionalmente, a partir da relação entre a massa de cimento que se utiliza pelo volume de concreto produzido (BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2018). Nos mais variados países, incluindo o Brasil, adota-se o Sistema Internacional de Medida, apresentando esse consumo em kg/m³, em que os consumos convencionais variam entre 250 a 750 kg/m³ (REBMANN, 2011).

No que se refere aos concretos com alto consumo de cimento, deve-se pontuar que o maior consumo de ligante não implica em uma melhora de desempenho, quando comparados aos concretos de baixo teor de cimento. Inicialmente, mantida a relação água/cimento é esperado que a maioria das propriedades não sofra alteração, quando se reduz o consumo de cimento (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012).

De fato, vários trabalhos já demonstraram que é possível produzir concretos com baixo consumo de cimento e características mecânicas adequadas para aplicações estruturais. El-Dieb e Kanaan (2018) estudaram o pó de resíduo cerâmico como uma alternativa para substituir o cimento no concreto, testando em diferentes proporções; como resultado, ao substituir 10% do cimento pelo pó do resíduo melhorou-se a resistência, ao substituir entre 10% e 20% houve melhora da trabalhabilidade, já 40% de substituição proporcionou aumento à durabilidade.

Oner, Akyuz e Yildiz (2005) experimentaram um concreto que substituiu parcialmente o cimento por cinzas volantes (material pozzolânico). O teor de cimento das misturas com baixo consumo de cimento variou entre 200 kg/m³ e 320 kg/m³; como resultado, o estudo mostrou que a resistência aumentou conforme o emprego da quantidade de cinza volante até um valor ótimo, que correspondeu a cerca de 40% do cimento.

No estudo desenvolvido por Pacheco-Torgal e Jalali (2010), em que o cimento foi substituído parcialmente por resíduos cerâmicos na mistura do concreto, os resultados delimitaram que quando se substituiu o cimento pelo resíduo em 20%, apesar de uma pequena perda de resistência, o concreto tem desempenho de forma mais durável, pontua-se também que as misturas de concreto com agregado cerâmico tiveram melhor desempenho quando comparadas ao concreto de controle em relação à resistência à compressão, absorção capilar de água, permeabilidade ao oxigênio e difusão de cloreto.

Na investigação realizada por Al-Hashem *et al.* (2022), foi avaliada a utilização do material pozzolânico metacaulim como substituto parcial do cimento no concreto, e os resultados apontaram o aumento de resistência à compressão a partir do aumento da porcentagem de metacaulim adicionado na mistura, e com o tempo de cura.

2.2 Empacotamento de partículas

De acordo com Mc Geary (1961 *apud* Ortega *et al.*, 1997), empacotamento de partículas consiste basicamente na seleção adequada dos tamanhos de partículas, e nas proporções entre as quantidades desse tamanho, de forma a obter misturas com densidades bem controladas. Em concordância, Oliveira *et al.*, (2000) expõem que, ao empacotar partículas, os vazios deixados por partículas de maior diâmetro são preenchidos por partículas de menor diâmetro, e o espaço entre essas partículas são preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Em 1892, R. Feret publicou o primeiro estudo sobre o empacotamento de partículas no concreto, e expôs a possibilidade de selecionar o agregado ideal para aumentar a qualidade do concreto, diminuir sua porosidade e, assim, tornar maior sua resistência (WANG; CHENGZHI; NINGSHENG, 1997). “Mesmo que o método seja de fácil entendimento, sua aplicação depende de uma modelagem matemática completa que determine o melhor arranjo geométrico entre as partículas” (LIMA *et al.*, 2016).

Para se obterem esqueletos granulares compactos, é necessário fazer o uso de modelos de empacotamento de partículas que forneçam as proporções e tamanhos adequados dos agregados, de modo a se obter o menor índice de vazios possível, à vista disso, existem diversos modelos em que cada um considera distintamente efeitos geométricos e de interação de grãos, obtendo diferentes valores de densidade de empacotamento (LONDERO *et al.*, 2017).

Modelo de Alfred

O Modelo de Alfred é conhecido como Modelo de Andreasen Modificado, e se trata de um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas (Equação 1), que considera as partículas individualmente, e Andreasen (Equação 2), que trata as partículas como distribuições contínuas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^{logr} - D_s^{logr}}{D_L^{logr} - D_s^{logr}} \right) \quad (1)$$

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad (2)$$

onde CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D , D_L é o diâmetro da maior partícula, D_S é o diâmetro da menor partícula, r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas, e q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Após análise comparativa entre os modelos de Furnas e Andreasen, algumas considerações foram adotadas, provando que ambos os modelos convergiam matematicamente para a mesma equação (OLIVEIRA *et al.*, 2000). A Equação 3 trata-se do modelo de Alfred (DINGER; FUNK, 1993).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (3)$$

Dinger e Funk (1993) mostraram a influência do coeficiente q no empacotamento, e puderam concluir que se o valor de q for 0,37, ou menor, então 100% do empacotamento seria possível para uma distribuição infinita dos grãos, enquanto isso, quando o valor de q estiver acima de 0,37, sempre haverá porosidade.

De acordo com Santos *et al.* (2021), uma distribuição otimizada de tamanho de partículas, com índice mínimo de vazios, pode ser obtida por testes (misturas sucessivas) ou por soluções numéricas.

O método de misturas sucessivas consiste em misturar uma determinada composição de agregados e calcular o índice de vazios por meio da massa unitária compactada da mistura e da massa específica de cada agregado, a partir disso, escolhe-se a mistura com menor índice de vazios. O processo limita-se à incessante mistura do agregado de maior dimensão com o agregado de diâmetro intermediário, essa mistura obtida é combinada com um agregado imediatamente menor, até que se obtenha a mistura final com o agregado de dimensão mínima. Esse método é indicado por diversos autores, que pesquisaram concretos convencionais e autoadensáveis (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Já o método de resolução numérica, com auxílio de softwares, pode ser utilizado para sucessivas gerações de diferentes curvas granulométricas (com base nas características dos agregados disponíveis). Para verificar a mistura com menor dispersão em relação à mistura ideal (modelos de Furnas e Andreasen modificados, por exemplo), utiliza-se o método dos mínimos quadrados, em que essa relação é verificada a partir da soma dos quadrados dos desvios de cada peneira (SANTOS *et al.*, 2021).

Na Tabela 1 é apresentada solução matemática para o caso de uma mistura com m agregados e n peneiras ou diâmetros.

Tabela 1 – Mistura em agregados.

Φ	pe (%)	pa_1 (%)	pa_2 (%)	...	pa_m (%)	pc (%)	Δ
Φ_1	pe_1	$pa_{1,1}$	$pa_{2,1}$	...	$pa_{m,1}$	pc_1	$\Delta_1 = pc_1 - pe_1$
Φ_2	pe_2	$pa_{1,2}$	$pa_{2,2}$	...	$pa_{m,2}$	pc_2	$\Delta_2 = pc_2 - pe_2$
...	
Φ_n	pe_n	$pa_{1,n}$	$pa_{2,n}$	...	$pa_{m,n}$	pc_n	$\Delta_n = pc_n - pe_n$
DM							$\sum \Delta_i^2$

Fonte: SANTOS *et al.* (2021).

Onde:

Φ_i = peneira/classe granulométrica “i”;

pe_i = porcentagem retida acumulada especificada para a peneira “i”, calculado pelo modelo Andreasen modificado;

$pa_{j,i}$ = porcentagem retida acumulada na peneira “i” para o agregado a_j ;

pc_i = porcentagem retida acumulada na peneira “i” para a combinação de agregados m ;

Δ_i = desvio entre o percentual acumulado dos agregados retidos na “i” e seu respectivo percentual acumulado retido recomendado pelo modelo matemático;

β_j = percentual do agregado a_j na combinação;

DM = desvio máximo, soma dos quadrados dos desvios individuais. Onde: i varia de 1 a n e j varia de 1 a m .

A Equação 4 complementa a Tabela 1.

$$pc_1 = \sum_j^m \beta_j p a_{j,i} \quad (4)$$

A otimização é realizada através de programação linear, na qual o objetivo é variar os coeficientes β_j até encontrar o valor de DM mínimo. Dessa maneira, não importa quantos sejam os agregados, sempre será obtida uma única solução que combine todos eles, resultando no esqueleto granular do concreto a ser dosado (SANTOS *et al.*, 2021). O desempenho das misturas, em termos de porosidade, está condicionado à escolha de agregados com distribuição de tamanhos complementares, que favoreça o empacotamento.

2.3 Adições

Segundo Koffs e Vendruscolo (2018), as adições minerais são materiais sólidos que alteram as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, influenciando, assim, nas suas propriedades reológicas. São descritos, em diversos trabalhos, que as adições minerais já são utilizadas há décadas, com o intuito de melhorar diversas características do concreto, como aumento da trabalhabilidade, aumento da resistência do concreto etc.

Com base nessa afirmação, vale salientar que, tratando de adições ao cimento, Dal Molin (2005) *apud* Koffs e Vendruscolo (2018) classificam as adições minerais em três grupos, conforme seu estado físico-químico, são eles: materiais pozolânicos, materiais cimentantes e filler. Os materiais pozolânicos, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), são definidos como materiais silicosos ou silicoaluminosos, sem características aglomerantes, mas quando entram em contato com água, ou se dividem, reagem com o hidróxido de cálcio, e originam propriedades aglomerantes; os materiais cimentícios são aqueles que formam produtos cimentantes, e quando utilizados em substituição ou adição do cimento Portland, torna-se mais rápida a hidratação; e, por fim, o filler, que conforme Nicotra *et al.* (2012), por ser um material que não possui reações químicas, auxilia de forma significativa no concreto quando utilizado em medidas corretas, pois tem efeito físico de empacotamento de partículas.

2.3.1 Cal hidratada

A cal trata-se de um aglomerante usado em argamassas, e age melhorando sua trabalhabilidade, aderência e rendimento (ROCHA, 2020). A cal hidratada é o tipo de cal mais usado na construção civil, e comumente é encontrado no mercado, trata-se de um pó de cor branca, resultado da combinação química dos óxidos anidros da cal virgem com a água (BOCK, 2012).

A NBR 7175 (ABNT, 2003) classifica a cal hidratada em três tipos: CH I, CH II e CH III e quanto à concentração de Cálcio e Magnésio. De maneira simplificada, uma cal mais pura trata-se da CH I, e a última, CH III, considerada mais impura. A adição de cal hidratada atua física e quimicamente na hidratação do cimento (HOPPE FILHO, 2008).

No estudo realizado por Heikal, El-Didamony e Morsy (2000), verificou-se que a cal acelera a taxa de hidratação do cimento, diminui a porosidade do concreto, além disso, os autores expõem que a reação pozolânica criada com a adição da cal foi responsável pelo aumento da resistência à compressão.

Anjos *et al.*, (2015) mostraram, em seu estudo, que as composições que continham cal hidratada aumentaram a resistência à compressão, justificado pela contribuição da cal na formação de C-S-H secundário ao reagir com o material pozolânico que continha na mistura, além disso, os autores verificaram que a adição de cal hidratada contribuiu para a redução da difusão de íons de cloreto.

Dal Ri (2002) estudou os efeitos da adição de cal hidratada em concretos, além do seu comportamento quanto à penetração de cloretos. Como resultado de sua pesquisa, as misturas que tinham adição de cal hidratada apresentaram maiores valores de resistência à compressão e maior permeabilidade a cloretos. Quanto à resistência à compressão, o estudo de Anjos *et al.*, (2015) valida o de Dal Ri (2002), no entanto, quanto à penetração de cloretos, os resultados se contradizem.

Em um terceiro estudo, realizado por Ozório e Isaia (2008), no qual avaliaram concretos que continham alto teor de cinza volante, foi verificado que a resistência à compressão aumentou nos traços que continham adições de cal hidratada, agindo como reposição do teor de hidróxido de cálcio; já quanto à penetração de cloretos, os traços com adição de cal hidratada demonstraram maior penetração de cloretos quando comparados aos que não tinha adição.

2.3.2 Resíduo de Tijolo Moído (RTM)

Para Fonseca (2010), nos concretos de alta resistência, a substituição parcial cimento por resíduo de tijolo moído é importante, pois, além de minimizar o risco de fissuração térmica, há uma maior uniformidade no produto. Para Sales e Alferes Filho (2014), a reciclagem do tijolo moído possui duas vertentes, sendo elas a utilização como agregados e a produção do pó, e por ser um material pozolânico, pode consistir em adições na fabricação de argamassas e concretos.

Com isso, Silva (2005) menciona, em sua pesquisa, que é importante analisar a composição mineralógica e química da matéria-prima, como também o processo de baixas ou altas temperaturas pelo qual a pozolana passou, e se todo o material está na mesma finura do cimento, pois é a partir disso que realizará ensaios que definirão a plasticidade, trabalhabilidade, hidratação do concreto.

Diversas pesquisas sobre o uso de resíduo de tijolo moído na produção de concretos e argamassas apresentam características pozolânicas. Gonçalves (2005) realizou a substituição do RTM em argamassa em porcentagens de 10%, 20%, 30% e 40%, e concluiu que a substituição de 20% obteve desempenho mais favorável e, em relação à resistência à compressão, não houve alterações significativas. Ainda, para manter a trabalhabilidade da argamassa de referência, adicionou superplastificantes nas misturas, e se observou que a substituição para a mistura de 10% não obteve alterações significativas.

Cordeiro e Désir (2010) dosaram concretos com a adição de 5%, 10% e 15% de argila calcinada à 650°C em substituição ao cimento Portland, e observaram que houve aumento da resistência à compressão de 20% e 40% em relação ao concreto de referência logo nos primeiros dias para os teores de 10% e 15%. Já no teor de 5%, não houve uma diferença significativa.

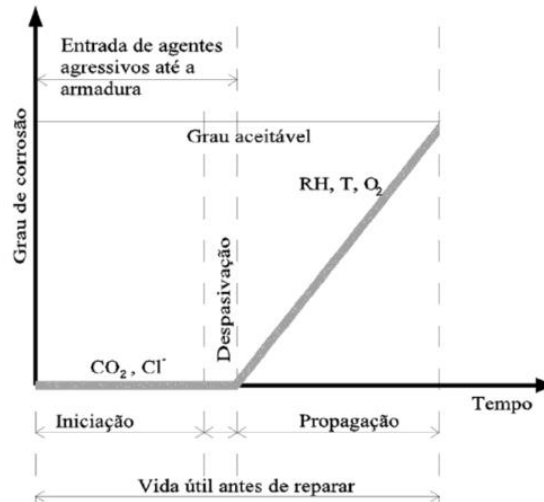
Jerônimo (2014) dosou concretos com adição de 10%, 20% e 30% de RTM em substituição também ao cimento Portland, e em seus ensaios notou que os melhores resultados foram para as relações a/agl 0,45, onde até os 28 dias percebeu-se melhor desempenho para os concretos de 10%, posteriormente de 20% e, por fim, 30% de substituição. Ao passar do tempo, a diferença torna-se mínima, evidenciando que em idades mais tardias esse resultado pode ser similar a todos os teores de RTM.

Ainda em relação a essa substituição parcial em argamassa, Araújo (2017), em sua pesquisa, realizou estudos com as porcentagens de 10%, 20% e 30% de substituição do cimento por RTM, e afirmou que, após sete dias, houve uma queda na resistência à compressão. Porém, para a mistura de 10%, essa queda foi de 5%, devido um maior volume e finura do RTM, densificando a matriz. Levando em consideração os 28 dias, as argamassas contendo um teor de 10% e 20% do RTM apresentaram uma maior resistência à compressão em relação ao corpo de referência, devido aos tamanhos dos grãos e dos poros.

2.4 Corrosão induzida por cloretos

Uma das grandes responsáveis pela deterioração de estruturas de concreto é a corrosão de suas armaduras, que diminuem a sua vida útil e desempenho (JERÔNIMO, 2014). Na Figura 1 é apresentado o modelo fenomenológico da vida útil da estrutura proposto por Tuutti (1982), que continha apenas duas fases: iniciação e propagação, adaptado por Meira (2017) para três fases: iniciação, despassivação e propagação.

Figura 1 – Adaptação do modelo de corrosão de armaduras de Tuutti (1982).



Fonte: Meira (2017).

A fase inicial da corrosão é caracterizada pela entrada de agentes agressivos até a fase de despassivação da armadura; vários são os fatores que influenciam essa fase, como: tipo de cimento, porosidade superficial, nível de agressividade do meio que a estrutura se encontra, e, sobretudo, da presença de cloretos e do CO_2 . Já na fase de propagação, desenvolvem-se as reações de corrosão, que podem ser mais ou menos rápidas em função de variáveis que controlam a cinética das reações (MEIRA, 2017).

O mesmo autor analisou que o momento de despassivação do aço envolve alterações eletroquímicas na superfície do aço, e requer um período de tempo para que ocorra de forma consistente, sendo assim, inseriu essa nova fase intermediária no modelo anteriormente proposto apenas por Tuutti (1982).

Quando existe cloreto livre em uma estrutura de concreto armado, parte desses cloretos se combinam com aluminatos presentes no cimento. A chegada de íons de cloreto à região próxima da armadura não necessariamente representa o início do processo de corrosão. A partir de uma determinada concentração de cloretos, a armadura começa a sofrer despassivação, ressaltando que essa quantidade é conhecida como limite crítico de cloretos, e depende de variáveis do meio ambiente, características dos materiais e a interface do aço-concreto (MEIRA, 2017; JERÔNIMO, 2014).

Algumas técnicas eletroquímicas podem ser usadas para acompanhar a corrosão na armadura do concreto, como o potencial de corrente e densidade de corrente de corrosão e resistividade, o uso de técnicas como essas permite a avaliação cinética instantânea da corrosão e uma avaliação das reações parciais (TORRES, 2011).

Potencial de Corrosão

Jerônimo (2014) diz que a técnica de potencial de corrosão consiste em medir a diferença de potencial entre um eletrodo de trabalho (armaduras) e um eletrodo de referência (exemplo: calomelano saturado, cobre-sulfato de cobre ou prata-cloreto de prata) através de um voltímetro de alta impedância de entrada. O seu resultado se dá na forma de mapeamento de potenciais.

De acordo com a C876 (ASTM, 1991), a interpretação dos resultados se dá pela Tabela 2, onde sugere-se a probabilidade de corrosão em relação ao potencial de corrosão medido. Ressaltando que esses valores podem ter um valor de erro em função das condições de ensaio.

Tabela 2 – Relação entre potencial de corrosão e probabilidade de corrosão.

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre-ESC (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que -350	95
Mais positivo que -200	5
De -200 a -350	Incerta

Fonte: ASTM (1991).

Segundo Jerônimo (2014), o revestimento do concreto pode causar diminuição na leitura real dos valores de potencial, devido às medidas de corrosão não serem realizadas diretamente no aço. Com isso, há diversos fatores que interferem na medida de potencial, como: camadas superficiais de concreto de alta resistência, a qualidade do concreto, frente de carbonatação e cloretos e a profundidade de revestimento. O revestimento afeta a leitura do potencial, pois o potencial lido é o que chega na superfície do concreto; já a qualidade do concreto faz relação com o fator a/c baixo, resultando em alta resistividade elétrica; e a frente de carbonatação e os cloretos interferem de forma contrária na leitura do potencial.

Apesar desses fatores influenciarem na leitura de potencial, esse ensaio é eficiente, quando necessário, para realizar monitoramentos ao longo do tempo.

Resistência de Polarização

Helene (1993) define a resistência de polarização como a inércia que o sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão frente a uma polarização imposta, e isso revela que quanto maior a resistência, menor será a velocidade de corrosão.

Segundo Vieira (2003), esse método utiliza uma diferença de potencial externa aplicada à armadura, que efetua uma polarização ao redor do potencial de eletrodo original, esse sendo definido pelo eletrodo de referência. Quando aplicada a diferença de potencial externa, será registrada a variação de corrente, que poderá ser medida por um procedimento potencioestático, tendo como resultado um gráfico que apresenta corrente e diferença de potencial, e sendo definida a resistência à polarização, como o quociente entre os incrementos de potencial e corrente.

Com isso, Cascudo (1997) cita que para garantir que o potencial do eletrodo retorne ao seu valor inicial é importante que utilize pequena polarização, que são baixos valores de sobretensão. Por isso, durante o monitoramento das armaduras talvez seja necessário realizar diversas análises, para que não ocorra perturbação ao sistema.

Densidade de Corrosão

A densidade de corrente de corrosão é uma unidade que relaciona a corrente elétrica impressa nas barras pela área de aço submetida ao ensaio (LOPES *et al.*, 2018).

Vagheti (2005) menciona que, ao contrário do potencial de corrosão, a técnica eletroquímica de resistência de polarização informa quantitativamente o efeito da corrosão do aço nos concretos, avaliando a cinética do fenômeno ao longo do tempo, por meio da densidade de corrente de corrosão. O acompanhamento dessa técnica geralmente é realizado para o período de indução e aceleração da corrosão.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Nessa seção serão abordadas as propriedades dos materiais e aspectos experimentais, para que a pesquisa possa se concretizar.

3.1 Materiais

Para produzir o concreto, foi utilizado o cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018a). Este cimento constitui-se de 90% a 100% de clínquer com sulfatos de cálcio, podendo conter de 0% a 10% de material carbonático. O RTM foi preparado por trituração e moagem de resíduos de tijolos da região de João Pessoa-PB. Os agregados utilizados foram de diferentes granulometrias, sendo para os agregados miúdos areias do tipo fina, média e grossa, e para os agregados graúdos, brita com diâmetro máximo característico (DMC) igual a 9,5 mm.

Foi utilizado o aditivo superplastificante GCP ADVA 525, a base de policarboxilato. As armaduras empregadas no concreto foram barras de aço-carbono, tipo Gerdau CA-50, nervuradas e com diâmetro nominal de 6,3 mm.

3.2 Métodos

Toda a caracterização dos materiais foi baseada em normativas em vigor.

3.2.1 Caracterização dos materiais

Cimento e RTM

As composições do CP V-ARI e do RTM podem ser vistas na Tabela 3. O ensaio de massa específica obedeceu à NBR 16605 (ABNT, 2017). Além disso, foi realizado ensaio de granulometria a laser em todos os finos, através do equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: 0.10 μm - 500.00 μm / 100 Classes.

Cal

Foi utilizada cal hidratada com alto grau de pureza, tipo CH-I, como ligante complementar para compensar parte da alcalinidade perdida do sistema com a retirada do cimento Portland, assim como favorecer a reatividade do RTM.

Agregados

Para o estudo, considerou-se: areia grossa a fração retida na peneira de 1,2 mm, areia média a passante pela 1,2 mm e retida na 0,6 mm, e a areia passante de 0,6 mm foi denominada areia fina. E os ensaios realizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio normalizados utilizados.

Propriedades	Material	Norma
Granulometria	Agregados	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa específica	Agregado miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2002)
Massa específica	Agregado graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2009)

Fonte: Autores (2023).

3.2.2 *Dosagem do concreto*

Empacotamento de Partículas

Para garantir o controle na dosagem do concreto, utilizou-se o software Q-Mix, desenvolvido por Santos (2022), que calcula curvas pelo modelo Andreasen Modificado. Após a inserção dos dados de entrada, o programa entregou o CPFT (modelo Andreasen Modificado) e a combinação linear foi iniciada; após todas serem testadas, o cálculo foi finalizado e determinado a melhor proporção dos agregados pelo menor desvio (RSS). A Figura 2, apresenta o passo a passo do funcionamento da dosagem com empacotamento no Q-Mix, onde a confecção do traço considerando um “m” intermediário é a soma dos agregados do traço unitário.

Figura 2 – Dosagem com empacotamento realizado pelo software Q-Mix



Fonte: Autores (2023)

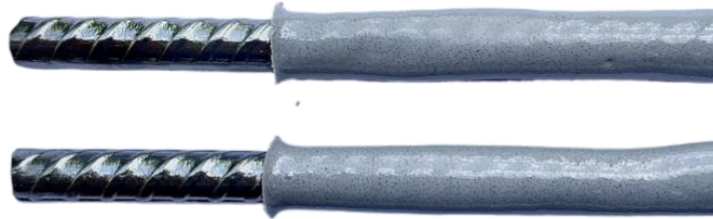
Tratamento das Barras de Aço

As barras inicialmente apresentavam aspectos corrosivos superficiais decorrentes de agentes naturais, o seu tratamento foi feito antes da exposição aos cloretos para garantir que não modificasse significativamente os resultados de seu comportamento eletroquímico e a sua resistência à corrosão.

Sendo assim, foi realizada uma decapagem mecânica utilizando uma escova rotatória de palha de aço, até que não se notasse mais produtos de corrosão visíveis na superfície. Após limpeza, foi delimitada a área de exposição do aço, que correspondeu a 3,0 cm de uma das extremidades das barras e, então, cobriu-se com resina bicomponente de base epóxi, como apresentado na Figura 3.

Para ser usada no corpo de prova, esperou-se a resina secar por 24 horas.

Figura 3 – Barras de aço tratadas.



Fonte: Autores (2023)

Preparo, cura e moldagem de corpos de prova

Para mistura do concreto, a sequência de inserção dos materiais na betoneira foi: 100% do cimento e 80% da água, 20% da água e 100% do aditivo superplastificante, 100% do agregado graúdo (aos poucos), 100% da areia grossa (aos poucos), 100% da areia média (aos poucos) e 100% da área fina (aos poucos), a betoneira permaneceu ligada entre 3 e 4 minutos até que o aspecto da mistura fosse homogêneo e coeso.

Ao final, para cada traço feito e adensado com vibrador mecânico, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões (10 x 20) cm, e 6 corpos de provas cúbicos de dimensões (8 x 8 x 8) cm, nesses foram dispostas duas barras com cobertura de 1,5 cm. A partir dessa geometria, o comprimento exposto de aço foi de 3 cm, que resulta em uma área de aço de 6,25 cm².

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, conforme a Figura 4, identificados e levados à cura. Os cilíndricos tiveram sua cura realizada em imersão com água saturada com hidróxido de cálcio e os cúbicos foram colocados em uma simulação de câmara úmida.

Figura 4 – Corpos de prova desmoldados com substituição de 60% do ligante por RTM.



Fonte: Autores (2023)

Características dos Traços

Foram executados ao total 4 traços de concreto, sendo um deles o de referência, em que não foi usado nenhum tipo de adição. Já os traços com RTM não tiveram variação na porcentagem de substituição, fixada em 60% do ligante (380 kg/m³) em resíduo cerâmico. A quantidade de cal foi

definida em adição ao valor de referência do cimento (380 kg/m³), nos níveis de 5% e 10%. Na Tabela 4 estão dispostos os consumos dos materiais por metro cúbico de concreto

Tabela 4 – Consumo dos materiais de cada Traço.

Concretos	Consumo em kg/m ³							
	Cimento	RTM	Cal hidratada	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita	Água
T150	152,58	233,71	-	220,18	587,17	112,02	919,38	167,84
T150 5%	151,31	231,76	19,15	218,35	582,28	111,09	911,72	166,44
T150 10%	150,06	229,85	37,99	216,55	577,47	110,17	904,19	165,07
REF	380,11	-	-	218,56	574,92	109,28	902,76	190,06

Fonte: Autores (2023)

3.2.3 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial dos corpos de provas cilíndricos foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b), nas idades de 7 e 28 dias, através da prensa hidráulica do IFPB, *Campus Cajazeiras*.

3.2.4 Índice de ligantes

A obtenção de um concreto de baixo impacto ambiental vai além da simples substituição do clínquer por adições minerais. Para produzir concretos mais eficientes em termos ambientais é necessário reduzir o consumo de ligantes ao mesmo tempo em que se aumenta ou mantém o desempenho mecânico.

Com base nessa premissa, Damineli *et al.* (2010) propuseram um indicador, denominado índice de Ligantes (IL), que avalia a eficiência dos concretos considerando a quantidade de ligante necessária para alcançar uma resistência mecânica de 1 MPa, medido em kg.m⁻³.Mpa⁻¹.

Assim, o Índice de Ligantes permite uma análise mais abrangente da eficiência dos concretos, levando em conta tanto o aspecto ambiental quanto o desempenho mecânico.

$$IL = \frac{C}{R} \quad (5)$$

Onde:

IL = índice de ligantes, em kg.m⁻³.Mpa⁻¹;

C = consumo de cimento (kg/m³);

R = resistência à compressão (Mpa).

3.2.5 Ensaio de imersão e secagem

Os corpos de prova cúbicos, após desmoldados e passarem por cura úmida até o sétimo dia, tiveram 4 de suas faces isoladas com pintura bicomponente de base epóxi. Na sequência foram cobertos com filme de PVC em duas camadas, e depois embalados a vácuo com papel impermeável, após isso permaneceram em ambiente de laboratório por, aproximadamente, 58 dias, com o objetivo de se atingir uma microestrutura mais estável antes dos ensaios.

Os corpos de prova passaram por ciclos de imersão e secagem, que é caracterizado por submeter os corpos de prova a períodos de imersão total em solução agressiva e posterior secagem em estufa. Para imersão foi utilizada a solução de cloreto de sódio (NaCl) a 1 Molar, concentração mais empregada na literatura (PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006). Os ciclos adotados foram semanais, onde, durante esse período, por 2 dias, os CP ficam em imersão, e por 5 dias em estufa, também empregados na literatura (CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST *et al.*, 2011). A secagem foi realizada em estufa com temperatura de 40°C (VIEIRA, 2003; TAVARES; COSTA; ANDRADE, 2006; KISHIMOTO, 2010).

3.2.6 Monitoramento eletroquímico

Para monitorar eletroquimicamente, foi utilizada a técnica de resistência de polarização com compensação da queda ôhmica e de medidas do potencial de corrosão em circuito aberto, ao final de cada ciclo de imersão e secagem.

Esta técnica é amplamente empregada em estudos sobre o teor crítico de cloretos, com o objetivo de detectar a despassivação das armaduras (ANGST; VENNESLAND, 2009; ANGST *et al.*, 2011; MEIRA *et al.*, 2014).

O equipamento utilizado para as leituras foi um potenciostato de bancada, modelo VersaSTAT 3, Princeton Applied Research e uma gaiola de Faraday, para evitar interferências externas, de acordo com metodologia utilizada por Ferreira (2015).

As medidas foram executadas seguindo a recomendação normativa americana C876 (ASTM, 1991). Nos corpos de prova que foram monitorados foi feito um isolamento em 4 faces, para garantir o fluxo unidirecional dos íons de cloreto.

Potencial de Corrosão em Circuito Aberto

Para as medidas de potencial de corrosão, foi utilizado o eletrodo de referência de Cu/CuSO₄ (ESC) e um contra eletrodo de aço inoxidável.

Resistência de Polarização com Compensação da Queda ôhmica

Essa técnica é utilizada para determinar a velocidade instantânea da corrente de corrosão na barra de aço. A Equação 6 de Stern e Geary foi utilizada para obter os valores de corrosão (i_{corr}).

$$i_{corr} = \left(\frac{B}{R_p} \right) \quad (6)$$

Para obter a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}) foi utilizada a Equação 7, que relaciona a corrente de corrosão e a área polarizada da armadura.

$$I_{corr} = \left(\frac{i_{corr}}{A} \right) \quad (7)$$

Ressalta-se que B é uma constante de corrosão (mV); R_p é a resistência de polarização linear ($\Omega \cdot \text{cm}^2$), e A é a área de exposição da armadura (cm^2).

A compensação da queda ôhmica (R_c) foi feita pela técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), quando utilizada essa técnica a variável R_p da expressão de Stern e Geary passará a significar a Resistência à polarização corrigida por R_c , calculada de acordo com a Equação 8.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I_{medida}} - R_c \quad (8)$$

4 RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 Caracterização dos materiais

Cimento e RTM

As composições do CP V-ARI e do RTM podem ser vistas na Tabela 5. O ensaio de massa específica obteve como média 3,04 g/cm³ para o cimento e 2,61 g/cm³ para o RTM.

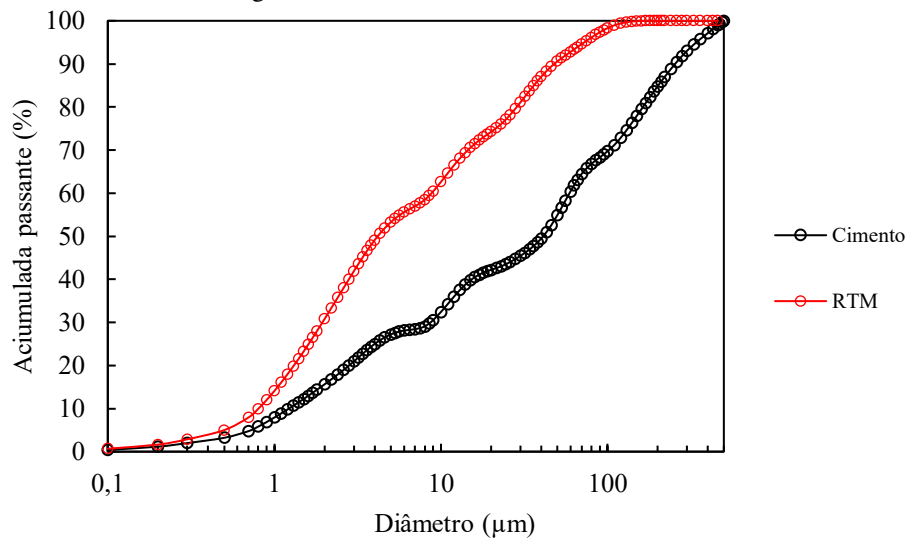
Tabela 5 – Composição dos Óxidos (%) para o CP V-ARI e RTM.

CP V-ARI												
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	BaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	ZrO ₂
22,11	3,99	3,41	1,97	0,96	0,43	0,37	62,25	0,09	0,64	3,51	0,03	-
RTM												
64,24	18,25	9,68	1,82	1,65	1,40	1,10	0,86	0,28	0,19	0,15	0,14	0,09

Fonte: Autores (2023).

A granulometria a laser em todos os finos tem resultado apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Granulometria a laser dos finos.

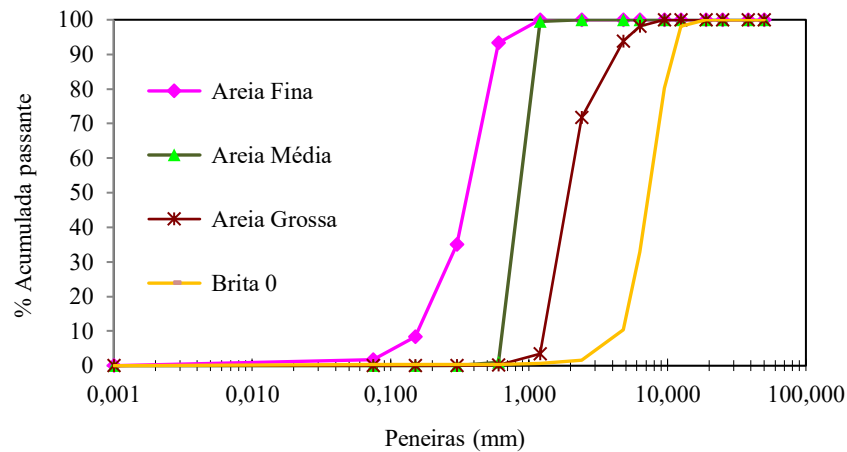


Fonte: Autores (2023).

Agregados

Na Figura 6 são apresentadas as curvas granulométricas, e na Tabela 6 o resumo das massas específicas calculadas dos agregados empregados no concreto.

Figura 6 – Curvas granulométricas dos agregados.



Fonte: Autores (2023).

Tabela 6 – Massa específica dos agregados.

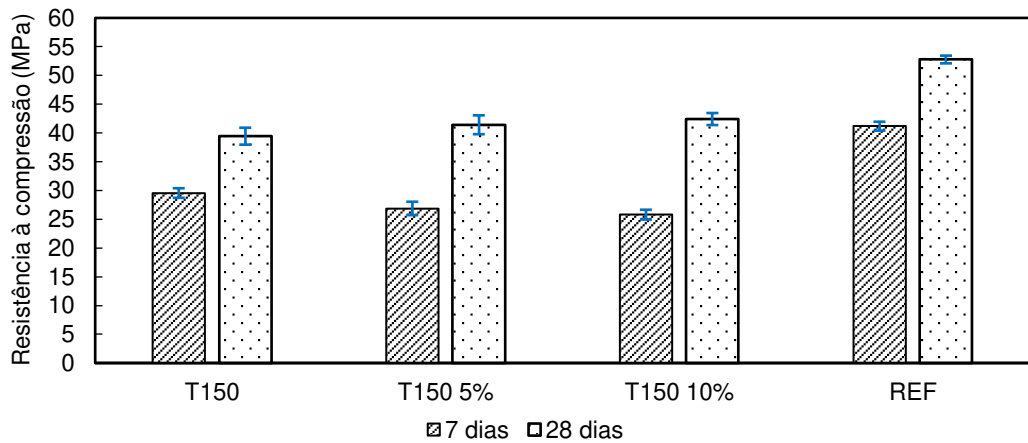
Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Brita 9,5
2,66 g/m ³	2,64 g/m ³	2,62 g/m ³	2,63 g/m ³

Fonte: Autores (2023)

4.2 Resistência à compressão

Foram rompidas 3 amostras de cada um dos traços para a obtenção de uma média de suas resistências e seu desvio padrão. A Figura 7 apresenta o resultado do ensaio de resistência à compressão.

Figura 7 – Resistência média dos traços.



Fonte: Autores (2023)

Ao analisar a resistência à compressão dos traços aos 28 dias, pode-se notar que o concreto de referência, com 100% de cimento, e mesmo esqueleto granular empacotado que os demais concretos com substituição, alcançou resistência 33,8% superior em relação ao concreto T150, que possui um consumo de cimento 59,9% menor.

A utilização das adições no concreto afetou diretamente sua resistência. Dentre os traços com o uso do RTM, aquele em que foi adicionado 10% de cal (T150 10%) alcançou maiores valores, mostrando que o RTM possui atividade pozolânica, pois a adição de cal hidratada reage com o RTM desde as primeiras idades, justificando, dessa maneira, o melhor desempenho à resistência. Esse mesmo comportamento de adição de cal em concretos com pozolanas foi visto também nos trabalhos de Diniz *et al.*, (2022) e Fonseca *et al.*, (2022).

Destaca-se que o concreto T150, mesmo sem adição de cal hidratada, alcançou valores altos de resistência, em torno de 40 Mpa. Além da atividade pozolânica, tal resultado mostra a eficiência do refinamento dos poros da matriz cimentícia através do empacotamento dos agregados e finos, confirmado anteriormente pelo trabalho de Santos *et al.* (2021), com a utilização do mesmo RTM e parâmetros de dosagem.

Com a utilização do *software* Stat Plus foi realizada análise estatística através do teste de Tukey, onde comparou-se as resistências médias entre cada traço, apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos.

	T150	T150 5%	T150 10%	REF
T150		Red	Red	Green
T150 5%			Red	Green
T150 10%				Green
REF				
Possui diferença significativa			Não possui diferença significativa	

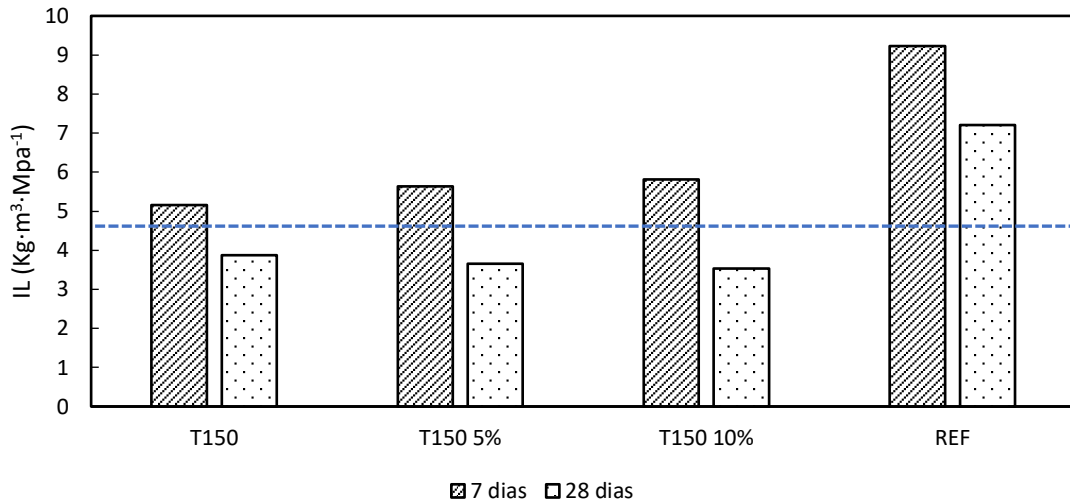
Fonte: Autores (2023)

O teste de Tukey, demonstrado pela Figura 8, mostra que não há diferença significativa entre os traços com RTM, com ou sem adição de cal hidratada. Assim, a adição de 10% de cal hidratada não foi significativa na resistência mecânica.

4.3 Índice de Ligante

A partir dos dados obtidos nos ensaios de compressão foi possível calcular o índice de ligante de cada traço nos períodos de 7 e 28 dias, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Índice de Ligante por traço



Fonte: Autores (2023)

Como apresentado na Figura 8, para cada traço, o índice de ligante expressa a quantidade de cimento em kg/m^3 para se atingir 1 Mpa. Dessa maneira, quanto menor o índice de ligante, mais eficiente será a mistura de concreto. Realizando uma comparação com o trabalho de Damineli (2013), o autor discorre que concretos com índice de ligante até $5 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ Mpa}$ são considerados de alta eficiência.

Com isso, é notório que nenhum dos traços, nos primeiros 7 dias, apresentou alta eficiência, sendo o mais eficiente o traço T150 com o IL de aproximadamente 5,16. Em relação à eficiência dos traços com 28 dias, observa-se que o T150, T150 5% e T150 10% alcançaram a alta eficiência com base no estudo de Damineli (2013), com destaque o T150 10%, com o IL de aproximadamente 3,54.

Assim, a eficiência dos índices de ligantes foi positiva para todas as substituições. A Figura 10 apresenta a análise estatística da eficiência dos ligantes.

Figura 10 - Teste de Tukey para eficiência do ligante

	T150	T150 5%	T150 10%	REF
T150				
T150 5%				
T150 10%				
REF				
Possui diferença significativa		Não possui diferença significativa		

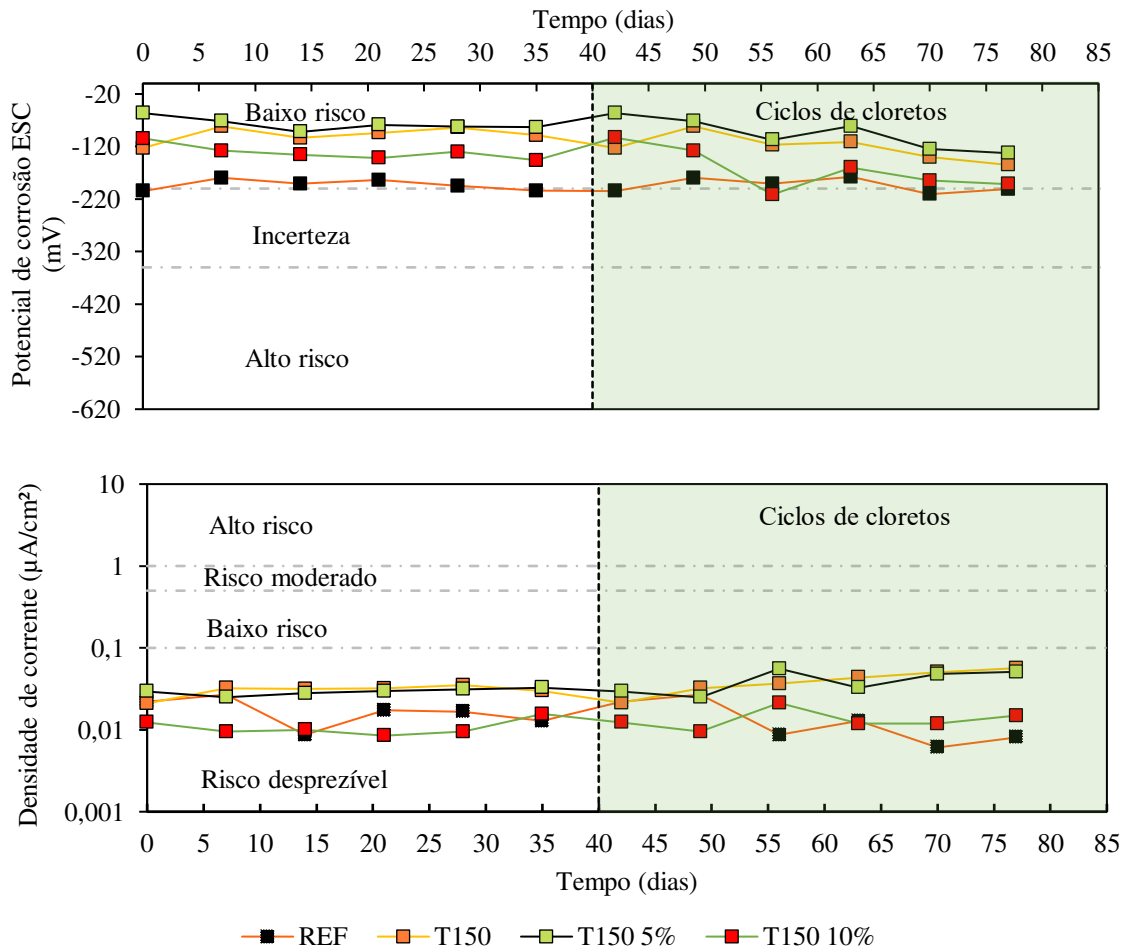
Fonte: Autores (2023)

As composições mais eficientes foram os traços com adição de RTM, em evidência o T150 10%, que demonstrou uma melhora progressiva com adição de 10% da cal hidratada, 51% mais eficiente em relação ao traço de referência REF. Os resultados obtidos demonstram desempenho superior aos obtidos por Santos *et al.* (2021), em concretos com RTM.

4.4 Monitoramento eletroquímico

Todos os concretos foram submetidos aos ciclos de imersão (2 dias) em solução de NaCl 1M e secagem (5 dias) em estufa a 40°C . O monitoramento do potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente (i_{corr}) iniciou-se aos 28 dias, para verificar a condição de passivação das barras de aço estudadas. Na Figura 11 vê-se que o E_{corr} e a i_{corr} mantiveram-se em um mesmo patamar de baixo risco de corrosão até os 40 dias, mostrando que a capa passiva está estabilizada. Aos 40 dias foram iniciados os ciclos de cloretos.

Figura 11 – Potencial de corrosão e densidade de corrente



Fonte: Autores (2023)

Até o momento, após 37 dias de monitoramento em ciclos de cloretos, as barras se mantêm passivadas. Os concretos de referência e T150 10% apresentam os menores níveis de corrente, que mostra a influência da inserção de 10% de cal na formação de um filme passivo de melhor qualidade.

O RTM tem-se mostrado uma adição com grande potencial em retardar o ingresso de cloretos nos concretos, como mostrado por Jerônimo, Meira e Filho (2018) e Siddique *et al.* (2019), com resultados que indicam o resíduo cerâmico como uma barreira ao ingresso de íons cloreto.

Meira *et al.*, (2014) estudaram concretos com RTM e monitoraram eletroquimicamente barras embutidas em concretos com substituição de 10% e 30% de RTM, com consumo de cimento de 372,9 kg/m³ e 290 kg/m³, respectivamente, e um concreto de referência com consumo de 414,3 kg/m³. O resultado do monitoramento eletroquímico mostra a despassivação das barras de referência em torno de 40 dias, o concreto com 10% de RTM em torno de 28 dias e o concreto com 30% de RTM com 42 dias.

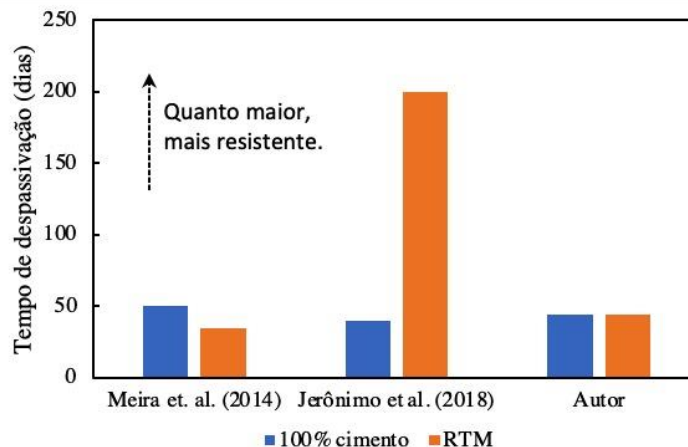
Jerônimo *et al.*, (2018), ao monitorarem concretos autoadensáveis com RTM nos níveis de substituição de 20%, 30% e 40%, consumos de cimentos de 418 kg/m³, 364 kg/m³ e 311 kg/m³, respectivamente, e um concreto convencional de referência (515 kg/m³), obtiveram melhores resultados. O concreto de referência despassivou primeiro, com 50 dias, mesmo com um consumo de cimento tão elevado. Os concretos com 20% e 30% de RTM apresentaram tempos de iniciação de corrosão bastante semelhantes, mas significativamente maiores, em torno de 175 dias. Essa diferença é ainda maior para concretos com 40% de GCBW, 225 dias.

O que diferencia os dois trabalhos é o consumo de cimento, maiores para o trabalho de Jerônimo, Meira e Filho (2018) e melhor empacotamento do esqueleto granular, obtido nos concretos autoadensáveis.

Assim, comparando os níveis de RTM estudados nesta pesquisa, com consumos de cimento em torno de 150 kg/m^3 , com os resultados de Meira *et. al.*, (2014) e Jerônimo, Meira e Filho (2018), constata-se a eficiência do empacotamento dos agregados calculado pelo software Q-Mix, pois, até o momento, as barras continuam passivas e estáveis, mesmo com um nível de alcalinidade muito abaixo dos concretos encontrados na literatura.

Na figura 12, pode ser vista a média dos dias para despassivação das literaturas, uma vez que utiliza diferentes teores de substituição, afim de se comparar com este trabalho que substitui apenas em uma proporção.

Figura 12 – Potencial de corrosão e densidade de corrente



Fonte: Autores (2023)

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados alcançados, destacam-se os seguintes pontos:

- Em termos de resistência mecânica, tem-se que esta diminuiu com a substituição por RTM, resultado já esperado, visto que a substituição foi muito elevada, em torno de 60%.

- A análise na eficiência do ligante mostra superioridade dos concretos T150, T150 5% e T150 10%, cerca de 50% superior ao concreto de referência, mesmo este com 60% a mais de cimento.

- O índice de ligante é um parâmetro mais adequado para avaliar o efeito das substituições do cimento e empacotamento dos agregados, visto que comparar os concretos apenas pela resistência mecânica não expressa todas as respostas relacionadas à eficiência do empacotamento das partículas e atividade pozolânica das adições.

- Todos os concretos foram moldados com o mesmo esqueleto granular, dosados com o Q-Mix. O maior empacotamento dos agregados foi de grande relevância para compensar a redução do teor de cimento, resultado comprovado pelo índice de ligante. Destaca-se também que a granulometria do RTM e do cimento podem ter alcançado um bom nível de empacotamento nos finos, visto que o RTM não apresenta alto nível de atividade pozolânica.

- A inserção da cal nos concretos não teve resultados significativos na resistência à compressão, contudo, sua resposta na passivação das barras de aço, com o aumento da alcalinidade da solução dos poros, mostra que a adição de 10% de cal é capaz de melhorar a qualidade do filme passivo no aço, em níveis de potencial e corrente equivalentes aos aços embutidos no concreto de referência, com elevada alcalinidade.

- O monitoramento eletroquímico mostra o bom desempenho à corrosão de todos os concretos em relação à literatura, escassa de dados que meçam o desempenho em relação ao tempo de iniciação da corrosão em concretos com baixo consumo de cimento.

Assim, este trabalho contribui para a literatura técnica acerca de concretos com baixo consumo de cimento, apresentando concretos com elevados teores de substituição do cimento Portland com o

aumento do seu desempenho mecânico e resistência à corrosão.

REFERÊNCIAS

AL-HASHEM, M. N.; AMIN, M. N.; AJWAD, A.; AFZAL, M.; KHAN, K.; FARAZ, M. I.; QADIR, M. G.; KHAN, H. Mechanical and durability evaluation of metakaolin as cement replacement material in concrete. **Materials**, v. 15, n. 22, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **C876**: Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. United States, 1991.

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

ANJOS, M.; CAMÕES, A.; JESUS, C.; CAMPOS, P. Avaliação da Durabilidade de Concretos Autoadensáveis com Reduzido Teor de Cimento e Elevados Teores de Adições Mineraias. *In*: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO - CONGRESSO DE CONTROLO DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO: CONGRESSO LUSO-AFRICANO DA CONSTRUÇÃO, 15. **Anais**. Lisboa, p. 1-8, 2015.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**, v. 53, p. 1451-1464, 2011.

ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - State of the art. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, p. 311- 317, 2009.

ARAÚJO, R. A. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

BARBOZA, L. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 23, 2018.

BELATO, M. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2013.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CORDEIRO, C. G.; DÉSI, J. M. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, Porto Alegre, v. 56, p. 71-76, 2010.

DAL RI, M. **Efeito da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2002.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.

DINIZ, H. A.A.; ANJOS, M. A.S. dos; ROCHA, A. K.A.; FERREIRA, R. L.S. Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. **Construction And Building Materials**, v. 319, p. 126087, 2022.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle packing IV – computer modelling of particle packing phenomena. **Interceram**, v. 42, n. 3, p. 150-152. 1993.

EL-DIEB, A. S.; KANAAN, D. M. Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 17, 2018.

EPE & IDDRI - ENTERPRISES POUR L'ENVIRONNEMENT & INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND INTERNATIONAL RELATIONS. **Scenarios for transition towards a low carbon world in 2050: what's at stake for heavy industries?** Paris, p. 6. 2008.

FERREIRA, P. R. R. **Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: an eco material that needs to be improved. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 32, n. 11, p. 2787–2798, 2012.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FONSECA, T. V.; ANJOS, M. A.S. dos; FERREIRA, R. L.S.; BRANCO, F. G.; PEREIRA, L. Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime. **Construction And Building Materials**, v. 320, p. 126235, 2022.

FUSCO, P. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

HEIKAL, M.; EL-DIDAMONY, H.; MORSY, M. S. Limestone-filled pozzolanic cement. **Cement and Concrete Research**. v. 30, n. 11, p. 1827-1834, 2000.

HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Docência em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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

JERÔNIMO, V. L. **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

JERÔNIMO, V. L.; MEIRA, G. R.; FILHO, L. C. P. da S. Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 900-910, 2018.

KAVITHA, O.; SHANTHI, V.; ARULRAJ, G.; SIVAKUMAR, P. Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 370-374, 2015.

KISHIMOTO, I. Experimental study on the corrosion condition of steel bars in cracked reinforced concrete specimen. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE AGEING MANAGEMENT & MAINTENANCE OF NUCLEAR POWER PLANTS. Proceedings*. Tokyo, p. 166-172, 2010.

KOFFS, G. N.; VENDRUSCOLO, I. M. D. **Análise do efeito de adições minerais na durabilidade de argamassas estabilizadas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

LIMA, F. de S, GOMES, S. de C.; OLIVEIRA, W; QUINTANILHA, L. Estudo da influência do método do empacotamento do agregado miúdo na resistência do concreto convencional. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 58. **Anais**. Belo Horizonte, p. 1-13, 2016.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre

modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, Curitiba, v. 63, p. 22-33, 2017.

LOPES, F. L. C.; MONTEIRO, M. D. S.; MELO, H. C. S.; SIQUEIRA, L. M.; LOPES, F. L. G. Análise quantitativa da perda de massa por oxidação em barras de aço carbono CA-50: Uma proposta metodológica para a contextualização do estudo da corrosão em cursos de engenharia civil/IFS. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 5. **Anais**. São Cristóvão-SE, p. 440-452, 2018.

MEHTA, P. K. A glimpse into sustainable ternary-blended cements of the future. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. **Apresentações**. São Paulo: IBRACON, p.39, 2008.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: fundamentos, diagnóstico e prevenção, 1. ed., João Pessoa: IFPB, 2017.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; JERÔNIMO, V. L.; CARNEIRO, A. M. P. Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 33-52, 2014.

MÜLLER, N.; HARNISCH, J. A blueprint for a climate friendly cement industry. **WWF International**, Switzerland, p. 16. 2008.

NICOTRA, D.; MEDEIROS, F.; ALBUQUERQUE, G.; DESSAUNE, K.; NEGRETE, L.; FERNANDES, V. Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto. **Engenharia e Arquitetura**. São Paulo, p. 1-15, 2012.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179-185, 2002.

ONER, A.; AKYUZ, S.; YILDIZ, R. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1165-1171, 2005.

ORTEGA, F. dos S.; PILEGGI, R. G.; SEPÚLVEDA, P.; PANDOLFELLI, V. C. Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica**. São Paulo, v. 43, p. 183-189, 1997.

OZÓRIO, B. P. M.; ISAIA, G. C. Penetração de cloretos em concretos com altos teores de cinza volante. *In*: SEMENGO – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA OCEÂNICA, 3. **Anais**. Rio Grande-RS, p. 1-20, 2008.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 832-838, 2010.

PAGE, M. M.; PAGE, C. L. NGALA, V. T.; ANSTICE, D. J. Ion chromatographic analysis of corrosion inhibitors in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 73-81, 2002.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

REBMANN, M. S., **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland:** desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

ROCHA, A. K. A. da. **Desempenho de argamassas para concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento Portland.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2020.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, 2014.

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

SANTOS, R. A. dos. **Dosagem e desempenho de concretos com elevadas substituições de cimento por fíler de resíduos cerâmicos frente a corrosão de armaduras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SANTOS, R. A. dos; MEIRA, G. R.; BEZERRA, W. V. D. de C. BRAGA, F. A. V.; PONTES, D. L. de. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria** Rio de Janeiro, v. 26, 2021.

SIDDIQUE, S.; CHAUDHARY, S.; SHRIVASTAVA, S.; GUPTA, T; Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: exposure to adverse conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 246-245, 2019.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TAVARES, L. M.; COSTA, E. M.; ANDRADE, J. J. O. Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando barras de aço comum e barras de aço galvanizado. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17. **Anais.** Foz do Iguaçu, 2006.

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

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável.** 1. ed., São Paulo: Pini, 2008.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Thesis (Doctorate - Division of Building Materials) – Lund University, Stockholm, 1982.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁČEK, M.; KERŠNER, Z.; ČERNÝ, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 1, p. 55-61, 2012.

VIEIRA, A. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WANG, A.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 685-695, 1997.

YILDIRIM, H; ILICA, T; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1282- 1288, 2011.

MARINA CARTAXO BRAGA MORAIS DE OLIVEIRA
VITÓRIA KAROLINE SILVA DE MORAIS

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUOS DE
TIJOLO MOÍDO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA FRENTE À CORROSÃO POR
CLORETOS**


Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 12 de julho de 2023.


BANCA EXAMINADORA



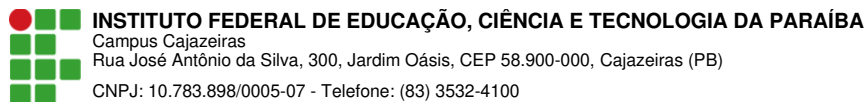
Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 CINTHYA SANTOS DA SILVA
Data: 08/08/2023 16:04:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a. Cinthya Santos da Silva IFPB – *Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 ERIJOHNSON DA SILVA FERREIRA
Data: 09/08/2023 18:14:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Erijohnson da Silva Ferreira – Melius Projetos
Examinador 2



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Versão TCC completa

Assunto: Versão TCC completa
Assinado por: Marina Oliveira
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira, ALUNO (201822200031) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 10/08/2023 09:25:06.

Este documento foi armazenado no SUAP em 10/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 903901

Código de Autenticação: cf1ff40123

